

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**LUCAS ANTÔNIO GOMES DO CARMO**

**PERDAS HÍDRICAS NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: UMA  
FERRAMENTA DE GESTÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS DE  
PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ**

**CAMPINAS**

**2025**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS DE**  
**INFRAESTRUTURA URBANA**  
**LUCAS ANTÔNIO GOMES DO CARMO**

**PERDAS HÍDRICAS NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: UMA**  
**FERRAMENTA DE GESTÃO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS DE**  
**PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Linha de Pesquisa: Sustentabilidade de Sistemas de Infraestrutura Urbana

Orientadora: Profa. Dra. Denise Helena Lombardo Ferreira

**CAMPINAS**

**2025**

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI  
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas  
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C287p	<p>Carmo, Lucas Antônio Gomes do</p> <p>PERDAS HÍDRICAS NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: UMA FERRAMENTA DE GESTÃO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS DE PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ / Lucas Antônio Gomes do Carmo. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.</p> <p>132 f.</p> <p>Orientador: Denise Helena Lombardo Ferreira.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Perdas de água. 2. Sistemas de abastecimento de água. 3. Métodos Multicriério. I. Ferreira, Denise Helena Lombardo. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.</p>
-------	--

**LUCAS ANTONIO GOMES DO CARMO**

**PERDAS HÍDRICAS NOS SISTEMAS DE  
ABASTECIMENTO DE ÁGUA: UMA FERRAMENTA DE  
GESTÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS DE  
PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Denise Helena Lombardo Ferreira

Dissertação defendida e aprovada em 10 de junho de 2025 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



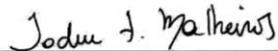
---

Profa. Dra. Denise Helena Lombardo  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Marcíus Fabius Henrique  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Tadeu Fabrício Malheiros  
Faculdade de Saúde Pública - USP

**CAMPINAS**

**2025**

A tia Vera, vô Nenê, e tio  
Toninho, *in memoriam*.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, a São Jerônimo e a Nossa Senhora dos Navegantes, pela proteção e inspiração ao longo de toda essa jornada.

Aos meus pais, Rita e Cláudio, por todo amor, carinho e incentivo. Pela presença constante em minha vida, não apenas nos momentos de alegria, mas também nas adversidades. Vocês foram meus mestres fora do contexto acadêmico, ensinando-me diariamente a ser uma pessoa melhor. A força e a sabedoria de vocês encantam-me e motivam-me a crescer a cada dia.

À Profa. Dra. Denise Helena Lombardo Ferreira, minha gratidão pelas oportunidades e pela coragem de enfrentarmos juntos os desafios. Agradeço imensamente por me aceitar como orientando, pela troca contínua de conhecimentos, e por sua dedicação, paciência e compreensão. Seu comprometimento foi essencial para minha formação.

Ao Prof. Dr. Marcius Fabius e ao Prof. Dr. Tadeu Fabrício, agradeço por aceitarem participar da minha qualificação e minha defesa, e pelas valiosas contribuições que enriqueceram o meu trabalho.

A todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, pelas aulas que ministraram e pelos debates instigantes que foram fundamentais para minha formação.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, pela organização e apoio ao longo deste processo.

Por fim, a todas as pessoas que me acompanharam nesta jornada, pelas trocas de experiências, conversas e risadas, minha sincera gratidão.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O cenário econômico atual exerce pressão crescente sobre os recursos naturais, especialmente a água, essencial à vida. Um dos principais desafios enfrentados no abastecimento de água refere-se às perdas de água nos sistemas de distribuição de água. Tais perdas não apenas comprometem o uso eficiente da água, mas também resultam em custos adicionais com produtos químicos, energia e outros insumos, gerando desperdícios que impactam negativamente os cofres públicos, os quais acabam sendo repassados aos consumidores. Este estudo tem como objetivo analisar e avaliar as perdas de água nos sistemas de abastecimento de água dos municípios inseridos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. A pesquisa adota uma abordagem metodológica de caráter exploratória, descritiva e aplicada, utilizando técnicas qualitativas e quantitativas. O procedimento técnico envolve revisão bibliográfica, análise bibliométrica e pesquisa documental. Para a análise dos dados, foram aplicados os métodos multicritério Simples Soma Ponderada e Análise Envoltória de Dados aos dados obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, referentes às perdas de água no ano de 2022. A aplicação dos métodos permitiu construir um *ranking* dos municípios das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, em relação às perdas de água, identificando-se aqueles que requerem maior atenção e intervenção. A rodada realizada para os 65 municípios com o método Simples Soma Ponderada evidenciou a eficiência relativa dos cinco melhores: Sapucaí-Mirim (0,921), Mombuca (0,874), Santa Maria da Serra (0,808), Joanópolis (0,798) e Pinhalzinho (0,775) e os cinco piores: Itu (0,604), Tietê (0,601), Capivari (0,591), Rio Claro (0,561) e Santo Antônio de Posse (0,528). Já com o método Análise Envoltória de Dados, os cinco melhores foram: Analândia (1,000), Mombuca (1,000), Sapucaí-Mirim (1,000), Santa Maria da Serra (0,910) e Joanópolis (0,893) e os cinco municípios piores foram: Americana (0,321), Piracicaba (0,313), Itu (0,303), Tietê (0,294), Capivari (0,236). Adicionalmente, desenvolveu-se um painel de controle interativo, apresentando informações detalhadas sobre as perdas de água, o que oferece uma ferramenta útil para monitoramento e tomada de decisão eficazes.

**Palavras-chave:** Perdas de água; Sistema de abastecimento de água; Bacias hidrográficas; Métodos Multicritério; Eficiência hídrica; *Dashboard*.

## ABSTRACT

The current economic scenario exerts increasing pressure on natural resources, especially water, which is essential for life. One of the main challenges faced in water supply systems concerns water losses within distribution networks. These losses not only compromise the efficient use of water but also lead to additional costs related to chemicals, energy, and other inputs, generating waste that negatively impacts public finances, costs that are ultimately passed on to consumers. This study aims to analyze and assess water losses in the water supply systems of municipalities located within the Hydrographic Basins of the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí Rivers. The research adopts an exploratory, descriptive, and applied methodological approach, utilizing both qualitative and quantitative techniques. The technical procedure involves a literature review, bibliometric analysis, and documentary research. For data analysis, the multicriteria methods of Weighted Sum Model (WSM) and Data Envelopment Analysis (DEA) were applied to data obtained from the National System of Sanitation Information, referring to water losses in the year 2022. The application of these methods allowed the construction of a ranking of municipalities within the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Basins, based on their water loss performance, identifying those that require greater attention and intervention. The assessment conducted for the 65 municipalities using the Weighted Sum Model revealed the relative efficiency of the top five municipalities: Sapucaí-Mirim (0.921), Mombuca (0.874), Santa Maria da Serra (0.808), Joanópolis (0.798), and Pinhalzinho (0.775), as well as the five least efficient municipalities: Itu (0.604), Tietê (0.601), Capivari (0.591), Rio Claro (0.561), and Santo Antônio de Posse (0.528). In the application of the Data Envelopment Analysis method, the top five municipalities were: Analândia (1.000), Mombuca (1.000), Sapucaí-Mirim (1.000), Santa Maria da Serra (0.910), and Joanópolis (0.893), while the five least efficient municipalities were: Americana (0.321), Piracicaba (0.313), Itu (0.303), Tietê (0.294), and Capivari (0.236). Additionally, an interactive control panel was developed, presenting detailed information on water losses, providing a useful tool for monitoring and effective decision-making.

**Keywords:** Water losses; Water supply system; River Basins; Multicriteria methods; Water efficiency; Dashboard.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Regiões hidrográficas do Brasil.....	19
<b>Figura 2</b> - Localização das Bacias Hidrográficas do Paraná, Tietê e PCJ.....	20
<b>Figura 3</b> - Vazamentos <i>versus</i> Custos.....	25
<b>Figura 4</b> - Procedimentos para controle de perdas reais.....	28
<b>Figura 5</b> - Procedimentos para controle de perdas aparentes.....	29
<b>Figura 6</b> - <i>Ranking</i> dos países em relação às perdas de água (em porcentagem) ..	30
<b>Figura 7</b> - IN049_AE das Bacias PCJ (período 2018 a 2022) .....	33
<b>Figura 8</b> - <i>Box plot</i> do IN049_AE (%) por porte do município.....	34
<b>Figura 9</b> - <i>Box plot</i> do IN049_AE por natureza jurídica .....	35
<b>Figura 10</b> - IN051_AE das Bacias PCJ (período 2018 a 2022) .....	41
<b>Figura 11</b> - <i>Box plot</i> do IN051_AE, por porte populacional, 2022.....	42
<b>Figura 12</b> - <i>Box plot</i> do IN051_AE, por natureza jurídica, 2022.....	43
<b>Figura 13</b> - Índice de perdas nos Municípios das Bacias PCJ, 2022.....	48
<b>Figura 14</b> - Método da pesquisa .....	52
<b>Figura 15</b> - Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá .....	53
<b>Figura 16</b> - Disposição geográfica das sub-bacias inseridas nas Bacias PCJ.....	54
<b>Figura 17</b> - <i>Framework</i> da análise de bibliometria.....	69
<b>Figura 18</b> - Quantidade de artigos publicados entre 1978 e março de 2024 .....	70
<b>Figura 19</b> - Quantidade de artigos publicados nos 15 principais países.....	71
<b>Figura 20</b> - Quantidade de artigos publicados nos 10 principais periódicos.....	72
<b>Figura 21</b> - Rede de coocorrências de palavras-chave .....	73
<b>Figura 22</b> - Rede de incidência de palavras-chave entre os anos 1978 e março de 2024 .....	74
<b>Figura 23</b> - Mapa temático.....	75
<b>Figura 24</b> – <i>Box plot</i> da eficiência dos municípios quanto à natureza jurídica – Método SAW .....	97
<b>Figura 25</b> - <i>Box plot</i> da eficiência dos municípios quanto à natureza jurídica – Método DEA.....	98
<b>Figura 26</b> – Mapa e eficiências relativas - Método SAW .....	102
<b>Figura 27</b> - Mapa e eficiências relativas Método DEA .....	105
<b>Figura 28</b> – Desempenho dos municípios das Bacias PCJ .....	106

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Cenários da redução das perdas na distribuição .....	16
<b>Tabela 2</b> - IN049_AE por Unidade de Federação do Brasil (período 2021-2022).....	31
<b>Tabela 3</b> - Municípios das Bacias PCJ e o valor médio de IN049_AE .....	32
<b>Tabela 4</b> - IN049_AE por natureza jurídica Administração Pública Direta (2018 – 2022) .....	36
<b>Tabela 5</b> - IN049_AE por natureza jurídica Autarquia (2018 – 2022) .....	37
<b>Tabela 6</b> - IN049_AE por natureza jurídica Empresa Privada (2018 – 2022) .....	38
<b>Tabela 7</b> - IN049_AE por natureza jurídica empresa Economia Mista (2018 – 2022) .....	38
<b>Tabela 8</b> - Índice de Perdas na Distribuição das 41 cidades estudadas por Santi (2018), período de 2018 a 2022 .....	39
<b>Tabela 9</b> - IN051_AE por natureza jurídica Administração Pública Direta (2018 – 2022) .....	43
<b>Tabela 10</b> - IN051_AE por natureza jurídica Autarquia (2018 – 2022) .....	44
<b>Tabela 11</b> - IN051_AE por natureza jurídica Empresa Privada (2018 – 2022) .....	45
<b>Tabela 12</b> - IN051_AE por natureza jurídica Economia Mista (2018 – 2022) .....	46
<b>Tabela 13</b> - Índice de perdas por ligação das 41 cidades estudadas por Santi (2018), período de 2018 a 2022 .....	47
<b>Tabela 14</b> - Municípios com dados incongruentes para o ano 2022.....	56
<b>Tabela 15</b> - Correlação dos indicadores selecionados .....	57
<b>Tabela 16</b> - Ponderação do especialista.....	64
<b>Tabela 17</b> - Pesos dos critérios.....	64
<b>Tabela 18</b> - Quantidade de artigos publicados pelas das 10 principais instituições..	72
<b>Tabela 19</b> - Distribuição dos 10 principais autores .....	77
<b>Tabela 20</b> - Artigos mais citados.....	77
<b>Tabela 21</b> - <i>Ranking</i> dos municípios das Bacias PCJ – Método SAW.....	79
<b>Tabela 22</b> - <i>Ranking</i> dos municípios até 100 mil habitantes - Método SAW.....	82
<b>Tabela 23</b> - <i>Ranking</i> dos municípios com mais de 100 mil habitantes - Método SAW .....	83
<b>Tabela 24</b> - <i>Ranking</i> dos municípios das Bacias PCJ - Método DEA .....	85
<b>Tabela 25</b> – <i>Ranking</i> dos municípios com até 100 mil habitantes - Método DEA.....	87
<b>Tabela 26</b> - <i>Ranking</i> dos municípios com mais de 100 mil habitantes - Método DEA .....	89

<b>Tabela 27</b> - Visão sumária dos resultados com a aplicação dos métodos SAW e DEA .....	96
<b>Tabela 28</b> - Investimentos pelas Bacias PCJ em perdas e eficiência municipal (1999-2018) .....	99

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Indicadores de saneamento básico nas Bacias PCJ, 2022 .....	23
<b>Quadro 2</b> - Caracterização das perdas em sistemas de distribuição de água.....	25
<b>Quadro 3</b> - Balanço Hídrico .....	26
<b>Quadro 4</b> – Definição das naturezas jurídicas .....	35
<b>Quadro 5</b> - Municípios e sub-bacias das Bacias PCJ.....	54
<b>Quadro 6</b> – Indicadores selecionados .....	56
<b>Quadro 7</b> - Escala de preferências de Saaty .....	62
<b>Quadro 8</b> - Índice de Consistência Randômica .....	63
<b>Quadro 9</b> - Ações de combate às perdas de água em sistemas de abastecimento .	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ACERTAR	Aprimoramento da Contabilidade Regulatória do Saneamento
AG008	Volume de água micromedido
AG012	Volume de água macromedido
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ARSESP	Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
ARES-PCJ	Agência Reguladora dos Serviços de Saneamento das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
Bacias PCJ	Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
BCC	Banker, Charnes e Cooper
CBH-PCJ	Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IN005_AE	Tarifa média de água
IN011_AE	Índice de macromedição
IN013_AE	Índice de Perdas no Faturamento
IN022_AE	Consumo médio <i>per capita</i> de água
IN044_AE	Índice de micromedição relativo ao consumo
IN046_AE	Índice de Esgoto Tratado Referido à Água Consumida
IN049_AE	Índice de Perdas na Distribuição
IN051_AE	Índice de Perdas por Ligação
IN055_AE	Índice de Atendimento Total de Água

IN056_AE	Índice de Atendimento Total de Esgoto Referido aos Municípios Atendidos com Água
IN058_AE	Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água
ITB	Instituto Trata Brasil
IPFT	Índice de Perdas no Faturamento Total
IWA	<i>International Water Association</i>
KPIs	<i>Key Performance Indicator</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MIDR	Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A
SDA	Sistemas de Distribuição de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
TI	Tecnologia da Informação
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
1.1.	Objetivos .....	15
1.2.	Importância e justificativa .....	16
1.3.	Estrutura da dissertação .....	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	19
2.1.	Bacias hidrográficas .....	19
2.2.	Saneamento no Brasil .....	21
2.3.	Perdas de água em sistemas de abastecimento de água .....	24
2.3.1.	Perdas de água em sistemas de abastecimento de água no Mundo e no Brasil	29
2.3.2.	Perdas de água nas Bacias PCJ .....	32
3.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	51
3.1.	Caracterização da pesquisa .....	51
3.2.	Procedimentos da coleta de dados .....	53
3.2.1.	Caracterização da área de estudo .....	53
3.2.2.	Coleta dos indicadores .....	55
3.3.	<i>Dashboard</i> de perdas de água das Bacias PCJ .....	57
3.3.1.	Definição de KPIs e Indicadores para o <i>Dashboard</i> .....	59
3.4.	Procedimentos da análise de dados .....	61
3.4.1.	Método Simples Ponderação Aditiva .....	61
3.4.2.	Método Análise Envoltória de Dados .....	65
3.5.	Caracterização da análise bibliométrica .....	67
4.	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....	70
5.	RESULTADOS .....	79
5.1.	Aplicação do método Simples Ponderação Aditiva .....	79
5.2.	Aplicação do método Análise Envoltória de Dados .....	84
5.3.	Síntese da aplicação dos dois métodos .....	91
5.4.	<i>Dashboard</i> para a gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água das Bacias PCJ .....	102
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	108
6.1.	Limitações e sugestões para futuras pesquisas .....	111

## 1. INTRODUÇÃO

A água doce, um recurso natural finito e insubstituível, é fundamental para a manutenção da vida, o desenvolvimento socioeconômico e a estabilidade dos ecossistemas. Embora o planeta seja essencialmente composto de água, menos de 10% é água doce (Farouk; Rahman; Romali, 2023).

Contudo, a crescente pressão exercida pelo crescimento populacional, pela expansão industrial e agrícola, e pelos padrões de consumo insustentáveis, exacerbada pelos efeitos das alterações climáticas, tem gerado uma crise hídrica global cada vez mais evidente, manifestando-se através da escassez e da deterioração da qualidade da água em diversas regiões do mundo.

Conforme Hawken, Lovis e Lovis (2007), os fatores decorrentes da industrialização acelerada, do expressivo crescimento populacional e da crescente urbanização, das alterações climáticas, do esgotamento de recursos produtivos, da escassez de água, da poluição do solo, água e ar compõem os principais pontos de pressão e conscientização humana sobre a problemática ambiental global.

Ao longo de milênios, os recursos hídricos vêm sendo utilizados de formas múltiplas como sobrevivência, assentamentos, agricultura, pecuária, saneamento e comércio. Esses usos múltiplos da água geram pressões sobre as fontes de água doce disponíveis, exaurindo a quantidade e qualidade do recurso hídrico. No século XXI, a gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio crucial pela ótica social, ambiental e econômica.

Tzanakakis, Paranychianakis e Angelakis (2020) ponderam que o uso sustentável dos recursos hídricos possui grandes desafios devido ao crescimento populacional, ao contexto econômico frágil, à necessidade de garantir a segurança alimentar, ao aumento da demanda por água, à deterioração da qualidade do recurso hídrico e ao envelhecimento das infraestruturas.

A inquietação com o consumo desenfreado, que vem ocorrendo nos últimos anos, culminou, em setembro de 2015, no encontro de mais de 150 líderes mundiais em Nova Iorque, na sede da Organização das Nações Unidas (ONU). Com definição de uma nova agenda de Desenvolvimento Sustentável, a Agenda 2030 (ONU, 2015).

A Agenda 2030, composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), deve ser implementada até o ano 2030, com a finalidade de corrigir os problemas causados pelo homem. Tais objetivos busca equilíbrio entre as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental.

Segundo a ONU (2015), os ODS relacionados aos recursos hídricos são: ODS 6. Água potável e saneamento; ODS 7. Energia acessível e limpa; ODS 11. Cidades e comunidades sustentáveis; ODS 12. Consumo e produção responsáveis; ODS 13. Ação contra a mudança global do clima; e ODS 14. Vida na água.

A pressão sobre a disponibilidade, o elevado consumo de água *per capita* representam um desafio significativo, muitas vezes associado a uma cultura onde a percepção do valor da água e a consciência ambiental ainda necessitam de maior atenção (Jacobi, 2006; Tundisi, 2008).

A distribuição de água potável não é isenta de desafios, e um dos principais problemas enfrentados são as perdas nos Sistemas de Distribuição de Água (SDA). Em concordância, Kusterko *et al.* (2018) destacam ser indispensável abordar as questões relacionadas às perdas nos sistemas de distribuição de água, focalizando a necessidade de uma gestão sustentável e eficaz desse recurso essencial.

Neste cenário de disponibilidade limitada e demanda crescente, as perdas físicas e não físicas nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) emergem como um fator crítico que agrava ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos. Ressalta-se que as siglas SDA e SAA são usadas nesta pesquisa como sinônimos.

Tais perdas, que representam água tratada que não chega ao consumidor final ou não é devidamente contabilizada, constituem não apenas um desperdício de um recurso vital, mas também um prejuízo econômico e energético considerável para os prestadores de serviço e, conseqüentemente, para a sociedade (Kingdom; Liemberger; Marin, 2006; ITB, 2023).

O Índice de Perdas no Faturamento Total (IPFT), representa a porcentagem do faturamento potencial não realizada devido a perdas na distribuição. No Brasil, esse índice atingiu 40,9% em 2021 (ITB, 2023), o que evidencia a magnitude do problema em nível nacional, superando índices de diversos outros países como “Camarões (40,0%), Tanzânia (37,0%), Etiópia (29%), China (21%), e Estados Unidos (14%)” (ITB, 2023, p. 4). Isso reforça ser indispensável uma movimentação com foco na redução de perdas nos sistemas de distribuição de água no Brasil.

Neste contexto global de crescente preocupação, as Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Bacias PCJ), localizadas numa das regiões mais dinâmicas e populosas do Brasil, abrangendo 76 municípios (71 em São Paulo e 5 em Minas Gerais), enfrentam desafios hídricos particularmente agudos.

Essa região, caracterizada por uma elevada densidade populacional, intensa atividade industrial e agrícola, e um histórico de rápida urbanização, já presencia uma disponibilidade hídrica *per capita* considerada baixa e com tendência decrescente, situação agravada por eventos climáticos extremos, como secas prolongadas (Comitês PCJ, 2020).

A segurança hídrica nas Bacias PCJ representa uma prioridade, não apenas para o abastecimento humano, mas também para a sustentabilidade econômica e ambiental regional.

Uma das principais soluções, a redução de perdas nos SAA, é vista como uma estratégia fundamental no processo decisório das operadoras de água, especialmente no cenário competitivo atual.

Investimentos no controle e diminuição das perdas nos SAA apresentam vantagens em várias áreas, tais como: econômica, tecnológica, sociocultural e ambiental (Kusterko *et al.*, 2018).

Estas perdas não só representam um desperdício de água tratada, de energia e de produtos químicos, mas também impactam negativamente a sustentabilidade financeira dos serviços de saneamento, contribuindo para que muitos municípios operem com *déficits* tarifários, onde os custos superam as receitas (Sobrinho; Borja, 2016).

A gestão dos serviços de abastecimento de água neste contexto fragmentado envolve múltiplos atores, incluindo os prestadores de serviços (operadoras municipais ou concessionárias), os municípios (responsáveis pela titularidade dos serviços) e as entidades reguladoras.

No estado de São Paulo, a Agência Reguladora de Saneamento e Energia (ARSESP) desempenha um papel crucial na regulação e fiscalização dos serviços, estabelecendo padrões de qualidade e tarifas. Especificamente para a região das Bacias PCJ, a Agência Reguladora dos Serviços de Saneamento das Bacias PCJ (ARES-PCJ) atua na regulação e fiscalização dos serviços nos municípios consorciados, buscando garantir a qualidade, eficiência e sustentabilidade. Adicionalmente, o Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ) funciona como um fórum de discussão e planejamento, fomentando ações para a gestão integrada dos recursos hídricos, embora o poder de fiscalização e controle direto sobre as operações de saneamento recaia

primariamente sobre as agências reguladoras e os titulares dos serviços (ARSESP, 2025; ARES-PCJ, 2025; BRASIL, 2011).

Jacobi, Buckeridge e Ribeiro (2021, p. 211) salientam a necessidade de repensar na governança da água tendo em vista o “arranjo político, social, econômico e administrativo para desenvolver e gerir os recursos hídricos e os serviços de abastecimento de água para os diferentes segmentos da sociedade”.

Embora esforços da educação ambiental procurem fomentar a cidadania e o consumo consciente (Layrargues; Lima, 2014; Philippi Jr; Pelicioni, 2011), a mudança de hábitos de consumo em larga escala permanece como um objetivo complexo.

Contudo, a coordenação entre estes diversos atores nem sempre é a mais adequada, e a gestão frequentemente ocorre de forma isolada em cada município, sem mecanismos eficazes de colaboração ou partilha de recursos e soluções.

O problema central reside, portanto, na combinação da elevada pressão sobre os recursos hídricos, devido à baixa disponibilidade *per capita* e ao alto consumo, com a ineficiência na distribuição, manifestada pelos altos índices de perdas de água nos SAA dos municípios das Bacias PCJ.

Além disso, a degradação, o envelhecimento das infraestruturas e também a gestão operacional por vezes deficiente, contribuem para a persistência desses elevados níveis de perdas (Tzanakakis; Paranychianakis; Angelakis, 2020). Nessa linha, Nygård *et al.* (2007) ao estudarem o sistema de distribuição de água da Noruega, observaram que as interrupções nos trabalhos de manutenção do sistema estavam associadas a um aumento no risco de doenças gastrointestinais na população.

Os níveis de perdas nos SDA dos municípios e a escassez hídrica das Bacias PCJ têm se apresentado acima do esperado, o que intensifica a necessidade de uma gestão dos recursos hídricos eficiente, de forma a controlar as perdas e, como consequência, reduzir a pressão dos recursos hídricos e as despesas com a energia elétrica e os insumos utilizados no tratamento de água nas operadoras desses municípios.

Face a este problema complexo e multifacetado, torna-se evidente a necessidade de ferramentas e análises que permitam uma avaliação mais aprofundada e comparativa do desempenho dos municípios na gestão das perdas de água.

Embora existam planos e metas estabelecidas, como as do Plano de Bacias PCJ 2020 a 2035 (Comitês PCJ, 2020), frequentemente faltam instrumentos detalhados que subsidiem a tomada de decisão informada por parte dos diversos atores envolvidos, desde as operadoras que necessitam priorizar investimentos e intervenções, passando pelos municípios que precisam fiscalizar e planejar os serviços, até as agências reguladoras que definem padrões e incentivam a eficiência, e a própria sociedade civil que demanda serviços mais sustentáveis e eficientes.

A gestão atual, muitas vezes reativa e baseada em dados agregados, carece de abordagens que permitam identificar as cidades mais eficientes, bem como compreender as razões por trás das diferenças de desempenho entre municípios com características semelhantes (tipologias) e a disseminação de boas práticas de gestão.

A proposta central deste trabalho é aplicar uma avaliação multicritério do desempenho dos municípios, utilizando modelos de *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), para classificar e comparar os municípios com base em indicadores relevantes associados às perdas de água.

Assim, é importante identificar, com o uso desses modelos, quais municípios apresentam desempenho ineficiente a partir de alguns indicadores associados a essa temática. Neste sentido, a questão que essa pesquisa buscou responder foi: Qual o desempenho dos municípios das Bacias PCJ quanto às perdas de água nos sistemas de abastecimento de água?

Adicionalmente, a pesquisa desenvolveu um *dashboard* interativo como ferramenta de apoio à decisão. Esta ferramenta não se destina a substituir os planos existentes, mas sim a fortalecê-los, fornecendo aos gestores (operadoras, municípios, agências reguladoras, Comitê das Bacias PCJ) e à sociedade uma plataforma visual e analítica para monitorizar o desempenho, identificar municípios de referência, investigar as causas da ineficiência e simular o impacto potencial de diferentes estratégias para a redução de perdas.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar e avaliar as perdas de água nos sistemas de abastecimento de água dos municípios inseridos nas Bacias PCJ.

Os objetivos específicos são:

- Investigar os tipos de perdas (físicas e não físicas) nos sistemas de abastecimento de água e os fatores que as influenciam.

- Analisar os principais indicadores associados às perdas nos sistemas de abastecimento de água dos municípios das Bacias PCJ.
- Aplicar modelos MCDM para avaliar e classificar o desempenho dos municípios inseridos nas Bacias PCJ com relação às perdas de água, permitindo identificar municípios de referência e áreas prioritárias para intervenção.
- Desenvolver um *dashboard* como ferramenta de apoio à gestão de perdas de água, permitindo a visualização e a análise comparativa do desempenho dos municípios das Bacias PCJ.

## 1.2. Importância e justificativa

Este estudo justifica-se pela urgência em otimizar o uso da água numa região sob elevado *stress* hídrico como as Bacias PCJ. A redução das perdas nos SAA representa uma das estratégias mais eficazes para aumentar a disponibilidade hídrica sem a necessidade de novos mananciais, além de gerar benefícios econômicos significativos pela redução de custos com energia e tratamento, e ambientais pela menor pressão sobre os ecossistemas aquáticos (Kingdom; Liemberger; Marin, 2006; Liemberger; Wyatt, 2019).

Ao fornecer uma análise comparativa e uma ferramenta de apoio à decisão, esta pesquisa contribui com subsídios técnicos para que os diversos atores envolvidos possam tomar decisões mais informadas e eficazes, promovendo uma gestão mais sustentável e resiliente dos recursos hídricos na região.

O tema perdas de água no SAA tornou-se grande preocupação dos gestores de áreas afins. Os Comitês PCJ (2020) já destacavam como meta para 2020, perdas de água de no máximo 25% nos SDA. A Tabela 1 mostra cenários para os municípios que não atingirem esta meta.

**Tabela 1** - Cenários da redução das perdas na distribuição

Cenários	Perdas 2016	Perdas 2033	Redução	Ganho Bruto Total (R\$)	Ganho Líquido Total (R\$)
<b>Cenário 1: Otimista</b>	39%	15%	61%	75.234.430	37.617.215
<b>Cenário 2: Base</b>	39%	20%	48%	59.244.620	29.622.310
<b>Cenário 3: Conservador</b>	39%	25%	35%	43.254.809	21.627.405

**Fonte:** ITB (2022, p. 11).

Os três cenários de perdas de água no SAA apontados na Tabela 1 mostram ganho líquido da receita, adicionalmente, o controle de perdas possibilita mensurar as atividades de operação e manutenção dos sistemas de água (Tardelli Filho, 2016).

O Relatório do Banco Mundial aponta que a quantidade mundial de perdas de água é considerável, mais de 32 bilhões de m<sup>3</sup> de água tratada são perdidos devido aos vazamentos nas redes de distribuição. Ressalta-se que, em nível mundial, 16 bilhões de m<sup>3</sup> de água não são faturados em razão de problemas de medição e furto. Uma estimativa do custo total dessas perdas na distribuição de água para empresas de saneamento é em torno de 14 bilhões de dólares por ano (Kingdom; Liemberger; Marin, 2006).

O volume total de água não faturada no mundo é estimado em 346 milhões de metros cúbicos por dia, equivalente a 126 bilhões de metros cúbicos por ano. Considerando um valor conservador de apenas 0,31 dólares por metro cúbico, o custo ou valor da água perdida atinge 39 bilhões de dólares por ano (Liemberger; Wyatt, 2019)

Por sua vez, Farley *et al.* (2008) assinalam que a gestão de perdas de água não deve ser tratada como atividade pontual, mas sim uma atividade na qual é necessário um compromisso de longo prazo, incluindo diversas áreas, e a integração dos processos das operadoras de saneamento com o envolvimento da sociedade, no sentido de favorecer que a informação seja compreendida e acessível.

Ressalta-se que nos SAA, um grande volume de água, que é perdido, não é contabilizado, que o torna financeiramente oneroso para as companhias de saneamento e, como consequência, repassado para a população. Dessa forma, é de suma importância o estudo das perdas de água nos SAA dos municípios inseridos nas Bacias PCJ, objeto desta pesquisa.

A partir da coleta de dados sobre as perdas de água no SDA, espera-se aprofundar a discussão. A disponibilização do *ranking* dos municípios inseridos nas Bacias PCJ referente às perdas de água, pode ser útil aos gestores de operadoras de abastecimento de água, administradores e prefeituras, nas tomadas de decisões mais adequadas, construção de políticas públicas e mitigação das perdas de água na distribuição de água.

### 1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco etapas. A primeira macro etapa, dedicada ao referencial teórico, abrange três temas principais. Inicialmente, são apresentados os conceitos de Bacias Hidrográficas. Em seguida, discute-se o Saneamento no Brasil e, por fim, abordam-se as perdas nos SAA.

A segunda macro etapa, estruturada em cinco fases, concentra-se nos procedimentos metodológicos. A primeira fase caracteriza a pesquisa, identificando o tipo de abordagem utilizada para atender aos objetivos. A segunda fase destaca os procedimentos de coleta de dados, especificando a região estudada e os indicadores selecionados. Na terceira fase, são detalhados os métodos de análise de dados, utilizados para a classificação dos municípios das Bacias PCJ. A quarta fase aborda a criação de um *dashboard* para auxiliar na gestão das perdas de água em SDA das Bacias PCJ, enquanto a quinta fase foca a técnica da pesquisa bibliométrica.

Na terceira macro etapa, são apresentados os resultados da investigação da produção científica sobre o tema, com base na análise bibliométrica.

A quarta macro etapa apresenta os resultados obtidos, organizados em quatro fases: as duas primeiras fases focam os resultados dos métodos SAW e DEA, enquanto a terceira realiza a síntese da aplicação desses dois métodos e a última apresenta o *dashboard*.

Por fim, a quinta macro etapa da dissertação é dedicada às conclusões que emergem da análise dos resultados. Inicialmente, discutem-se as implicações dos métodos SAW e DEA, evidenciando-se como cada um contribui para a compreensão das perdas de água e a eficiência na gestão dos recursos hídricos. Em seguida, é feita uma síntese das principais descobertas, destacando-se as semelhanças e diferenças entre as abordagens, bem como suas respectivas vantagens e limitações. Adicionalmente, essa etapa final também reflete a relevância dos resultados no contexto da pesquisa e suas possíveis aplicações práticas. Por último, são apresentadas as limitações e as recomendações para futuras investigações, sublinhando-se a importância de continuar explorando novas metodologias e enfoques que possam enriquecer o entendimento sobre a eficiência da redução das perdas de água em SAA.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Bacias hidrográficas

De acordo com o Brasil das Águas (2024), uma bacia hidrográfica constitui uma área drenada por um rio específico, com todas as nascentes e todos os seus afluentes. As bacias hidrográficas são elementos chave no entendimento e análise do ciclo hidrológico. Essas bacias representam uma área de captação natural dos fluxos de água de origem das chuvas, na qual os afluentes convergem para um ponto singular, nomeado de exutório (Collischonn; Dornelles, 2015).

A Figura 1 destaca as 12 regiões hidrográficas brasileiras e as respectivas localizações.

**Figura 1 - Regiões hidrográficas do Brasil**



**Fonte:** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2023, s/p)

A divisão das regiões hidrográficas é definida pela similaridade das características geográficas, naturais, sociais e econômicas, além da proximidade por bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas (ANA, 2023).

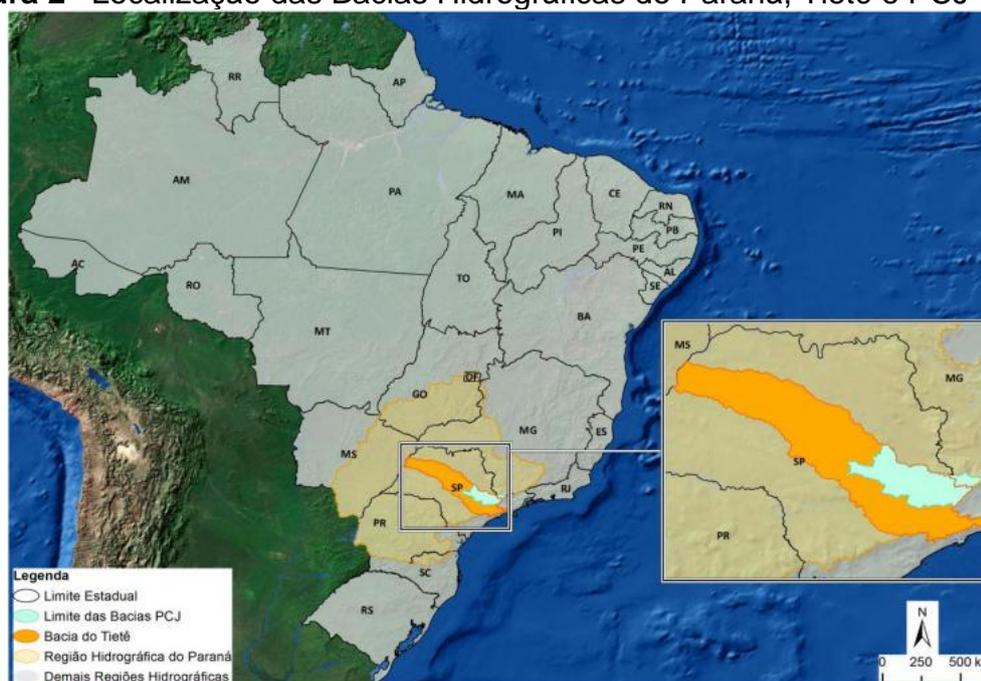
Embora o Brasil detenha cerca de 12% da água doce superficial do Planeta, essa disponibilidade não ocorre de forma homogênea. Por exemplo, na Região Sudeste há apenas 13% do volume do total de água doce com 58% da população

total, contrapondo-se, a Região Norte concentra 68% desta água, com apenas 7% da população total (Silva *et al.*, 2018).

O Brasil possui dificuldades para garantir os usos sustentáveis da água no seu território, mesmo tendo um conjunto de políticas públicas e leis, considerado avançado no plano internacional (OCDE, 2015). Em concordância, Grangeiro *et al.* (2020), destacam que, no Brasil, embora exista uma legislação avançada em relação aos recursos hídricos, há brechas/lacunas que dificultam a articulação da gestão das águas como território.

No contexto regional do Brasil, as Bacias PCJ estão inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê, localizada na Região Hidrográfica do Paraná (Comitês PCJ, 2020). A Figura 2 mostra a localização das Bacias Hidrográficas do Paraná, Tietê e PCJ.

**Figura 2** - Localização das Bacias Hidrográficas do Paraná, Tietê e PCJ



**Fonte:** Comitês PCJ (2020, p. 21).

A Agência das Bacias PCJ busca mobilizar a comunidade internacional rumo à adoção de valores básicos e aceitos em diversas áreas dos direitos humanos e ambientais, proporcionando maior visibilidade e eficiência nos próprios trabalhos da agência quanto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (BRASIL, 2019).

A seção 2.2 apresenta pontos de destaque sobre saneamento no Brasil.

## 2.2. Saneamento no Brasil

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) define saneamento básico em quatro dimensões: “conjunto de serviços públicos de abastecimento de água potável, de esgotamento sanitário, de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos e de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas” (ANA, 2024, s/p.)

Para Nedjar, Djebbar e Djemili (2023), os serviços de abastecimento de água devem providenciar água em quantidades suficientes, com boa qualidade e com um preço acessível para todos os cidadãos. No entanto, dos oito bilhões de pessoas que coexistem no planeta Terra, 26% não possuem acesso à água potável, ou seja, dois bilhões de pessoas e 46% da população não possuem serviços de saneamento seguros, correspondendo a 3,7 bilhões de pessoas (ONU, 2023).

Segundo a Index Mundi (2020), em 2020 o Brasil encontrava-se na 101ª posição do *ranking* de saneamento básico do mundo, enquanto a Etiópia estava na última posição, 195ª, todavia 16 países possuíam o nível de saneamento básico em 100%.

No Brasil, o acesso aos serviços de saneamento básico vem melhorando, porém, ainda possui deficiências e falhas em muitas regiões do país, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

Marcon e Wesz Júnior (2024) reiteram a importância do saneamento básico como componente para o desenvolvimento regional e local, rural e urbano, com qualidade de vida das pessoas e com garantia de inúmeros direitos fundamentais correlatos, por exemplo, o equilíbrio ambiental.

Fracalanza, Paz e Alvez (2023) ao investigarem os impactos sociais e econômicos relacionados aos serviços de abastecimento e saneamento de água, concluíram que, em geral, os municípios brasileiros enfrentam um *déficit* nesses serviços, especialmente na coleta e tratamento de esgoto, com maior gravidade nas áreas de urbanização precária. Os mesmos autores destacam que as populações socioeconomicamente excluídas são as mais afetadas pelos problemas resultantes da falta desses serviços.

De acordo com o Instituto Trata Brasil (ITB) (2024), somente 55,5% dos brasileiros possuem acesso à coleta de esgoto e 84,2% à água tratada e menos de 10% da população têm acesso à coleta de esgoto na Região Norte em três estados:

Pará, Rondônia e Amapá e nesta região os estados de Rondônia, Pará e Acre tratam menos de 10% do esgoto gerado.

No Brasil, em 15 de julho de 2020, foi aprovado o Novo Marco Legal do Saneamento por meio da Lei nº 14.026, que estabelece competências de instituição de normas de referência para regulação dos serviços de saneamento, cabendo à ANA o gerenciamento do saneamento no Brasil (Brasil, 2020).

Esse novo marco do saneamento visa alcançar as metas estabelecidas no ODS 6, com a garantia, equidade, disponibilidade e universalização do acesso à água como uma fonte segura.

Algumas cláusulas da Lei nº 14.026 tratam sobre as perdas em SAA:

“redução e controle das perdas de água, inclusive na distribuição de água tratada, estímulo à racionalização de seu consumo pelos usuários e fomento à eficiência energética, ao reuso de efluentes sanitários e ao aproveitamento de águas de chuva” (Brasil, 2020, s/p).

A captação dos recursos financeiros referentes às perdas de água para os municípios segue a Portaria 420/2021 do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) Art. 1:

“A alocação de recursos públicos federais e os financiamentos com recursos da União ou com recursos geridos ou operados por órgãos ou entidades da União ficam condicionados ao cumprimento de índice de perda de água na distribuição, nos termos desta Portaria” (Brasil, 2021, s/p).

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) possibilita obter informações sobre diversos indicadores, alguns deles referentes ao saneamento básico. Trata-se de uma importante ferramenta de gestão e monitoramento das políticas públicas do setor, permitindo análises comparativas entre municípios, estados e regiões ao longo do tempo.

No entanto, o SNIS apresenta limitações que comprometem, em parte, a confiabilidade dos dados disponibilizados. Entre as principais fragilidades, destaca-se o fato de os dados serem predominantemente autodeclaratórios, ou seja, fornecidos diretamente pelos prestadores de serviços de saneamento sem a obrigatoriedade de comprovação técnica ou documental sistemática.

Além disso, não há um mecanismo estruturado e permanente de auditoria ou verificação independente dos dados submetidos, o que pode resultar em inconsistências, subnotificações ou até mesmo distorções intencionais nos indicadores apresentados.

Com o intuito de aprimorar a qualidade das informações e promover maior transparência e credibilidade ao SNIS, foi desenvolvido o projeto Aprimoramento da Contabilidade Regulatoria do Saneamento (ACERTAR). Esta iniciativa visa padronizar os procedimentos de coleta, tratamento e verificação dos dados setoriais, por meio da implementação de protocolos técnicos e auditorias periódicas conduzidas por entidades reguladoras. O projeto ACERTAR representa um avanço na governança da informação no setor de saneamento, contribuindo para decisões mais embasadas e políticas públicas mais eficazes (Brasil, 2022).

O Quadro 1 retrata a eficiência das Bacias PCJ com referência ao ano de 2022, quanto a alguns indicadores do saneamento básico.

**Quadro 1 – Indicadores de saneamento básico nas Bacias PCJ, 2022**

Nome do indicador	Código do indicador	Conceito	Média (%)
Índice de Perdas no Faturamento	IN013_AE	Proporção de água produzida que não é contabilizada	22,51
Índice de Esgoto Tratado Referido à Água Consumida	IN046_AE	Avalia a eficácia do tratamento de esgoto em relação ao volume de água consumida	67,9
Índice de Perdas na Distribuição	IN049_AE	Reflete as ineficiências na infraestrutura	32,62
Índice de Perdas por Ligação	IN051-AE	Quantifica as perdas associadas a cada ponto de conexão	249,18 l./lig./dia
Índice de Atendimento Total de Água	IN055_AE	Indica a porcentagem da população com acesso ao abastecimento de água	81,86
Índice de Atendimento Total de Esgoto Referido aos Municípios Atendidos com Água	IN056_AE	Mede a cobertura do serviço de esgoto em relação aos municípios com abastecimento	76,58

Fonte: elaboração própria a partir de SNIS (2022b).

Nas Bacias PCJ, no ano de 2022, como é possível observar no Quadro 1, o Índice de Perdas no Faturamento foi de 22,51%, indicando a água produzida não contabilizada; o Índice de Perdas na Distribuição atingiu 32,62%, refletindo ineficiências no abastecimento de água; e as perdas por ligação chegaram a 249,18 litros/dia. Quanto aos serviços, o atendimento total de água foi de 81,86% da população e o de esgoto, em municípios com abastecimento, alcançou 76,58%. Já o tratamento de esgoto, frente ao consumo de água, teve eficiência média de 67,90% (SNIS, 2022a).

Esses indicadores são fundamentais para a avaliação da eficiência dos serviços e para a formulação de políticas públicas que visem à gestão sustentável dos recursos hídricos, permitindo identificar áreas que necessitam de melhorias e investimento.

Na próxima seção, discorre-se sobre as perdas em sistemas de distribuição de água.

### **2.3. Perdas de água em sistemas de abastecimento de água**

As perdas de água nos SAA podem ocorrer por diversos motivos, como vazamentos, erros de medição e consumos não autorizados. Essas falhas no abastecimento de água causam impactos negativos ao meio ambiente, aos custos de produção, à receita das empresas e, em última instância, aos usuários do recurso hídrico.

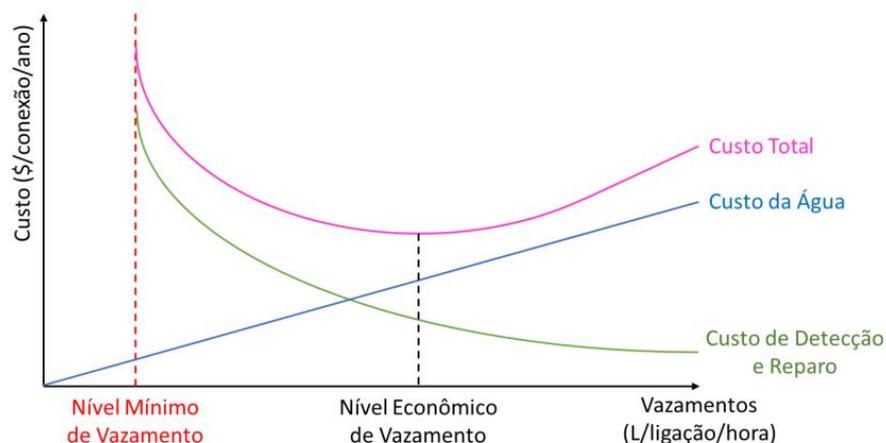
As principais causas de vazamentos em redes de abastecimento de água são: corrosão, idade, desgaste, fatores externos (umidade e temperatura), qualidade da tubulação ou instalação inadequada. A identificação e a agilidade nos reparos dos vazamentos são essenciais para reduzir danos e prevenir reparos dispendiosos (Atanane *et al.*, 2023).

As perdas em SDA são categorizadas pela diferença entre a quantidade de água produzida e aquela efetivamente medida nos pontos de consumo.

Para Farouk, Rahman e Romali (2023), a quantidade de água que é produzida e perdida antes de chegar ao consumidor final afeta sobremaneira a sustentabilidade da água. Essa discrepância pode acontecer em qualquer etapa do sistema de distribuição, desde a origem até a entrega ao consumidor final.

O nível de perdas de água é um índice crucial para aferir a eficiência dos prestadores de serviço em atividades como planejamento, abastecimento, investimento e manutenção das redes de distribuição de água (ITB, 2024).

A detecção e reparo precoce de vazamentos são cruciais para minimizar danos e evitar gastos onerosos. As perdas de água decorrentes dos vazamentos representam um problema mundial e a relação entre esses vazamentos e o custo para as respectivas mitigações pode ser visualizada na Figura 3.

**Figura 3 - Vazamentos versus Custos**

Fonte: ITB (2024, p. 7).

O custo da água a ser fornecido aos usuários depende do custo realizado na detecção e reparo dos vazamentos. O custo da água é menor quanto maiores forem os custos investidos na detecção e reparo dos vazamentos. À medida que esse investimento é reduzido, o custo da água aumenta. Observa-se, pela Figura 3, que o nível econômico de vazamento ocorre ao atingir o custo total (custo da água mais o custo de detecção e reparo dos vazamentos).

As perdas de água em sistemas de distribuição dividem-se em dois grupos distintos, as perdas físicas, denominadas de perdas reais, que ocorrem devido a transbordamentos, vazamentos na tubulação e vazamentos nos reservatórios; as perdas não físicas, denominadas de perdas aparentes, são decorrentes de falhas administrativas, irregularidades comerciais, fraudes, furtos de água e imprecisões nas medições (Kusterko *et al.*, 2018). O Quadro 2 apresenta os tipos de perdas em sistemas de distribuição de água, suas causas e magnitudes.

**Quadro 2 - Caracterização das perdas em sistemas de distribuição de água**

	Subsistemas	Causas	Magnitudes
<b>Perdas Reais (Físicas)</b>	Adução de Água Bruta	Vazamento nas tubulações	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
		Limpeza do poço de sucção*	
	Tratamento	Vazamentos estruturais	Significativa, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
		Lavagem de filtros*	
		Descarga de lodo*	
Reserva	Vazamentos estruturais		

	Adução de Água Tratada	Extravasamentos	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
		Limpeza*	
		Vazamentos nas tubulações	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Limpeza do poço de sucção*		
	Descargas		
	Distribuição	Vazamentos na rede	Significativa, em função do estado das tubulações e principalmente das pressões
Vazamentos em ramais			
Descargas			
<b>Perda Aparentes (Comerciais)</b>		Ligações clandestinas/irregulares	Podem ser significativas, dependendo de: i. procedimentos cadastrais e de faturamento; ii. manutenção preventiva; iii. adequação de hidrômetros; e iv. monitoramento do sistema.
		Ligações sem hidrômetros	
		Hidrômetros parados	
		Hidrômetros que subestimam o volume consumido	
		Ligações inativas reabertas	
		Erros de leitura	
		Número de economias errado	

**Fonte:** elaboração própria com base em ITB (2024).

**Nota:** \*Considera-se como perda hídrica apenas o volume excedente ao necessário para a operação.

A partir do Quadro 2 observa-se que as perdas reais podem ocorrer em todos os subsistemas, sendo que as magnitudes dessas perdas são variáveis significativas. Todavia, as perdas aparentes possuem diversas origens e uma magnitude significativa em função dos procedimentos cadastrais e de faturamento, manutenção preventiva, adequação de hidrômetros e monitoramento do sistema.

A metodologia frequentemente utilizada por empresas, prestadores de serviços e reguladores quanto à mensuração das perdas em sistemas de distribuição de água é a proposta pela *International Water Association* (IWA). Os procedimentos técnicos dessa metodologia envolvem uma matriz que esquematiza as etapas pelas quais a água passa, desde o momento que entra no sistema de abastecimento até chegar no consumidor final, denominada Balanço Hídrico (Quadro 3).

**Quadro 3 - Balanço Hídrico**

Água que entra no sistema (inclui água importada)	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (inclui água exportada)	Água faturada	
			Consumo faturado não medido (estimado)		
	Perdas de água	Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (uso próprio, caminhão pipa, entre outros)	Consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	Água não faturada
		Perdas aparentes (comerciais)	Consumo não faturado não medido		

			Erros de medição (macro e micromedição)	
		Perdas reais (físicas)	Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios (de adução e/ou distribuição) Vazamentos nas adutoras e/ou redes (de distribuição) Vazamentos nos ramais até o ponto de medição do cliente	

**Fonte:** elaboração própria com base no Ministério das Cidades (2023).

O Balanço Hídrico apresentado no Quadro 3 tem como ponto de partida o volume de água produzido que adentra o sistema de distribuição incluindo a água tratada. O consumo autorizado é referente à água fornecida aos clientes autorizados (medidos ou não), porém, o consumo não autorizado corresponde à diferença entre o volume de entrada e o consumo autorizado. Todavia, o consumo autorizado pode ser catalogado como faturado ou não faturado, que se subdivide nas seguintes categorias (ITB, 2024):

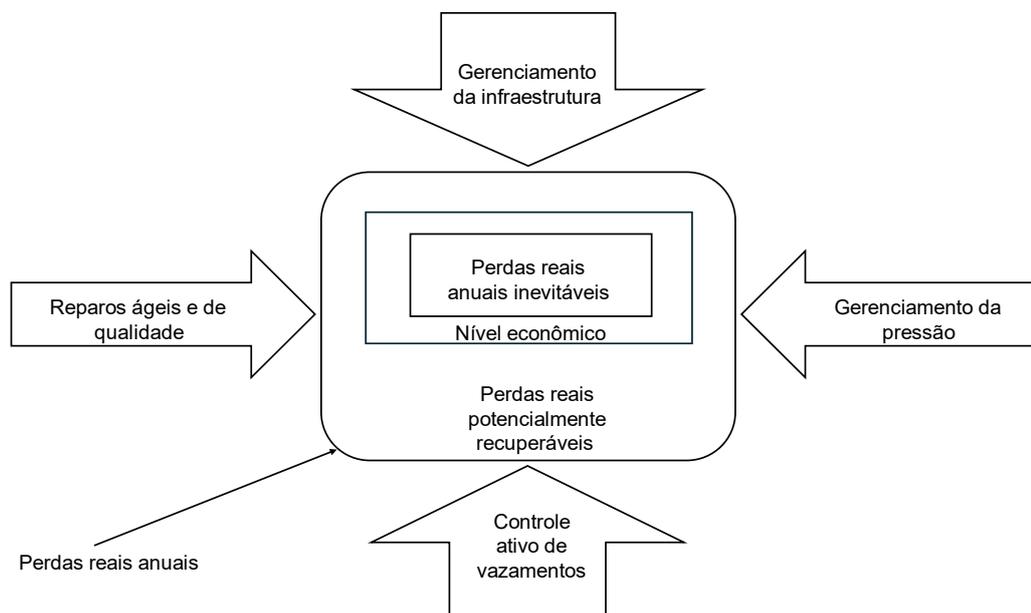
1. Consumo autorizado faturado: a) consumo faturado medido representa o volume de água registrado nos hidrômetros e o volume de água exportado; b) consumo faturado não medido ou estimado, corresponde ao volume contabilizado utilizando os consumos médios históricos ou, nos casos em que não existe hidrômetro ou há falhas no seu funcionamento, o volume mínimo de faturamento.
2. Consumo autorizado não faturado: a) consumo não faturado medido é o volume de água utilizado por empresa nas atividades operacionais especiais; b) consumo não faturado não medido, refere-se ao volume destinado a usos de caráter social, atividades do corpo de bombeiros, sem incluir as perdas geradas em áreas irregulares.

As informações do balanço hídrico possibilitam propor estratégias para incrementar o desempenho dos SAA, incluindo ações para a redução e controle de perdas, sejam reais ou aparentes (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2020).

A fim de melhorar as condições técnicas das redes de abastecimento de água, as operadoras de água devem estabelecer sistemas para avaliar e controlar as perdas de água, realizar mudanças organizacionais, desenvolver e implementar iniciativas de modernização (Mvongo *et al.*, 2024).

A Figura 4 apresenta procedimentos para redução das perdas reais nos SAA.

**Figura 4 - Procedimentos para controle de perdas reais**

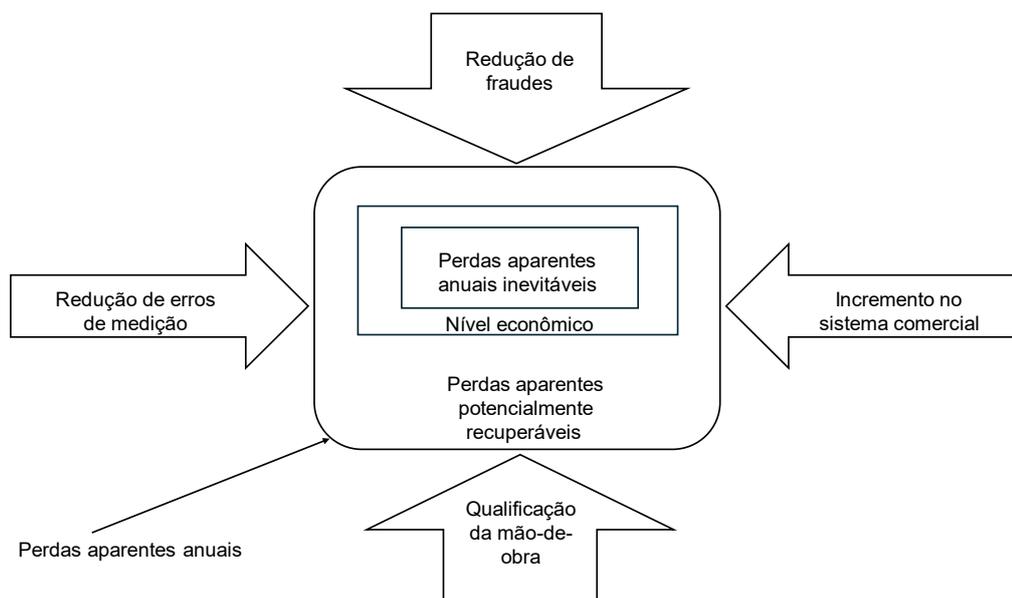


**Fonte:** elaboração própria a partir de Thornton, Sthurm e Kunkel (2008).

A partir da Figura 4, observa-se que, embora as perdas reais sejam inevitáveis, é possível recuperá-las por meio do gerenciamento da infraestrutura, reparos ágeis e de qualidade, controle ativo de vazamentos e gerenciamento da pressão da rede de abastecimento. As perdas em sistemas de distribuição podem ser originadas pelo excesso de pressão (Freitas *et al.*, 2022). Desse modo, Araujo, Ramos e Coelho (2006) e Fontana, Giugni e Portolano (2012) sugerem a minimização da pressão no sistema de distribuição de água após a seleção das válvulas. Todavia, a diminuição da pressão dificulta a detecção dos vazamentos no sistema de distribuição de água (Al-Washali *et al.*, 2019).

Clark, Stafford e Goodrich (1982) propuseram uma análise abrangente sobre os desafios confrontados na substituição e manutenção de SAA, avaliando os impactos da qualidade da água nos custos do sistema. Os autores destacaram a importância de estabelecer programas eficazes para garantir a confiabilidade e minimizar custos, valendo-se de modelos estatísticos e análises para investigar a relação entre o crescimento populacional e a infraestrutura, concluindo que um planejamento cuidadoso é crucial para garantir a eficiência econômica e a confiabilidade do sistema de distribuição de água. A Figura 5 exibe procedimentos para redução das perdas aparentes em SAA.

**Figura 5 - Procedimentos para controle de perdas aparentes**



**Fonte:** elaboração própria a partir de Thornton, Sthurm e Kunkel (2008).

A Figura 5 mostra que as perdas aparentes anuais são passíveis de redução até um nível econômico. Para alcançar o nível econômico é necessário implementar procedimentos como redução de fraudes, redução de erros de medição, qualificação da mão-de-obra e incremento no sistema comercial.

A próxima seção trata das perdas de água em SDA no mundo e no Brasil

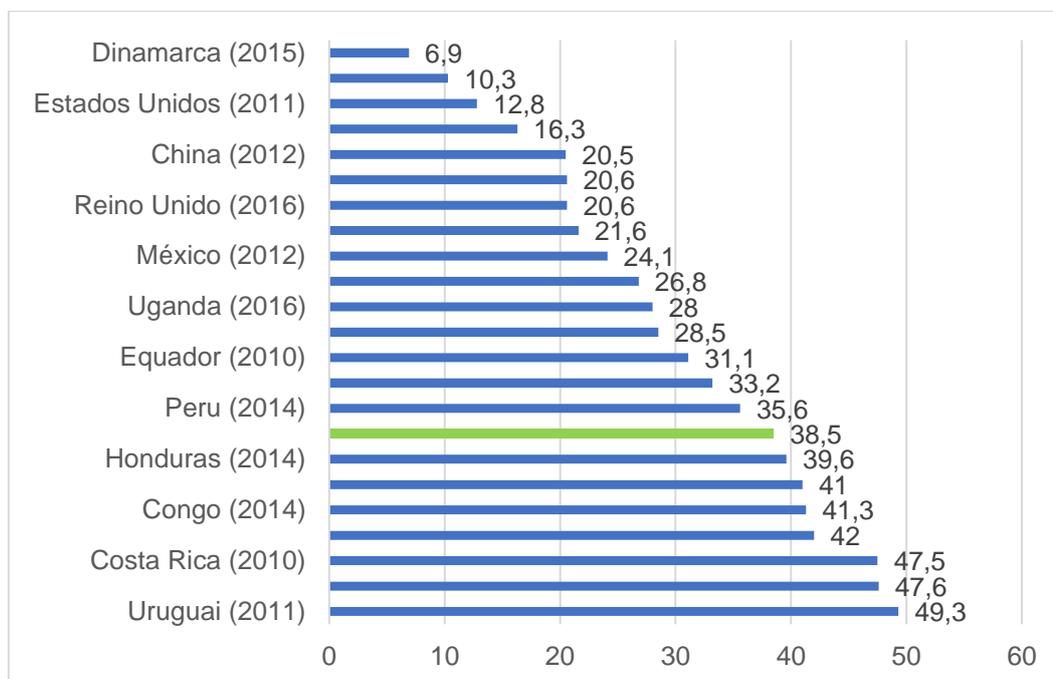
### **2.3.1. Perdas de água em sistemas de abastecimento de água no Mundo e no Brasil**

O sistema de distribuição de água no mundo é em geral ineficiente, com estimativas de que entre 30% e 40% da água produzida perde-se na rede de distribuição. Essas perdas são atribuídas a tubulações antiquadas, vazamentos e diversas outras causas (Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2020).

De acordo com Sobrinho e Borja (2016), a perda de água na distribuição é considerada como um dos principais indicadores de ineficiência operacional dos prestadores de serviço público no abastecimento de água. As perdas ocorrem em todo o sistema de abastecimento de água, desde a captação até a distribuição (Formiga-Johnsson, 2020).

O ITB (2022) aponta que o Brasil ocupa uma posição ruim no *ranking* internacional de países, no quesito percentual anual de perdas de água, sendo que, em 2016, o Brasil desperdiçou 38,5% da água potável (Figura 6).

**Figura 6 - Ranking dos países em relação às perdas de água (em porcentagem)**



**Fonte:** elaboração própria a partir de ITB (2022).

Ao observar a Figura 6, os cinco países com menor percentual de perdas de água em sistemas de distribuição são: Dinamarca (6,9%), Austrália (10,3%), Estados Unidos (12,8%), Coreia do Sul (16,3%) e China (20,5%). Os cinco piores são: Congo (41,3%), Argentina (42%), Costa Rica (47,5%), Colômbia (47,6%) e Uruguai (49,3%).

Essas investigações ajudam a compreender como o combate às perdas de água tem sido implementado em países em desenvolvimento, fornecendo apoio a nações similares na definição de quais práticas podem ser adotadas para obter resultados eficazes no controle das perdas de água (Santi; Cetrulo; Malheiros, 2021).

Gularte (2005) postula que as perdas de água que ocorrem no Brasil, em sua maioria são as perdas aparentes, o que representa 50% do total de perdas, sendo a submedição no parque de hidrômetros considerada a maior parcela. A Tabela 2 destaca os valores do Índice de Perdas na Distribuição (IN049\_AE) por Unidade de Federação do Brasil.

**Tabela 2 - IN049\_AE por Unidade de Federação do Brasil (período 2021-2022)**

Macrorregião	Estados	Índices de perdas na distribuição de água (IN049_AE) (%)		
		2021	2022	Varição absoluta
Norte	Acre	74,4	66,6	-7,8
	Amapá	74,8	71,1	-3,7
	Amazonas	53	50,9	-2,1
	Pará	37,4	34,6	-2,8
	Rondônia	61,4	59,8	-1,6
	Roraima	64	59,4	-4,6
	Tocantins	35,5	34,6	-0,9
	Alagoas	46,9	39,7	-7,2
Nordeste	Bahia	39,7	42,5	2,8
	Ceará	45,2	44,4	-0,8
	Maranhão	59,2	57	-2,2
	Paraíba	35,4	37	1,6
	Pernambuco	46	48,5	2,5
	Piauí	45,3	47,5	2,2
	Rio Grande do Norte	52,2	49,3	-2,9
	Sergipe	48,4	57,6	9,2
Sudeste	Espírito Santo	38,8	37,6	-1,2
	Minas Gerais	37,5	36,8	-0,7
	Rio de Janeiro	45	32	-13
Sul	São Paulo	34,5	34,1	-0,4
	Paraná	33,8	35,1	1,3
	Rio Grande do Sul	41,6	39,5	-2,1
Centro-Oeste	Santa Catarina	34,1	34,7	0,6
	Distrito Federal	35,1	33,8	-1,3
	Goiás	28,5	28,3	-0,2
	Mato Grosso	48,4	45,4	-3
	Mato Grosso do Sul	33,4	33,2	-0,2

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2023).

A partir da Tabela 2, os cinco estados que obtiveram as maiores reduções absolutas do IN049\_AE no ano de 2022 em relação a 2021, foram Rio de Janeiro (-13), Acre (-7,8), Alagoas (-7,2), Roraima (-4,6) e Amapá (-3,7). Os estados da Paraíba (1,6), Piauí (2,2), Pernambuco (2,5), Bahia (2,8) e Sergipe (9,2) apresentaram aumento em sua variação absoluta no ano de 2022 em relação a 2021.

Goiás (28,3%), Rio de Janeiro (32%), Mato Grosso do Sul (33,2%), Distrito Federal (33,8%) e São Paulo (34,1%) foram os estados que, no ano de 2022, tiveram menores valores para o IN049\_AE. Todavia, no mesmo ano, Sergipe (57,6%), Roraima (59,4%), Rondônia (59,8%), Acre (66,6%) e Amapá (71,1%) obtiveram os piores valores para o IN049\_AE.

Os valores médios do IN049\_AE por macrorregião são: região Norte (53,86%), Nordeste (47,06%), Sul (36,43%), Centro-Oeste (35,18%) e Sudeste (35,13).

O cenário das perdas de água no Brasil vem se mostrando insatisfatório e preocupante, pois um grande percentual de água produzida é perdido ou não contabilizado monetariamente, seja por perdas reais ou aparentes.

Esse fato não só demonstra a ineficiência operacional das redes de abastecimento de água brasileiras, como oneram as operadoras e os clientes, além do mais, a perda de água gera estresse nos mananciais e aumento na captação da água.

Na próxima seção, disserta-se sobre a situação das perdas de água nos sistemas de distribuição dos municípios inseridos nas Bacias PCJ.

### 2.3.2. Perdas de água nas Bacias PCJ

Na gestão dos recursos hídricos, tem-se como um dos desafios comuns de cada município, a perda de água no SAA. Um elevado índice de perdas de água impacta diretamente na sustentabilidade dos rios e na eficiência dos serviços de abastecimento dessa localidade.

Um fator que pode influenciar nos níveis de perdas em sistemas de distribuição das cidades é o porte populacional do município. A Tabela 3 apresenta o número de municípios das Bacias PCJ por porte populacional e a média do Índice de Perdas na Distribuição (IN049\_AE).

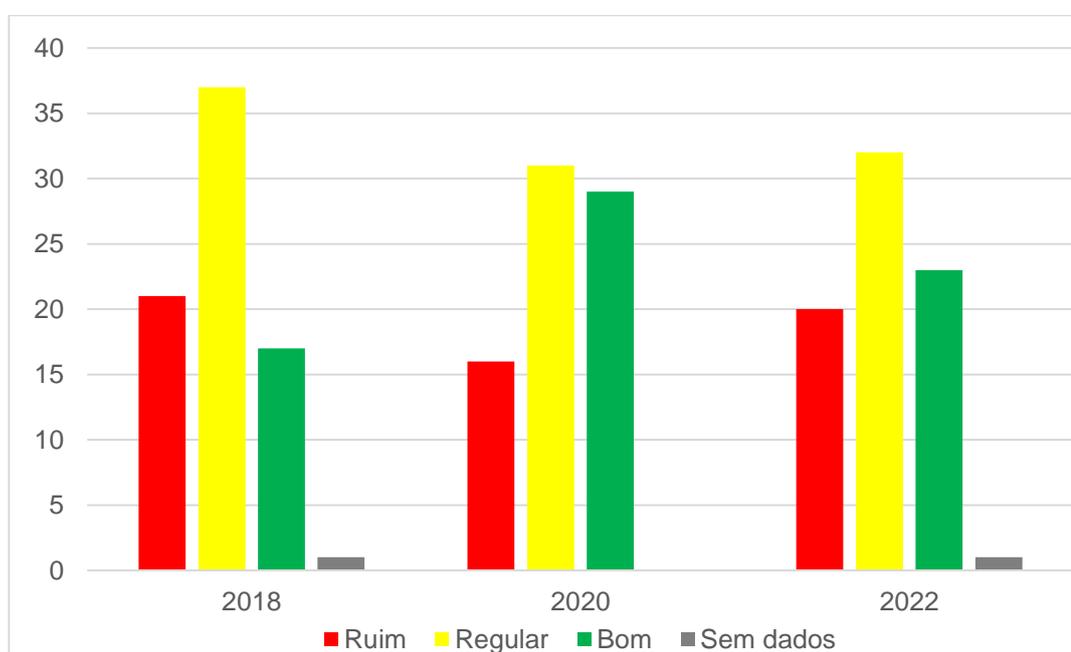
**Tabela 3 - Municípios das Bacias PCJ e o valor médio de IN049\_AE**

Porte	Número de municípios	IN049_AE (Média) (%)
Pequeno 1 (até 20mil hab.)	26	27,82
Pequeno 2 (20.001 - 50 mil hab.)	17	36,88
Médio (50.001 - 100 mil hab.)	14	36,55
Grande (100.001 - 900 mil hab.)	18	36,67
Metrópole (>900.000)	1	20,19

**Fonte:** elaboração própria a partir de IBGE (2022) e SNIS (2022a).

Ao observar a Tabela 3, 34% dos municípios das Bacias PCJ são classificados como Pequeno 1 e possuem índice médio de perdas na distribuição de 27,82%; 22% dos municípios são classificados como Pequeno 2 e possuem 36,88%; 18% classificados como Médio, possuem 36,55%; 24% classificados como Grande, possuem 36,67% e apenas uma cidade classificada como MetrÓpole tem a média de 20,19% para IN049\_AE. O comportamento do IN049\_AE em uma série temporal de 2018 a 2022 nas Bacias PCJ é apresentado na Figura 7.

**Figura 7 - IN049\_AE das Bacias PCJ (período 2018 a 2022)**



**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

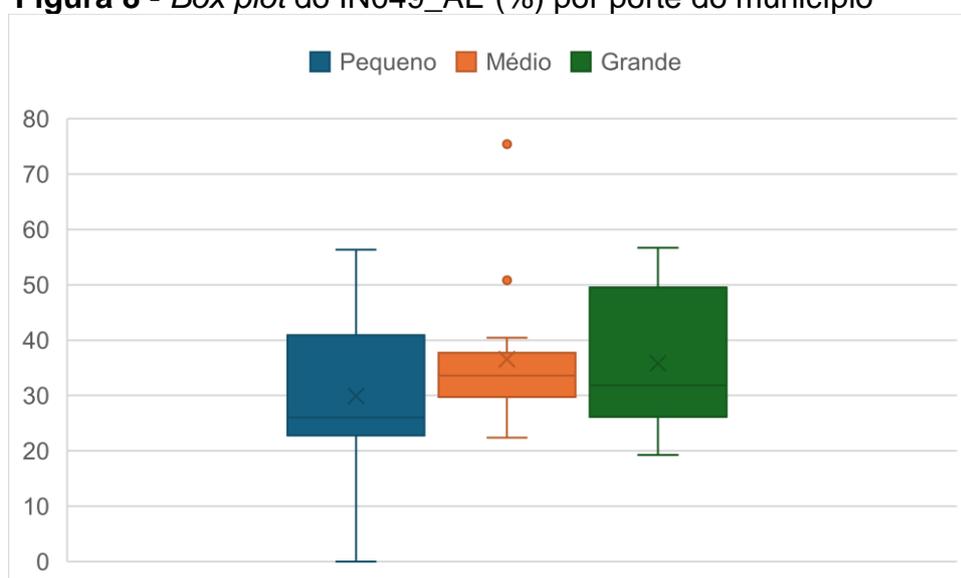
Em 2018, os dados do SNIS sobre o IN049\_AE apontavam que, dos 76 municípios que compõe as Bacias PCJ, apenas 17 cidades tinham valor de referência abaixo de 25% (Bom), 37 municípios entre 25% e 40% (Regular), 21 cidades com o IN049\_AE acima de 40% (Ruim) e o município de Analândia não apresentou dados para o ano de 2018.

Ao observar o mesmo indicador nas Bacias PCJ para o ano de 2020, houve uma melhora na faixa classificada como Bom, pois, 29 municípios estavam nessa faixa, um aumento de 12 municípios quando comparado a 2018; 31 municípios estavam na faixa Regular e 29 municípios estavam na faixa Ruim.

Em 2022, houve uma singela mudança nas faixas relacionadas ao Índice de Perdas na Distribuição, 20 municípios possuíam Índice de Perdas na Distribuição superiores a 40% (Ruim), 32 cidades tinham o IN049\_AE entre 25% e 40% (Regular), apenas 23 municípios possuíam IN049\_AE abaixo de 25%, seis municípios a menos do que em 2020 e o município de Rio das Pedras não apresentou dados.

A Figura 8 apresenta o *box plot* do Índice de Perdas na Distribuição (IN049\_AE) por porte populacional dos municípios das Bacias PCJ. Ressalta-se a ausência de dados para a cidade Rio das Pedras e, portanto, o valor para o indicador foi considerado zero.

**Figura 8 - Box plot do IN049\_AE (%) por porte do município**



**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

**Nota:** Pequeno é o agrupamento de Pequeno 1 com Pequeno 2 definidos na Tabela 3 e Grande é o agrupamento de Grande com Metrópole definidos na Tabela 3.

Observa-se, a partir da Figura 8, que para o de Pequeno Porte o valor mínimo do indicador IN049\_AE é 0% (referente ao município Rio das Pedras, pois não apresentou dados) e o valor máximo   56,36%; já para o de Médio Porte o menor valor   22,37% e o maior é 40,45%; no de Grande Porte o menor valor   19,25% e o maior valor é 56,71%. O de Médio Porte apresenta uma distribui o simétrica, porém cont m dois outliers, Mogi Mirim (50,82%) e Capivari (75,39%).

O Quadro 4 apresenta as definições das diferentes naturezas jurídicas existentes. Essas categorias são essenciais para compreender a estrutura legal e administrativa das operadoras.

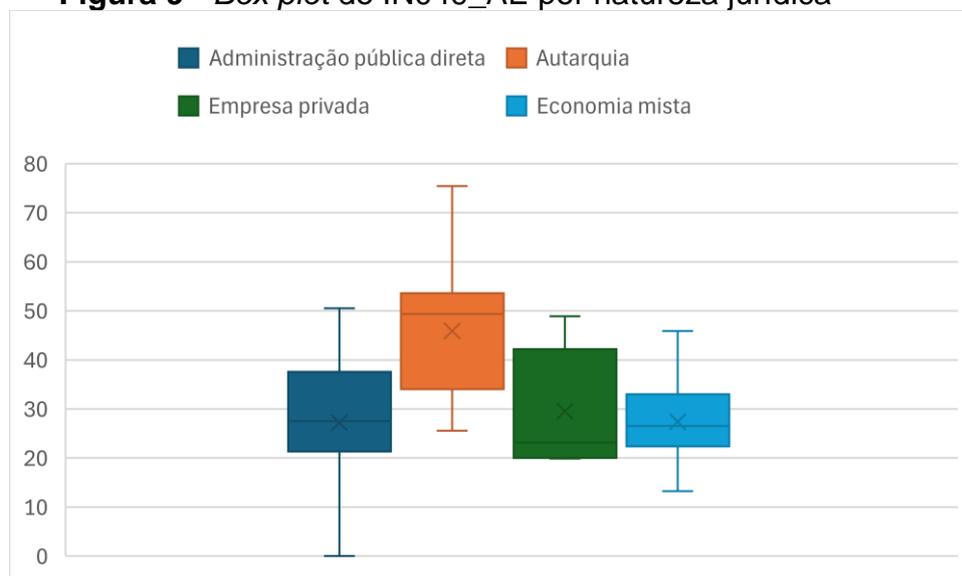
**Quadro 4 – Definição das naturezas jurídicas**

Administração Pública Direta	A atuação do Estado é direta, sem a formação de entidades autônomas. A gestão é realizada por uma secretaria municipal.
Autarquia	Entidade autônoma, estabelecida por meio de lei específica, para realizar atividades típicas da administração pública. Geralmente são chamadas de Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE).
Economia Mista	Entidade formada e gerida por particulares, com o objetivo de obter lucro. Existe um contrato que regula o serviço prestado.
Empresa Privada	Seu capital social envolve a participação do setor privado e público, combinando interesses de ambos na gestão dos serviços de saneamento.

**Fonte:** elaboração própria a partir de Araújo e Zveibil (2009).

Das 76 cidades das Bacias PCJ, 14 são administradas pela Administração Pública Direta (18,42%), 21 são Autarquias (27,63%), cinco são empresas privadas (6,57%) e 36 são geridas na forma de Economia Mista (47,38%). Figura 9 mostra o *box plot* do IN049\_AE por natureza jurídica das operadoras dos municípios das Bacias PCJ.

**Figura 9 - Box plot do IN049\_AE por natureza jurídica**



**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

Observa-se a partir da Figura 9 que para o Administração Pública Direta o valor mínimo do Indicador IN049\_AE é 0% (referente ao município Rio das Pedras, pois não apresentou dados) e o valor máximo é 50,55%; já para Autarquia o menor valor é 25,55% e o maior é 75,39%; na Empresa Privada o menor valor é 20,03% e o maior valor é 48,89%; para Economia Mista o menor valor é 13,23% e o maior valor é 45,87%. Ao observar o índice de perdas de distribuição por natureza jurídica, a Administração Pública Direta e a Autarquia apresentam maiores variações em seus dados. A Empresa Privada possui poucas variações, enquanto a Economia Mista apresentou uma distribuição mais simétrica.

As Tabelas 4 a 8 destacam o comportamento do IN049\_AE por natureza jurídica no período 2018 a 2022, em ordem crescente orientada pela coluna Variação absoluta. Esta variação é calculada pela diferença entre os valores do IN049\_AE para os anos de 2022 e 2018.

**Tabela 4 - IN049\_AE por natureza jurídica Administração Pública Direta (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)	2021 (%)	2022 (%)	Variação absoluta	%
Iracemópolis	53,49	13,04	9,87	1,29	1,29	-52,2	-98
Santa Maria da Serra	30,31	21,6	16,43	24,91	16,41	-13,9	-46
Ipeúna	34,58	36,47	38,64	32,28	24,02	-10,56	-31
Louveira	40,53	32,87	35,73	33,83	31,47	-9,06	-22
Santo Antônio de Posse	48,03	57,03	50,52	66,88	43,33	-4,7	-10
Jaguariúna	37,72	40,63	36,84	36,92	36,78	-0,94	-2
Analândia	50,55	50,55	50,55	50,55	50,55	0	0
Corumbataí	16,67	16,67	30	21,29	23	6,33	38
Monte Alegre do Sul	16,67	16,57	16,06	16,06	24,1	7,43	45
Bom Jesus dos Perdões	24,31	21,19	16,72	35,4	39,76	15,45	64
Rafard	9,97	10	2,65	2,31	24,65	14,68	147
Cosmópolis	4,84	13,98	13,46	35,18	35,18	30,34	627
Itirapina	3,85	34,27	30,04	35,82	30,4	26,55	690

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

**Nota:** O valor de IN049\_AE do município de Analândia do ano 2018 foi obtido pela média dos anos de 2019 a 2022, tendo em vista a ausência da informação.

Dos 13 municípios da Tabela 4, seis descaíram o valor do IN049 em cinco anos, ou seja, 46,15 %. Por outro lado, sete municípios mantiveram-se em estabilidade ou tiveram crescimento nesse índice, equivalendo a 53,85 %.

Os municípios Itirapina (690%), Cosmópolis (627%) e Rafard (147%) em cinco anos obtiveram crescimento do seu IN049\_AE, enquanto Iracemópolis (-98%), Santa Maria da Serra (-46%) e Ipeúna (-31%) tiveram queda no IN049\_AE.

**Tabela 5 - IN049\_AE por natureza jurídica Autarquia (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)	2021 (%)	2022 (%)	Variação absoluta	%
Rio das Pedras	60,31	53,82	53,82	11,69	44,91	-15,4	-26
Brotas	39,93	35,7	24,67	27,17	25,55	-14,38	-36
Amparo	54,49	45,57	45,37	43,99	40,45	-14,04	-26
Pedreira	56,98	52,22	52,83	51,18	51,41	-5,57	-10
Salto	42,19	42	38,13	36,64	37,19	-5	-12
Vinhedo	33,19	33,63	30,88	29,13	28,59	-4,6	-14
Santa Bárbara D Oeste	58,68	57,69	56,04	54,36	54,14	-4,54	-8
Indaiatuba	31,56	30,21	29,78	29,76	29,76	-1,8	-6
Artur Nogueira	30,04	33,76	30,46	31,31	30,11	0,07	0
Dois Córregos	52,49	41,05	45,28	52,11	52,63	0,14	0
Mogi Mirim	50,6	47,29	43,47	48,68	50,82	0,22	0
São Pedro	47,86	50,79	45,11	47,23	49,37	1,51	3
Piracicaba	49,64	56,76	56,83	54,56	53,93	4,29	9
Americana	48,81	48,01	48,13	50,24	53,31	4,5	9
Atibaia	44,23	46,74	45,2	17,18	49,5	5,27	12
Itu	51,36	50,83	54,37	60,16	56,71	5,35	10
Valinhos	35,05	35,68	36,35	39,39	44,24	9,19	26
Engenheiro Coelho	37,93	40,36	45,71	44,7	48,53	10,6	28
Rio Claro	15,2	32,36	24,89	26,03	30,84	15,64	103
Tietê	40,34	45,57	53,01	53,34	56,36	16,02	40
Cordeirópolis	19,8	15,92	15,27	25,08	45,42	25,62	129
Capivari	18,52	18,98	19,04	19,04	75,39	56,87	307

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

**Nota:** O valor de IN049\_AE do município de Rio das Pedras do ano 2022 foi obtido pela média dos anos de 2018 a 2021, tendo em vista a ausência da informação.

Para a natureza jurídica Autarquia, 36,36% dos municípios obtiveram decaimento em no IN049\_AE, oito cidades das 22. Todavia, 63,64% dos municípios mantiveram-se em estabilidade ou apresentaram crescimento nesse índice em cinco anos.

As cidades Brotas (-36%), Amparo (-26%) e Rio das Pedras (-26%), foram as que tiveram um maior caimento do IN049\_AE. Enquanto, Capivari (307%),

Cordeirópolis (129%) e Rio Claro (103%), foram os municípios com maior crescimento desse índice.

**Tabela 6 - IN049\_AE por natureza jurídica Empresa Privada (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)	2021 (%)	2022 (%)	Variação absoluta	%
Holambra	25,4	23,19	22,66	23,59	19,87	-5,53	-22
Tuiuti	57,17	57,4	20,63	25,85	48,89	-8,28	-14
Sumaré	41,18	43,01	37,43	36,28	35,45	-5,73	-14
Santa Gertrudes	26,67	22,46	29,29	25,7	23,16	-3,51	-13
Limeira	19,78	12,25	18,88	20,2	20,19	0,41	2

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

Quando observado o comportamento do IN049\_AE pela natureza jurídica Empresa Privada em uma série histórica de cinco anos, 80% dos municípios tiveram redução do seu Índice de Perdas na Distribuição, quatro de cinco. Apenas uma cidade teve crescimento desse índice, Limeira (2%).

**Tabela 7 - IN049\_AE por natureza jurídica empresa Economia Mista (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)	2021 (%)	2022 (%)	Variação absoluta	%
Águas de São Pedro	40,51	29,93	25,48	30,38	18,95	-21,56	-53
Anhembi	45,51	33,81	29,12	30,92	26,93	-18,58	-41
Sapucaí-Mirim	29,55	22,15	18,45	16,66	17,94	-11,61	-39
Paulínia	33,5	25,35	24,21	25,73	22,4	-11,1	-33
Pinhalzinho	28,78	26,25	20,04	23,34	19,34	-9,44	-33
Morungaba	33,19	36,43	29,03	31,21	22,93	-10,26	-31
Campo Limpo Paulista	46,07	40,13	36,57	33,38	33,04	-13,03	-28
Bragança Paulista	26,53	23,9	18,55	17,81	19,25	-7,28	-27
Jarinu	34,96	31,71	23,29	28,11	26,05	-8,91	-25
Mombuca	17,07	19,32	22,91	22,79	13,23	-3,84	-22
Várzea Paulista	38,67	35,47	32,9	33,52	30,74	-7,93	-21
Itupeva	27,39	29,9	25,86	23,67	22,37	-5,02	-18
Cabreúva	33,49	34,82	25,41	29,2	28,21	-5,28	-16
Hortolândia	30,73	35,19	28,68	32,43	26,17	-4,56	-15
Monte Mor	29,11	28,24	26,48	26	25,02	-4,09	-14
Elias Fausto	22,26	19,37	20,39	22,53	19,93	-2,33	-10
Botucatu	36,5	36,36	36,02	37,45	33,01	-3,49	-10
Nazaré Paulista	30,81	25,06	21,89	22,71	28,2	-2,61	-8
Serra Negra	24,49	26,02	23,85	27,54	22,79	-1,7	-7
Vargem	25,3	23,14	21,85	18,31	23,56	-1,74	-7
Extrema	35,77	41,14	38,79	33,98	33,78	-1,99	-6

Jundiaí	33,48	34,05	35,21	33,32	31,87	-1,61	-5
Socorro	29,08	26,96	23,96	23,58	27,73	-1,35	-5
Campinas	20,79	20,7	21,5	20,57	20,19	-0,6	-3
Itatiba	32,18	39,82	30,88	33,66	31,51	-0,67	-2
Piracaia	33,55	30,21	27,1	26,87	32,92	-0,63	-2
Itapeva	30,95	21,49	24,32	27,35	30,66	-0,29	-1
Mairiporã	35,32	36,4	28,87	28,44	35,29	-0,03	0
Camanducaia	35,23	34,08	32,35	34,5	37,19	1,96	6
Charqueada	38,2	38,16	36,9	39,79	40,91	2,71	7
Saltinho	21,64	19,49	22,6	22,32	23,91	2,27	10
Joanópolis	17,08	14,82	23,36	22,71	19,61	2,53	15
Toledo	29,05	32,14	38,03	38,25	35,76	6,71	23
Nova Odessa	26,11	31,08	36,37	38,25	33,41	7,3	28
Torrinha	34,78	37,39	40,04	39,57	45,87	11,09	32
Pedra Bela	9,57	15,27	18,7	21,67	25,33	15,76	165

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

A natureza jurídica de Economia Mista compõe a maior tipologia com 36 municípios no total, 75 % das cidades dessa natureza jurídica obtiveram uma redução no IN049\_AE. Enquanto, 25 % desses municípios mantiveram-se em estabilidade ou apresentaram algum crescimento nesse índice.

O município Pedra Bela (165%), Torrinha (32%) e Nova Odessa (28%) tiveram os maiores crescimentos nesse índice em cinco anos. Por outro lado, Águas de São Pedro (-53%), Anhembi (-41%) e Sapucaí-Mirim (-39%), foram as cidades com maiores reduções do IN049\_AE na série histórica.

A Tabela 8 apresenta o comportamento do Índice de Perdas na Distribuição (IN049\_AE), no período de 2018 a 2022, dos 41 municípios estudados por Santi (2018), aqueles que responderam ao questionário informando quais práticas de controle e redução de perdas eram adotadas pelas operadoras de água.

**Tabela 8 - Índice de Perdas na Distribuição das 41 cidades estudadas por Santi (2018), período de 2018 a 2022**

Cidades	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)	2021 (%)	2022 (%)	Variação Absoluta	%
Águas de São Pedro	40,51	29,93	25,48	30,38	18,95	-21,56	-53
Santa Maria da Serra	30,31	21,6	16,43	24,91	16,41	-13,9	-46
Campo Limpo Paulista	46,07	40,13	36,57	33,38	33,04	-13,03	-28
Paulínia	33,5	25,35	24,21	25,73	22,4	-11,1	-33
Morungaba	33,19	36,43	29,03	31,21	22,93	-10,26	-31
Pinhalzinho	28,78	26,25	20,04	23,34	19,34	-9,44	-33

Louveira	40,53	32,87	35,73	33,83	31,47	-9,06	-22
Jarinu	34,96	31,71	23,29	28,11	26,05	-8,91	-25
Várzea Paulista	38,67	35,47	32,9	33,52	30,74	-7,93	-21
Bragança Paulista	26,53	23,9	18,55	17,81	19,25	-7,28	-27
Sumaré	41,18	43,01	37,43	36,28	35,45	-5,73	-14
Cabreúva	33,49	34,82	25,41	29,2	28,21	-5,28	-16
Itupeva	27,39	29,9	25,86	23,67	22,37	-5,02	-18
Salto	42,19	42	38,13	36,64	37,19	-5	-12
Vinhedo	33,19	33,63	30,88	29,13	28,59	-4,6	-14
Hortolândia	30,73	35,19	28,68	32,43	26,17	-4,56	-15
Monte Mor	29,11	28,24	26,48	26	25,02	-4,09	-14
Mombuca	17,07	19,32	22,91	22,79	13,23	-3,84	-22
Santa Gertrudes	26,67	22,46	29,29	25,7	23,16	-3,51	-13
Nazaré Paulista	30,81	25,06	21,89	22,71	28,2	-2,61	-8
Elias Fausto	22,26	19,37	20,39	22,53	19,93	-2,33	-10
Indaiatuba	31,56	30,21	29,78	29,76	29,76	-1,8	-6
Vargem	25,3	23,14	21,85	18,31	23,56	-1,74	-7
Jundiaí	33,48	34,05	35,21	33,32	31,87	-1,61	-5
Socorro	29,08	26,96	23,96	23,58	27,73	-1,35	-5
Itatiba	32,18	39,82	30,88	33,66	31,51	-0,67	-2
Piracaia	33,55	30,21	27,1	26,87	32,92	-0,63	-2
Campinas	20,79	20,7	21,5	20,57	20,19	-0,6	-3
Mairiporã	35,32	36,4	28,87	28,44	35,29	-0,03	0
Limeira	19,78	12,25	18,88	20,2	20,19	0,41	2
São Pedro	47,86	50,79	45,11	47,23	49,37	1,51	3
Joanópolis	17,08	14,82	23,36	22,71	19,61	2,53	15
Charqueada	38,2	38,16	36,9	39,79	40,91	2,71	7
Piracicaba	49,64	56,76	56,83	54,56	53,93	4,29	9
Americana	48,81	48,01	48,13	50,24	53,31	4,5	9
Atibaia	44,23	46,74	45,2	17,18	49,5	5,27	12
Nova Odessa	26,11	31,08	36,37	38,25	33,41	7,3	28
Valinhos	35,05	35,68	36,35	39,39	44,24	9,19	26
Pedra Bela	9,57	15,27	18,7	21,67	25,33	15,76	165
Cordeirópolis	19,8	15,92	15,27	25,08	45,42	25,62	129
Cosmópolis	4,84	13,98	13,46	35,18	35,18	30,34	627

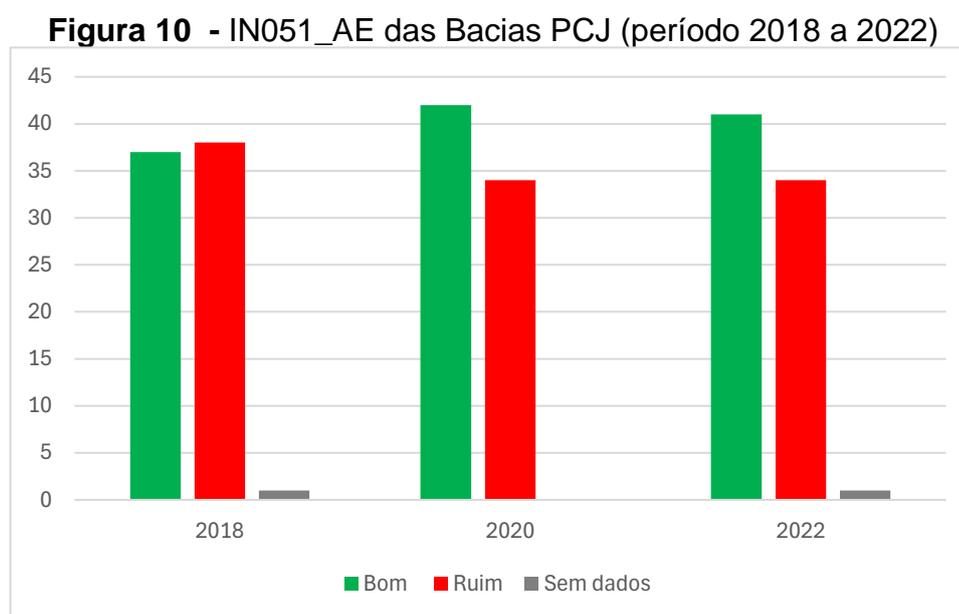
**Fonte:** elaboração própria a partir de Santi (2018) e (SNIS, 2022a).

Observa-se pela Tabela 8 que os municípios Cosmópolis (627%), Pedra Bela (165%) e Cordeirópolis (129%), obtiveram um crescimento de mais de 100% no

IN049\_AE no período de cinco anos. As cidades que mais diminuíram esse índice foram, Águas de São Pedro (-53%), Santa Maria da Serra (-46%) e Paulínia (-33%).

Dos 41 municípios, 29 em cinco anos conseguiram diminuir seu índice de perdas, devido à adoção de práticas de controle e redução de perdas em SAA. (Santi, 2018). Por outro lado, 12 cidades das 41, tiveram crescimento no IN049\_AE.

A Figura 10 mostra o Índice de perdas por ligação (IN051\_AE) das Bacias PCJ no período 2018 a 2022.



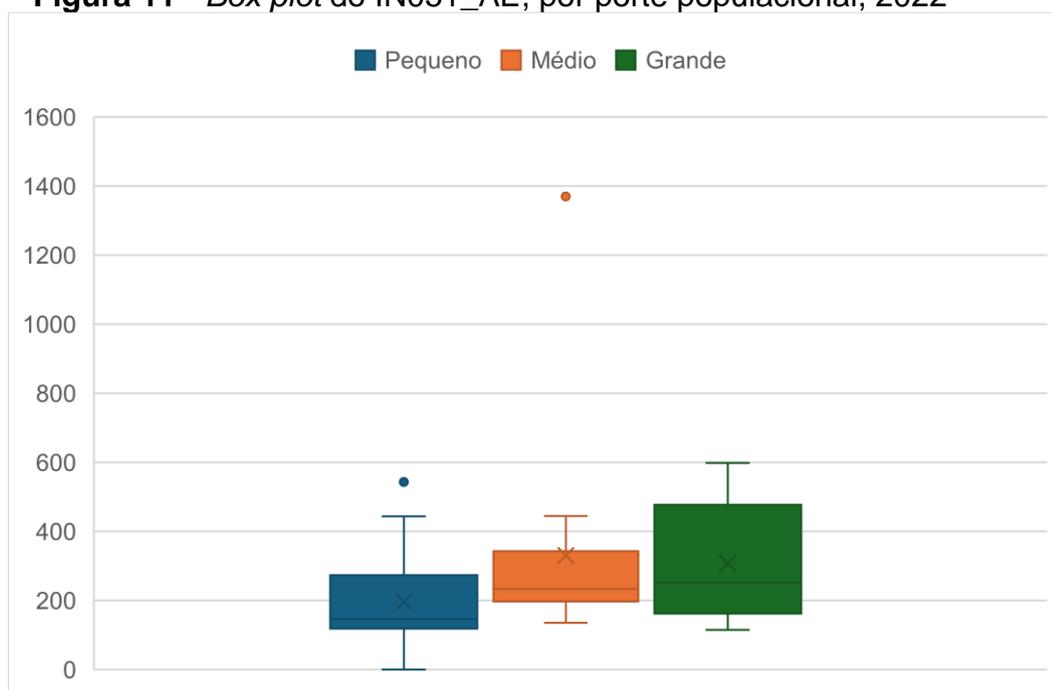
**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

O município é considerado “Bom” se o valor do indicador IN051\_AE for abaixo de 216 litros/ligações/dia e “Ruim” acima desse valor (ITB, 2023). No ano de 2018, 48,68% dos municípios que pertenciam às Bacias PCJ foram considerados com “Bom”, enquanto 50 % das cidades foram consideradas como “Ruim”, Analândia não apresentou dados.

Em 2020, houve um aumento de 13,51% dos municípios classificados como “Bom” e uma queda de 11,76% das cidades classificadas como “Ruim”. Todavia, em 2022, esse indicador mostrou estabilidade.

A Figura 11 apresenta o *box plot* do IN051\_AE por porte populacional dos municípios das Bacias PCJ.

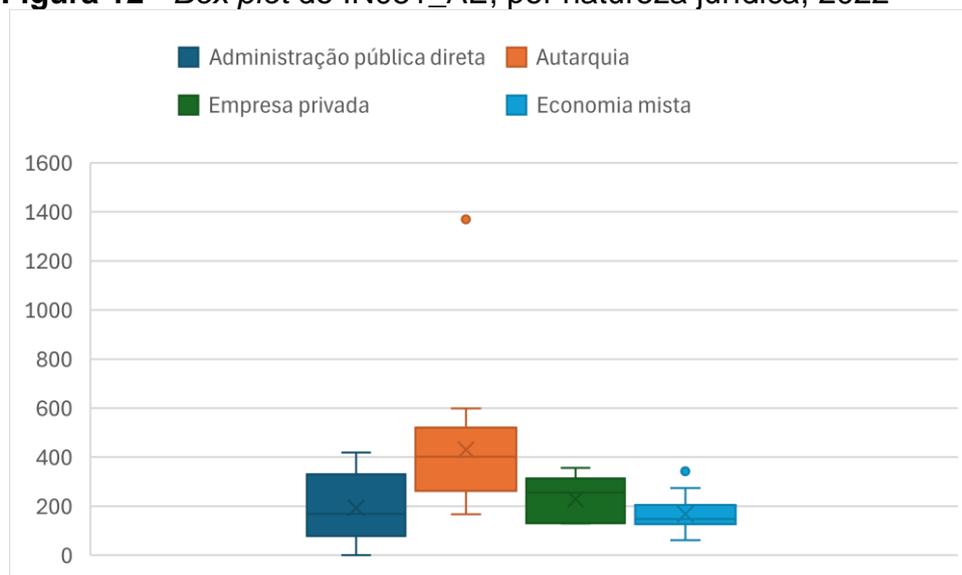
**Figura 11 - Box plot do IN051\_AE, por porte populacional, 2022**



**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

Para o Pequeno Porte o valor mínimo do Indicador IN051\_AE é 0 l./lig./dia (referente ao município Rio das Pedras, pois não apresentou dados) e o valor máximo é 443,87 l./lig./dia; já para o de Médio Porte o menor valor é 135,79 l./lig./dia e o maior valor é 445,04 l./lig./dia e no de Grande Porte o menor valor é 115,18 l./lig./dia e o maior valor é 538,13 l./lig./dia. O de Pequeno Porte e Médio Porte, contêm dois *outliers*, Tietê (543,34 l./lig./dia) e Capivari (1369,92 l./lig./dia).

A Figura 12 apresenta o *box plot* do IN051\_AE por natureza jurídica.

**Figura 12 - Box plot do IN051\_AE, por natureza jurídica, 2022**

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

O índice de perdas por ligação (IN051\_AE) por natureza jurídica dos municípios das Bacias PCJ apresentou distribuição assimétrica. Para Administração Pública Direta o valor mínimo do Indicador IN051\_AE é 0 l./lig./dia (Rio das Pedras, não apresentou dados) e o valor máximo é 418,6 l./lig./dia; já para Autarquia o menor valor é 167,57 l./lig./dia e o maior é 598,13 l./lig./dia; na Empresa Privada o menor valor é 131,34 l./lig./dia e o maior valor é 356,06 l./lig./dia e para Economia Mista o menor valor é 61,46 l./lig./dia e o maior valor é 273,79 l./lig./dia. A Autarquia e a Economia Mista apresentaram *outliers*, Capivari (1369,92 l./lig./dia), Torrinha (342,69 l./lig./dia), respectivamente.

Observa-se o comportamento do IN051\_AE em uma série histórica de cinco anos por natureza jurídica (Tabela 9 a 12).

**Tabela 9 - IN051\_AE por natureza jurídica Administração Pública Direta (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (l./lig./dia)	2019 (l./lig./dia)	2020 (l./lig./dia)	2021 (l./lig./dia)	2022 (l./lig./dia)	Variação absoluta	%
Iracemápolis	352,21	45,06	37,41	4,27	3,76	-348,45	-99
Santo Antônio de Posse	441,66	568,94	521,51	841,09	327,47	-114,19	-26
Louveira	378,65	309,01	355,26	303,16	271,52	-107,13	-28
Santa Maria da Serra	185,07	126,52	90,64	137,51	84,9	-100,17	-54
Ipeúna	200,35	216,4	243,25	196,13	129,05	-71,3	-36
Analândia	61,02	61,51	61,48	61,43	59,66	-1,36	-2
Jaguariúna	290,93	348,61	316,27	315,39	339,34	48,41	17

Corumbataí	96,36	95,23	257,29	158,18	158,86	62,5	65
Bom Jesus dos Perdões	169,08	157,72	138,38	264,63	234,97	65,89	39
Rafard	44,32	44,4	14,34	13,49	146,52	102,2	231
Itirapina	23,78	237,15	192,95	244,5	177,44	153,66	646
Monte Alegre do Sul	120,59	175,97	243,99	247,07	418,36	297,77	247
Cosmópolis	44,72	140,67	139,48	358,82	354,18	309,46	692

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

**Nota:** O valor de IN051\_AE do município de Analândia do ano 2018 foi obtido pela média dos anos de 2019 a 2022, tendo em vista a ausência da informação.

Dos 13 municípios com Administração Pública Direta, 46,16% diminuíram o valor de IN051\_AE, enquanto 53,84% tiveram crescimento. As cidades de Cosmópolis (692%), Itirapina (646%) e Monte Alegre do Sul (247%), possuíram o maior crescimento percentual em cinco anos. Os municípios Iracemápolis (-99%), Santa Maria da Serra (-54%) e Ipeúna (-36%) destacaram-se com as maiores diminuições do IN051\_AE.

**Tabela 10 - IN051\_AE por natureza jurídica Autarquia (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (I/lig./dia)	2019 (I/lig./dia)	2020 (I/lig./dia)	2021 (I/lig./dia)	2022 (I/lig./dia)	Variação absoluta	%
Rio das Pedras	675,79	520,52	498,62	95,12	447,51	-228,28	-34
Amparo	489,33	357,12	352,52	328,56	287,69	-201,64	-41
Brotas	328,5	279,8	170,01	179,02	167,57	-160,93	-49
Pedreira	554,28	463,86	478,21	436,69	414,79	-139,49	-25
Santa Bárbara D Oeste	648,49	636,76	603,82	559,96	532,8	-115,69	-18
Salto	342,15	335,71	277,33	246,85	251,88	-90,27	-26
Vinhedo	282,86	292,74	267,03	241	222,58	-60,28	-21
Indaiatuba	256,28	245,22	245,41	227,92	222,16	-34,12	-13
Artur Nogueira	206,84	228,29	202,38	194,01	188,3	-18,54	-9
São Pedro	383,47	449,14	365,09	382,22	379,34	-4,13	-1
Mogi Mirim	446,13	411,74	359,26	426,8	445,04	-1,09	0
Dois Córregos	440,33	279,22	347,33	446,02	443,87	3,54	1
Itu	502,55	475,7	535,48	599,4	506,89	4,34	1
Piracicaba	525,02	689,86	670,89	621,13	598,13	73,11	14
Valinhos	299,51	310,91	325,3	337,58	401,85	102,34	34
Atibaia	367,28	408,09	413,09	163,75	476,84	109,56	30
Engenheiro Coelho	275,12	297,92	368,38	351,77	384,76	109,64	40

Americana	468,35	468,71	488,78	522,56	589,9	121,55	26
Rio Claro	116,95	258,5	201,75	213,42	271,94	154,99	133
Tietê	341,44	394,96	491,16	491,32	543,34	201,9	59
Cordeirópolis	111,92	92,58	85,32	127,04	337,64	225,72	202
Capivari	108,23	112,4	110,64	108,98	1369,92	1261,69	1166

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

**Nota:** O valor de IN051\_AE do município de Rio das Pedras do ano 2022 foi obtido pela média dos anos de 2018 a 2021, tendo em vista a ausência da informação.

Dos 22 municípios com natureza jurídica de Autarquia, 45,46% deles tiveram um decaimento em seus IN051\_AE, ou seja, dez municípios. Todavia, 54,54% das cidades apresentaram estabilidade ou crescimento. Capivari (1166%), Cordeirópolis (202%) e Rio Claro (133%) foram os municípios nos quais esse índice mais subiu. Brotas (-49%), Amparo (-41%) e Rio das Pedras (-34%), são as cidades que tiveram as maiores reduções do IN051\_AE.

**Tabela 11 - IN051\_AE por natureza jurídica Empresa Privada (2018 – 2022)**

Cidades	2018 (I/lig./dia)	2019 (I/lig./dia)	2020 (I/lig./dia)	2021 (I/lig./dia)	2022 (I/lig./dia)	Variação absoluta	%
Holambra	363,32	324,71	329,47	340,78	270,15	-93,17	-26
Tuiuti	399,1	397,94	123,75	153,18	356,06	-43,04	-11
Sumaré	306,55	360,86	287,73	269,5	256,3	-50,25	-16
Santa Gertrudes	160,12	133,85	187,21	154,43	133,87	-26,25	-16
Limeira	128,38	77,97	126,79	132,4	128,82	0,44	0

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

O Índice de Perdas por Ligação (IN051\_AE), quando observado pela natureza jurídica Empresa Privada, mostrou que 80% dos municípios dessa tipologia apresentaram queda e apenas Limeira (0,44) teve um leve aumento.

**Tabela 12 - IN051\_AE por natureza jurídica Economia Mista (2018 – 2022)**

<b>Cidades</b>	<b>2018 (I/lig./dia)</b>	<b>2019 (I/lig./dia)</b>	<b>2020 (I/lig./dia)</b>	<b>2021 (I/lig./dia)</b>	<b>2022 (I/lig./dia)</b>	<b>Variação absoluta</b>	<b>%</b>
Águas de São Pedro	398,13	257,79	194,74	241,75	142,49	-255,64	-64
Campo Limpo Paulista	376,07	299,28	253,11	209,4	205,87	-170,2	-45
Anhembi	280,09	182,54	144,85	146,63	128,4	-151,69	-54
Paulínia	274,31	192,66	183,19	194,14	160,63	-113,68	-41
Morungaba	193,71	232,86	174,89	179,65	119,12	-74,59	-39
Várzea Paulista	273,58	244,72	228,84	228,8	203,08	-70,5	-26
Jarinu	205,57	180,84	129,83	152,81	136,17	-69,4	-34
Hortolândia	224,25	262,56	196,45	217,54	162,44	-61,81	-28
Sapucaí-Mirim	117,58	78,76	63,83	57,48	61,46	-56,12	-48
Pinhalzinho	131,4	117,97	88,81	103,7	79,4	-52	-40
Bragança Paulista	162	146,3	112,2	102,76	115,18	-46,82	-29
Botucatu	248,39	251,6	250,94	247,13	209,98	-38,41	-15
Cabreúva	230,98	253,29	179,97	199,12	193,49	-37,49	-16
Itupeva	185,7	217,54	194,44	159,51	149,83	-35,87	-19
Monte Mor	164,58	163,1	153,67	141,95	135,79	-28,79	-17
Mombuca	95,49	111,51	138,7	133,53	67,37	-28,12	-29
Serra Negra	163,95	172,64	163,95	183,04	142,8	-21,15	-13
Campinas	163,3	163,4	170,46	153,6	144,85	-18,45	-11
Nazaré Paulista	161,77	129,01	116,11	113,88	145,03	-16,74	-10
Elias Fausto	117,91	101,48	110,7	121,47	106,41	-11,5	-10
Jundiaí	383,39	403,54	420,84	392,51	373,36	-10,03	-3
Vargem	122,24	113,48	109,55	84,87	115,71	-6,53	-5
Socorro	169,22	158,95	143,04	136,61	163,64	-5,58	-3
Itapeva	139,52	86,12	101,24	114,99	134,69	-4,83	-3
Charqueada	276,77	268,18	261,03	265,44	273,79	-2,98	-1
Extrema	247,03	317,87	294,73	244,92	244,13	-2,9	-1
Piracaia	184,68	167,17	154,31	145,02	186,04	1,36	1
Itatiba	236,4	333,87	246,19	262,3	241,54	5,14	2
Mairiporã	209,2	219,01	168,41	162,5	215,54	6,34	3
Camanducaia	207,93	198,32	180,65	202,2	224,69	16,76	8
Joanópolis	73,12	64,79	122,15	115,7	94,63	21,51	29
Nova Odessa	161,37	189,94	229,52	250,63	200,63	39,26	24
Toledo	129,9	150,95	201,05	194,65	173,31	43,41	33
Pedra Bela	38,94	67,5	89,46	106,1	126,09	87,15	224
Saltinho	38,88	106,89	131,21	120,37	129,27	90,39	232
Torrinha	217,27	245,5	280,8	252,12	342,69	125,42	58

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

Na natureza jurídica Economia Mista, 72,22% dos municípios obtiveram queda no IN051\_AE, isso representa 26 cidades; por outro lado, 10 cidades tiveram crescimento percentual, destacando-se Saltinho (232%), Pedra Bela (224%) e Torrinha (58%).

A Tabela 13 apresenta o comportamento do Índice de perdas por ligação (IN051\_AE), no período de 2018 a 2022, dos 41 municípios estudados por Santi (2018), aqueles que responderam ao questionário informando quais práticas de controle e redução de perdas eram adotadas pelas operadoras de água.

**Tabela 13** - Índice de perdas por ligação das 41 cidades estudadas por Santi (2018), período de 2018 a 2022

Cidades	2018 (l/lig./dia)	2019 (l/lig./dia)	2020 (l/lig./dia)	2021 (l/lig./dia)	2022 (l/lig./dia)	Variação absoluta	%
Águas de São Pedro	398,13	257,79	194,74	241,75	142,49	-255,64	-64
Campo Limpo Paulista	376,07	299,28	253,11	209,4	205,87	-170,2	-45
Paulínia	274,31	192,66	183,19	194,14	160,63	-113,68	-41
Louveira	378,65	309,01	355,26	303,16	271,52	-107,13	-28
Santa Maria da Serra	185,07	126,52	90,64	137,51	84,9	-100,17	-54
Salto	342,15	335,71	277,33	246,85	251,88	-90,27	-26
Morungaba	193,71	232,86	174,89	179,65	119,12	-74,59	-39
Várzea Paulista	273,58	244,72	228,84	228,8	203,08	-70,5	-26
Jarinu	205,57	180,84	129,83	152,81	136,17	-69,4	-34
Hortolândia	224,25	262,56	196,45	217,54	162,44	-61,81	-28
Vinhedo	282,86	292,74	267,03	241	222,58	-60,28	-21
Pinhalzinho	131,4	117,97	88,81	103,7	79,4	-52	-40
Sumaré	306,55	360,86	287,73	269,5	256,3	-50,25	-16
Bragança Paulista	162	146,3	112,2	102,76	115,18	-46,82	-29
Cabreúva	230,98	253,29	179,97	199,12	193,49	-37,49	-16
Itupeva	185,7	217,54	194,44	159,51	149,83	-35,87	-19
Indaiatuba	256,28	245,22	245,41	227,92	222,16	-34,12	-13
Monte Mor	164,58	163,1	153,67	141,95	135,79	-28,79	-17
Mombuca	95,49	111,51	138,7	133,53	67,37	-28,12	-29
Santa Gertrudes	160,12	133,85	187,21	154,43	133,87	-26,25	-16
Campinas	163,3	163,4	170,46	153,6	144,85	-18,45	-11
Nazaré Paulista	161,77	129,01	116,11	113,88	145,03	-16,74	-10
Elias Fausto	117,91	101,48	110,7	121,47	106,41	-11,5	-10
Jundiaí	383,39	403,54	420,84	392,51	373,36	-10,03	-3



Cidades como Capivari (75,39%), Itu (56,71%), Tietê (56,36%), Santa Bárbara d'Oeste (54,14%) e Piracicaba (53,93%), em 2022, apresentaram os piores valores do IN049\_AE. Enquanto Iracemápolis (1,29%), Mombuca (13,23%), Santa Maria da Serra (16,41%), Sapucaí-Mirim (17,94%) e Águas de São Pedro (18,95%) foram as cidades com os melhores valores desse índice nas Bacias PCJ (SNIS, 2022a). Vale destacar que a média para o IN049\_AE nas Bacias PCJ no ano de 2022 foi 33,05%, classificada como "Regular".

Segundo os Comitês PCJ (2020), Capivari, Itu e Tietê, em 2013, não especificaram os dados de previsão sobre investimentos para a diminuição do Índice de Perdas na Distribuição. Santa Bárbara d'Oeste, em 2010, previu o investimento de R\$ 47.101.263,43 e uma redução prevista de 35% para o ano de 2021. Piracicaba, em 2011, previu o investimento R\$24.282.537,84, visando a um índice de perda de 25%.

De acordo com os Comitês PCJ (2023), no total foram investidos R\$ 71.377.587,20 no período de 2020 a 2023, esse investimento subdivide-se em três ações principais: ações de controle de perdas em sistemas de abastecimento (R\$ 63.274.841,60); ações de elaboração e revisão de Planos de Controle e Redução de Perdas (R\$ 7.002.241,83); manutenção do projeto de *benchmarking* para o controle de perdas de água em sistemas de distribuição (R\$ 1.100.503,76). As perdas de hídricas nos SDA ainda estão muito abaixo das metas estabelecidas pelo Plano de Bacias, apesar dos significativos investimentos no setor.

Segundo Carvalho (2023), grande variação das perdas nos municípios das Bacias PCJ aponta para a necessidade de compreender como é realizada a implementação dos investimentos e a execução das práticas de controle de perdas.

De acordo com Comitês PCJ (2023), as perdas nos sistemas de distribuição ainda são significativas e precisam ser controladas e reduzidas para atender as metas estipuladas no Plano de Bacias, especialmente em função da redução da disponibilidade de água.

Santi, Cetrulo e Malheiros (2021) destacam o alto valor investido em programas de controle de perdas em sistemas de abastecimento de água nas Bacias PCJ. A pesquisa realizada por Santi (2018) demonstra diversas práticas para o controle e a redução de perdas de água em SAA que são aderidas por operadoras que atuam nos municípios das Bacias PCJ. Os Comitês PCJ (2020, p. 317) destacam investimentos

para que algumas medidas controlem e reduzam as perdas de água, dentre as quais, “micromedição, cadastro técnico, automação, setorização e redução de pressão na rede de distribuição, detecção de vazamentos não visíveis, troca ou modernização de redes e ramais antigos, controle da utilização de água em processos”.

Santi (2018) ao analisar 54 práticas de controle e redução de perdas, observou que a prática do planejamento estratégico é a mais aplicada dentre as operadoras das Bacias PCJ. Enquanto as práticas menos utilizadas são: utilização de hidrômetros com telemetria através de rádio frequência, plano de manutenção anual da rede, investimento em tecnologias voltadas ao controle de perdas, atuação em áreas de pobreza para controlar as fraudes e utilização de hidrômetros de maior precisão.

O próximo capítulo trata dos procedimentos metodológicos realizados na presente pesquisa.

### **3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste capítulo são apresentados os métodos e os procedimentos da pesquisa, além da descrição da amostra da pesquisa e da técnica de tratamento e análise dos dados.

#### **3.1. Caracterização da pesquisa**

A presente pesquisa caracteriza-se como exploratória, descritiva e aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa. A pesquisa exploratória consiste na fase inicial de uma investigação, pois de acordo com Gil (2010, p. 27), a pesquisa exploratória busca “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito”. A pesquisa exploratória visa a delimitar um campo de trabalho a partir do levantamento de informações de determinado objeto (Severino, 2017).

A pesquisa é descritiva, já que se pretende descrever as características das Bacias PCJ e, também aplicada, pois visa a resolver um problema específico, atendendo às demandas sociais (Souza; Fialho; Otani, 2007). Em complemento, Gil (2010) destaca que a pesquisa aplicada se utiliza de consequências práticas dos conhecimentos.

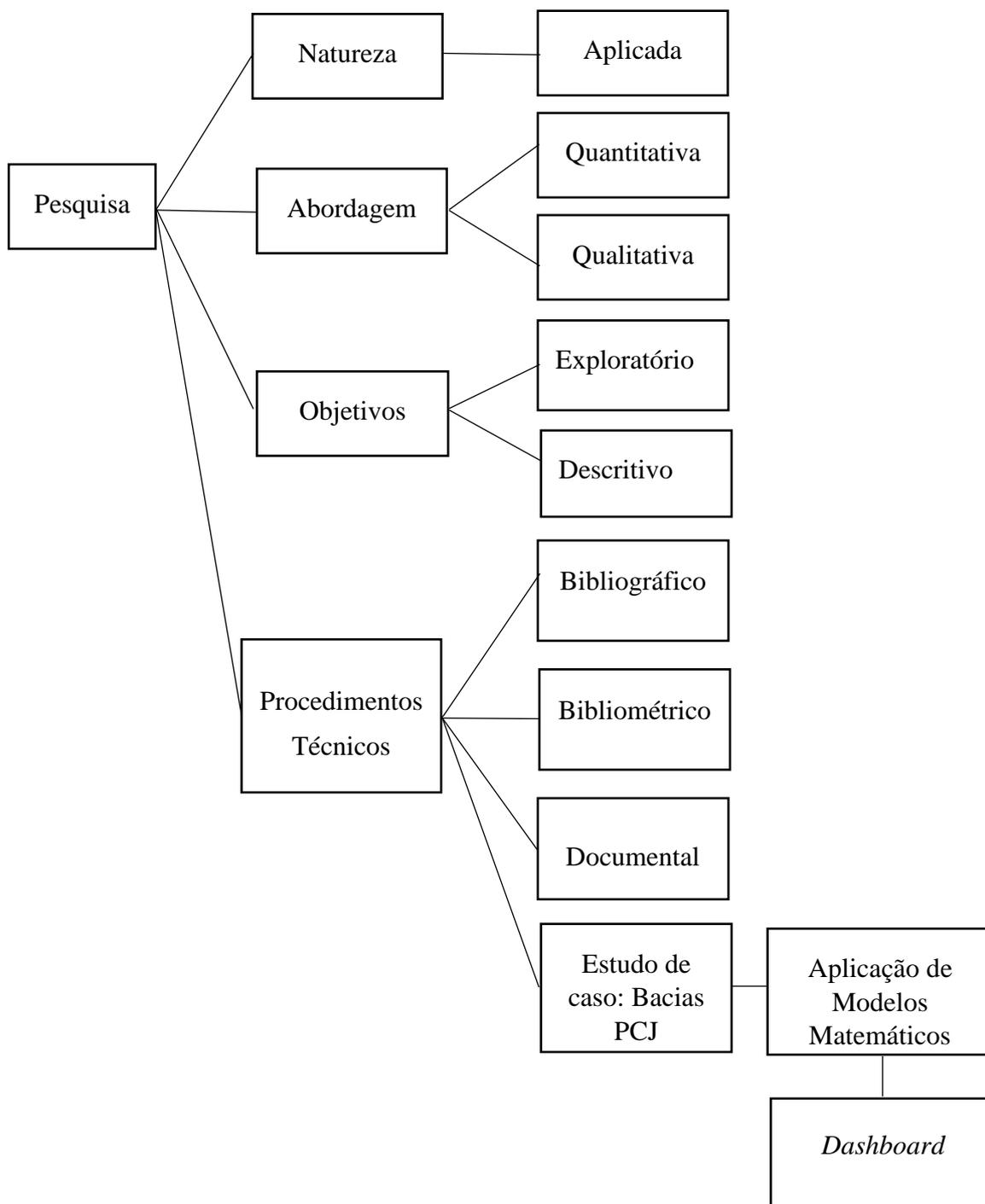
Quanto à abordagem, a pesquisa classifica-se como qualitativa e quantitativa, pois pretende-se realizar uma avaliação quantitativa a partir da organização de dados numéricos (Martins; Theóphilo, 2009). Adicionalmente, a pesquisa é qualitativa, pois visa a oferecer uma interpretação dos estudos realizados (Gil, 2010).

Quanto aos procedimentos, a pesquisa é bibliográfica, bibliométrica, documental e estudo de caso. Gil (2010) destaca pontos comuns entre a pesquisa bibliográfica e documental, pois as duas utilizam-se de dados já existentes. A pesquisa bibliográfica faz uso do referencial teórico, tais como livros, artigos, enquanto a pesquisa documental é realizada a partir de fontes diversas, como relatórios públicos (Fonseca, 2002).

Trata-se de uma pesquisa com procedimento de estudo de caso, tendo como foco as Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. O estudo de caso é utilizado em pesquisas que buscam conhecer os “fenômenos individuais, grupais organizacionais, sociais, políticos” (Yin, 2010, p. 24).

O método e os procedimentos utilizados na presente pesquisa podem ser visualizados na Figura 14.

**Figura 14 - Método da pesquisa**



**Fonte:** elaboração própria.

Desde o passado, a Humanidade tem feito uso de modelos para representar diversos fenômenos que chamam a atenção pela ocorrência repetitiva ou, muitas vezes, pelo ineditismo. Um modelo pode ser considerado uma representação da ocorrência observada, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem.

Muitas vezes não existe um modelo único que seja o melhor e sim aquele que melhor descreve um fenômeno. A presente pesquisa faz uso de modelos multicritério com a finalidade de apresentar uma hierarquização dos municípios das Bacias PCJ quanto aos indicadores referentes às perdas de água nos sistemas de abastecimento de água. Adicionalmente, foi construído um *dashboard* de monitoramento contendo informações sobre essa temática.

### 3.2. Procedimentos da coleta de dados

#### 3.2.1. Caracterização da área de estudo

Segundo os Comitês PCJ (2020), a área estimada das Bacias PCJ é de 15.377 km<sup>2</sup>, Rio Piracicaba (12.655 km<sup>2</sup>), Rio Capivari (1.568 km<sup>2</sup>) e Rio Jundiá (1.154 km<sup>2</sup>), compartilhada em 76 municípios, cinco no Estado de Minas Gerais e 71 no Estado de São Paulo (Figura 15).

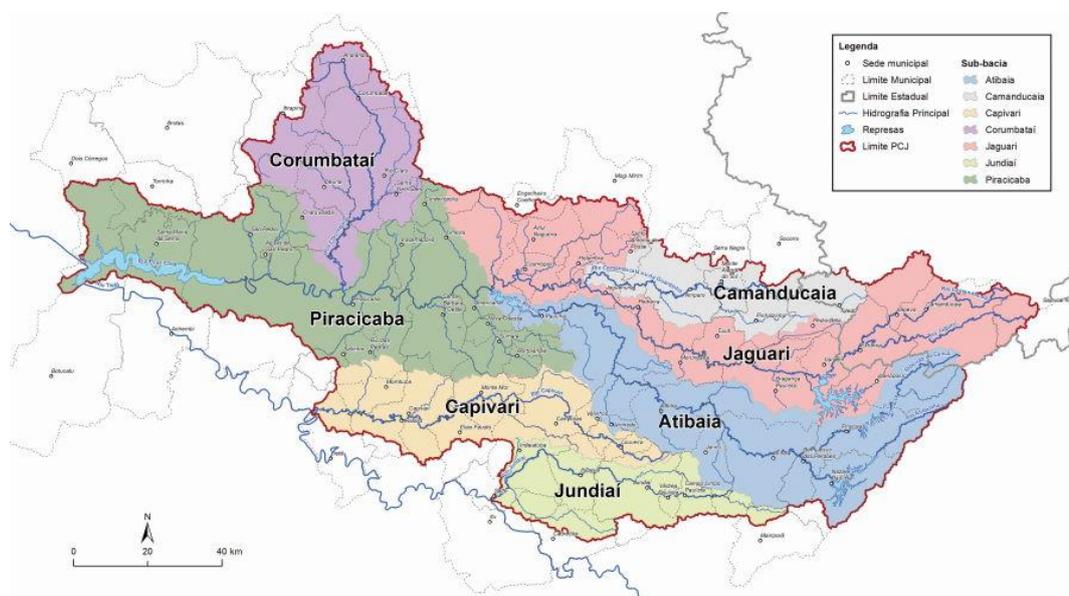
**Figura 15** - Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá



**Fonte:** Comitês PCJ (2020).

A partir da Figura 15, é possível observar a localização das Bacias PCJ no Estado de São Paulo. A Bacia do Rio Piracicaba tem a maior faixa da população (67%), a Bacia do Rio Jundiá 16,55% e a Bacia do Rio Capivari contém 16,45%, as quais se subdividem em sete sub-bacias, cinco pertencentes ao Rio Piracicaba (Atibaia, Camanducaia, Corumbataí, Jaguari e Piracicaba), Capivari e Jundiá (Figura 16).

**Figura 16 - Disposição geográfica das sub-bacias inseridas nas Bacias PCJ**



**Fonte:** Agências das Bacias PCJ (2019, s/p).

As sub-bacias dos Rios Piracicaba e Capivari são as menos sustentáveis, uma vez que possuem os maiores volumes de água captados e a maior faixa de concentração populacional (COMITÊS PCJ, 2020). O Quadro 5 destaca as sub-bacias pertencentes às Bacias PCJ e os respectivos municípios.

**Quadro 5 - Municípios e sub-bacias das Bacias PCJ**

Sub-bacias	Cidades
Capivari	Campinas, Capivari, Elias Fausto, Hortolândia, Indaiatuba, Itupeva, Jundiá, Louveira, Mombuca, Monte Mor, Rafard, Rio das Pedras, Tietê, Valinhos, Vinhedo.
Jundiá	Atibaia, Cabreúva, Campo Limpo Paulista, Indaiatuba, Itu, Itupeva, Jarinu, Jundiá, Mairiporã, Salto, Várzea Paulista
Atibaia	Americana, Atibaia, Bragança Paulista, Camanducaia*, Campinas, Cordeirópolis, Cosmópolis, Extrema*, Itatiba, Jaguariúna, Jarinu, Joanópolis, Jundiá, Louveira, Morungaba, Nazaré Paulista, Nova Odessa, Paulínia, Piracaia, Valinhos, Vinhedo.
Camanducaia	Amparo, Holambra, Jaguariúna, Monte Alegre do Sul, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Santo Antônio de Posse, Serra Negra, Socorro, Toledo*.
Corumbataí	Analândia, Charqueada, Cordeirópolis, Corumbataí, Ipeúna, Itirapina, Piracicaba, Rio Claro, Santa Gertrudes.

Jaguari	Americana, Amparo, Artur Nogueira, Bragança Paulista, Camanducaia*, Campinas, Cordeirópolis, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Extrema*, Holambra, Itapeva*, Jaguariúna, Joanópolis, Limeira, Mogi-Mirim, Morungaba, Paulínia, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Piracaia, Santo Antônio de Posse, Sapucaí-Mirim*, Tuiuti, Vargem.
Piracicaba	Águas de São Pedro, Americana, Anhembi, Botucatu, Brotas, Campinas, Capivari, Charqueada, Cordeirópolis, Dois Córregos, Hortolândia, Iracemópolis, Itirapina, Limeira, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Piracicaba, Rio das Pedras, Saltinho, Santa Bárbara d'Oeste, Santa Maria da Serra, São Pedro e Sumaré, Torrinha

**Fonte:** elaboração própria a partir de Comitês PCJ (2023).

**Nota:** \* Indica a cidade do Estado de Minas Gerais.

A região das Bacias PCJ é economicamente importante, com altos níveis de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), Produto Interno Bruto (PIB) e as principais atividades econômicas na região são agrícolas, comerciais, de serviços, e sobretudo, as industriais (Comitês PCJ, 2020).

### 3.2.2. Coleta dos indicadores

Os indicadores de sustentabilidade ganharam destaque com a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), ocorrida em 1992 (Brasil, 2002), e com a outorga da Agenda 21 no ano de 2015 (ONU, 2023).

O desenvolvimento de um sistema de indicadores ao longo do tempo possibilita o diagnóstico da atual situação, como também, a sua trajetória até o presente momento.

No Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), administrado pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), considerado o maior banco de dados brasileiro sobre serviços de saneamento e de água, promove a coleta de dados e disponibiliza relatórios referentes à água e ao saneamento (Borges, 2022).

O SNIS é responsável por reunir informações e indicadores sobre a prestação dos serviços de manejo de Resíduos Sólidos e de manejo de Águas Pluviais, de Água e de Esgotos, oriundos dos prestadores que operam no Brasil (SNIS, 2022a).

Para Bezerra, Pertel e Macêdo (2019), as informações do SNIS são processadas pelos técnicos do governo federal com base nas declarações anuais de responsabilidade das companhias estaduais, das empresas e Autarquias municipais,

das empresas privadas e, em muitos casos, das prefeituras municipais. Ou seja, as informações enviadas ao SNIS são autodeclaradas, sem a realização de uma verificação dos dados inseridos na sua plataforma.

O Quadro 6 destaca os indicadores selecionados para esta pesquisa referentes às perdas no sistema de abastecimento de água.

**Quadro 6 – Indicadores selecionados**

Código do indicador	Descrição	Fórmula	Parâmetros	Unidade
IN011_AE	Índice de macromedição	$\frac{AG012 - AG019}{AG006 + AG018 - AG019} \times 100$	AG006: Volume de água produzido AG012: Volume de água macromedido AG018: Volume de água tratada importado AG019: Volume de água tratada exportado	Percentual
IN044_AE	Índice de micromedição relativo ao consumo	$\frac{AG008}{AG010 - AG019} \times 100$	AG008: Volume de água micromedido AG010: Volume de água consumido AG019: Volume de água tratada exportado	Percentual
IN049_AE	Índice de perdas na distribuição	$\frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG006 + AG018 - AG024} \times 100$	AG006: Volume de água produzido AG010: Volume de água consumido AG018: Volume de água tratada importado AG024: Volume de serviço	Percentual
IN051_AE	Índice de perdas por ligação	$\frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG002 * } \times \frac{1.000.000}{365}$	AG002: Quantidade de ligações ativas de água AG006: Volume de água produzido AG010: Volume de água consumido AG018: Volume de água tratada importado AG024: Volume de serviço	l/lig./dia
IN058_AE	Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água	$\frac{AG028}{AG006 + AG018}$	AG006: Volume de água produzido AG018: Volume de água tratada importado AG028: Consumo total de energia elétrica nos sistemas de água	kWh/m <sup>3</sup>

**Fonte:** elaboração própria a partir do SNIS (2022b).

Dentre os 76 municípios das Bacias PCJ, alguns dados dos indicadores selecionados apresentaram algumas incongruências para o ano de referência de 2022 (Tabela 14).

**Tabela 14 - Municípios com dados incongruentes para o ano 2022**

Município	IN011_AE (%)	IN044_AE (%)	IN049_AE (%)	IN051_AE (l/lig./dia)	IN058_AE (kWh/m <sup>3</sup> )
Artur Nogueira	0	99,6	30,11	188,3	1,15
Corumbataí	0	100	23	158,86	0,1
Dois Córregos	0	100	52,63	443,87	0,76
Engenheiro Coelho	100	99,94	48,53	384,76	0
Iracemápolis	0	95,65	1,29	3,76	0
Itirapina	0	100	30,4	177,44	0,7
Monte Alegre do Sul	0	98,62	24,1	418,36	0
Pedreira	0	100	51,41	414,79	1,02
Rio das Pedras	0	0	0	0	0
Salto	0	99,86	37,19	251,88	0,7
São Pedro	41,28	100	49,37	379,34	0

**Fonte:** elaboração própria a partir de SNIS (2022a).

A partir da Tabela 14, observa-se pelo menos um valor nulo para cada um dos onze municípios, o que caracteriza a ausência de informação para esses valores. Dessa forma, decidiu-se pela eliminação desses municípios na aplicação dos modelos multicritério.

A Tabela 15 mostra a correlação entre os indicadores selecionados para os 65 municípios das Bacias PCJ com referência o ano de 2022.

**Tabela 15 - Correlação dos indicadores selecionados**

Indicadores	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE
IN011_AE	1,00				
IN044_AE	0,35	1,00			
IN049_AE	-0,13	-0,07	1,00		
IN051_AE	-0,07	0,02	0,84	1,00	
IN058_AE	-0,04	-0,19	0,01	-0,18	1,00

**Fonte:** elaboração própria a partir do SNIS (2022a).

As correlações em verde mostram que os indicadores possuem forte correlação positiva, IN049\_AE e IN051\_AE (0,84). As correlações em vermelho indicam fraca correlação negativa, IN044\_AE e IN058\_AE (-0,19), IN051\_AE e IN058\_AE (-0,18). Enquanto, as cores amarelas e laranjas, com valores próximos a zero, possuem fraca correlação positiva ou negativa, o que indica que esses indicadores não possuem correlação entre eles, por exemplo IN044\_AE e IN051\_AE (0,02), ou IN011\_AE e IN058\_AE (-0,04).

### 3.3. **Dashboard de perdas de água das Bacias PCJ**

Essa seção aborda a criação de um painel de controle em *Power BI* focado nas perdas de água em sistemas de abastecimento de água das Bacias PCJ. É essencial que o *dashboard* não apenas visualize os dados de forma eficaz, mas também possibilite *insights* significativos, que permitam aos gestores tomadores de decisão e à sociedade, identificar municípios em situações de vulnerabilidade em relação às perdas no SAA e a adoção de práticas necessárias para melhorar tal situação.

Em concordância, Elfirdoussi *et al.* (2020) esclarecem que o *Microsoft Power BI*, enquanto ferramenta de análise de dados, deve ser utilizado para realizar a análise de informações, visualizar dados e extrair *insights*.

A aplicação do *Power BI* possibilita exibir pontos positivos e negativos em tempo real em cada processo, modelagem de cenário e simulação, o que caracteriza

uma ferramenta para auxiliar na economia de água e na redução de custos (Sodkomkham *et al.*, 2024)

Para a presente pesquisa, os indicadores da seção 3.2.2 foram utilizados, juntamente com dados sobre tarifa média de água (IN005\_AE), consumo médio *per capita* de água (IN022\_AE) e a população total dos municípios (IBGE, 2022).

Adicionalmente, fontes como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e relatórios dos Comitês PCJ para obter as metas para o indicador IN049\_AE e em qual ano essa meta deve ser atingida, também foram utilizados. A diversidade nas fontes assegura que a análise seja abrangente e representativa da realidade nas Bacias PCJ.

A partir da seleção dos dados, é necessário identificar e remover os dados duplicados, eliminar os dados ausentes e padronizar os formatos. A utilização do *Power Query*, uma ferramenta do *Power BI*, permite que a preparação dos dados seja feita de maneira eficiente e sistemática.

Com os dados tratados, a modelagem torna-se a próxima prioridade. Nesta fase, a criação de relacionamentos entre os diferentes conjuntos de dados é crucial. Por exemplo, os dados de consumo devem ser interligados às informações sobre perdas, permitindo uma análise integrada. Essa modelagem adequada é essencial para garantir que as visualizações e análises subsequentes sejam pertinentes e informativas.

Segundo Becker e Gould (2019), os diversos elementos do *Power BI* podem aparentar serem complexos em sua concepção teórica, no entanto, as interfaces gráficas, desenvolvidas com base em ferramentas amplamente adotadas, facilitam a visualização dos dados e dos processos requeridos para integrar os distintos repositórios de dados.

A definição dos *Key Performance Indicators*, ou, Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) é uma etapa crítica que deve ser realizada em conjunto com a modelagem dos dados. Os KPIs como a taxa de perda de água, a relação entre consumo e perdas, e o desempenho de cada município em relação a metas estabelecidas auxiliam a orientar a análise. Esses indicadores são fundamentais para a avaliação da eficiência hídrica nas cidades que compõem as Bacias PCJ.

Com os dados modelados e os KPIs definidos, inicia-se a criação das visualizações no *Power BI*. A escolha de gráficos e tabelas deve ser cuidadosa, priorizando a clareza e a facilidade de interpretação. Visualizações como gráficos de

barras, linhas e mapas temáticos podem ser utilizadas para representar os dados de maneira intuitiva, permitindo que os usuários identifiquem rapidamente padrões e anomalias.

A implementação de um *layout* organizado e intuitivo para o *dashboard* é fundamental. As seções devem ser dispostas de maneira lógica, agrupando informações relacionadas e facilitando a navegação. Um *design* eficaz não apenas melhora a experiência do usuário, mas também potencializa a interpretação dos dados, permitindo que os gestores obtenham *insights* de forma ágil. A seção seguinte destaca os indicadores construídos para compor o *dashboard*.

### 3.3.1. Definição de KPIs e Indicadores para o *Dashboard*

O indicador denominado Volume Perdido, em  $1000 \text{ m}^3/\text{ano}$ , (Equação 1) tem como objetivo calcular a quantidade de metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ) de água que são desperdiçados anualmente em cada município.

$$\text{Volume perdido} = (AG012 - AG008) \quad (1)$$

Em que:

AG008: volume de água micromedido ( $1000 \text{ m}^3/\text{ano}$ );

AG012: volume de água macromedido ( $1000 \text{ m}^3/\text{ano}$ ).

O indicador Volume perdido fornece a informação do volume de água que vem sendo perdido em cada município.

O indicador criado pelo autor dessa dissertação, Índice de Veneto (hab.), que tem a função de transformar o volume perdido em possíveis habitantes que poderiam usufruir desse volume perdido (Equação 2).

$$\text{Índice de Veneto} = \text{Volume perdido} * \frac{1}{IN022\_AE} * \frac{1}{365} \quad (2)$$

Em que:

Volume perdido ( $1000 \text{ m}^3/\text{ano}$ )

IN022\_AE: consumo médio *per capita* de água (l./hab./dia).

Ressalta-se que foi feita a transformação de 1000 m<sup>3</sup> para 1.000.000 litros, logo depois fazer a conversão de litros para habitantes por dia e em seguida a conversão para habitantes. Essa conversão permite uma compreensão mais acessível do impacto do desperdício de água pela população, o que evidencia o número de habitantes que poderiam ser beneficiados com a água que se perde anualmente.

Ao relacionar o volume de água perdido com a realidade demográfica, o Índice de Veneto facilita a identificação de áreas onde intervenções são necessárias, promovendo uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos.

O indicador "Volume de água perdido em reais (R\$/ano)" (Equação 3) tem como objetivo converter o volume de água perdido em valores monetários, utilizando a estimativa de Liemberger e Wyatt (2019), que considera o custo de produção de um metro cúbico de água em 0,31 dólares. Com a cotação do dólar a 5,75 reais, no dia 05/03/2025, o custo aproximado seria de 1,79 reais por m<sup>3</sup>.

$$\text{Volume de água perdido em reais} = \text{Volume perdido} * 1,79 \quad (3)$$

Essa transformação permite quantificar o desperdício em termos financeiros, juntamente, oferecer uma perspectiva clara sobre os impactos econômicos associados à ineficiência no uso da água.

Ao apresentar as perdas em reais, o indicador serve como um alerta para os gestores e autoridades, destacando a necessidade de ações corretivas que visem à redução das perdas e à otimização dos recursos hídricos, contribuindo assim para uma gestão mais responsável e sustentável

Por último, o indicador Energia elétrica perdida (kWh/ano) (Equação 4) tem como objetivo calcular a quantidade de energia elétrica consumida no volume de água perdido, ou seja, a quantidade de quilowatts-hora que foram desperdiçados devido à ineficiência no uso dos recursos hídricos e dos SAA das cidades.

$$\text{Energia elétrica perdida} = \text{Volume perdido} * IN058_{AE} \quad (4)$$

Em que:

IN058\_AE: índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (kWh/m<sup>3</sup>).

Este indicador é fundamental para compreender a relação entre o desperdício de água e o consumo energético, oferecendo uma visão abrangente dos impactos ambientais e econômicos associados. Ao quantificar a energia elétrica perdida, é possível identificar oportunidades para melhorar a eficiência e, como consequência, promover práticas sustentáveis, contribuindo para um uso mais consciente da água e da energia elétrica.

Os indicadores construídos: Volume Perdido, Índice de Veneto, Volume de água perdido em reais e Energia elétrica perdida, formam um conjunto robusto de ferramentas analíticas que possibilita a compreensão das consequências do desperdício dos recursos hídricos nas Bacias PCJ.

A integração desses indicadores em um painel interativo no *Power BI* permite visualizações dinâmicas e acessíveis, facilitando a análise e a interpretação dos dados de forma intuitiva. Essa abordagem fornece uma base sólida para a tomada de decisões e pode evidenciar a urgência da situação das perdas de água em SAA.

Por fim, a ferramenta *Power BI* pode auxiliar na conscientização e na implementação de políticas eficazes, contribuindo para uma gestão sustentável da água e da energia elétrica nos municípios das Bacias PCJ.

### **3.4. Procedimentos da análise de dados**

#### **3.4.1. Método Simples Ponderação Aditiva**

O método de Simples Ponderação Aditiva, em inglês, *Simple Additive Weighting* (SAW), conhecido também como método de soma ponderada, consiste em obter a soma ponderada da eficiência de cada alternativa (municípios das Bacias PCJ) em cada critério (indicador). Sucena e Silva (2020, p. 218) fazem a seguinte ponderação sobre o método, “por ser simples, os algoritmos que aplicam esse conceito exigem muito menos processamento em larga escala”. Em concordância, para Afshari *et al.* (2010), o método SAW é prático, eficiente e consiste em um procedimento matemático, no qual todos os critérios são individualmente avaliados e classificados de acordo com seu grau de importância, sendo possível adequar as escolhas conforme as diferentes necessidades que sustentam a decisão.

Para aplicar o método SAW, realiza-se a soma ponderada de todos os critérios das alternativas, e a alternativa escolhida é aquela que apresenta o maior valor dessa soma, ou seja, a mais eficiente. É necessário decidir, antecipadamente, quais indicadores devem ser maximizados e quais devem ser minimizados.

Saaty (1970) sugere um procedimento para facilitar a definição da preferência do decisor em relação aos critérios (indicadores selecionados). O Quadro 7 apresenta a escala de preferências de Saaty.

**Quadro 7 - Escala de preferências de Saaty**

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os critérios <i>i</i> e <i>j</i> são igualmente importantes
3	Importância moderada	O critério <i>i</i> é levemente mais importante ao critério <i>j</i>
5	Importância forte	O critério <i>i</i> é mais relevante ao critério <i>j</i>
7	Importância muito forte	O critério <i>i</i> é muito mais relevante ao critério <i>j</i>
9	Extrema importância	O critério <i>i</i> é extremamente mais importante ao critério <i>j</i>

**Fonte:** elaboração própria a partir de Saaty (2004).

As intensidades de importância 2, 4, 6 e 8 representam os valores intermediários.

A partir da atribuição dos pesos dos critérios, constrói-se a matriz de comparação, assumindo *n* critérios (matriz *A*).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{2n} \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1 \end{pmatrix}$$

Na sequência, obtêm-se os auto-vetores de prioridades de cada elemento da hierarquia (*w*), que representam a importância relativa de cada um deles, e calcula-se a soma ponderada das importâncias relativas de cada critério (Equação 5).

$$V(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j (a) \quad (5)$$

Tal que  $\sum w_j = 1$  e  $0 < w_j < 1$  ( $j = 1, \dots, n$ ).  $V(a)$  é o valor global da alternativa analisada e  $w_j$  é a importância relativa do critério  $j$ ;  $v_j$  é o nível de preferência da alternativa no critério  $j$ .

Na sequência, obtém-se o número principal de Eigen: maior auto-valor da matriz de julgamentos ( $\lambda_{max}$ ). Por fim, obtém-se o Índice de Consistência ( $IC$ ) com a finalidade de medir a consistência dos pesos (Equação 6).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Em que  $n$  é o número de critérios.

Para avaliação da consistência dos valores de  $IC$  é feita uma comparação com o Índice de Consistência Aleatória ( $IR$ ). O Quadro 8 estabelece o valor de  $IR$  de acordo com o número de critérios.

**Quadro 8 - Índice de Consistência Randômica**

<b>N</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>IR</b>	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

**Fonte:** elaboração própria a partir de Saaty (2004).

A Razão de Consistência, é definida pela Equação 7 (Saaty; Vargas, 2012).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (7)$$

Se  $RC \leq 0,1$ , então os resultados são válidos, isto é, a matriz de comparação é consistente. Entretanto se  $RC > 0,1$ , os dados não são válidos, portanto, os julgamentos dos decisores devem ser revisados.

A atribuição das prioridades dos pesos dos indicadores foi realizada com o auxílio de um especialista (gerente de perdas de uma operadora das Bacias PCJ) (Tabela 16).

**Tabela 16 - Ponderação do especialista**

	IN049_AE	IN051_AE	IN044_AE	IN011_AE	IN058_AE
IN049_AE	1,00	5,00	0,33	5,00	3,00
IN051_AE	0,20	1,00	0,33	0,33	0,33
IN044_AE	3,00	3,00	1,00	5,00	3,00
IN011_AE	0,20	3,00	0,20	1,00	1,00
IN058_AE	0,33	3,00	0,33	1,00	1,00

**Fonte:** elaboração própria.

O  $IC$  para os dados da Tabela 16 é obtido conforme a Equação 6,  $IC = (5-5) / 4 = 0$ . Após calcular o  $IC$ , a determinação do  $RC$  para os dados da Tabela 16 é realizada conforme a Equação 7,  $RC = 0/1,12 = 0$ . Como  $RC$  resultou em zero, portanto inferior a 0,1, as ponderações são consideradas válidas e isentas de vieses.

Em seguida, foi realizada a soma de cada coluna da matriz. Cada elemento de uma coluna foi dividido pela respectiva soma, e, por fim, calculou-se a média aritmética das linhas, resultando no peso de cada critério. Os pesos dos critérios somam 100% e são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17 - Pesos dos critérios**

<b>Critérios</b>	<b>Pesos (%)</b>
IN049_AE	29,23
IN051_AE	6,55
IN044_AE	41,08
IN011_AE	10,68
IN058_AE	12,46

**Fonte:** elaboração própria.

Ao analisar a Tabela 17, observa-se que IN044\_AE é o critério com maior peso (41,08%), seguido de IN049\_AE (29,23%). Em seguida, IN058\_AE (12,46%), IN011\_AE (10,68%) e, por último, IN051 (6,55%).

Após a definição dos pesos dos critérios, é necessário normalizar os valores das alternativas. Para isso, realiza-se a divisão de cada elemento da coluna pelo maior valor dessa mesma coluna.

Na sequência, a normalização dos indicadores (alternativas). É fundamental determinar quais critérios devem ser maximizados e quais minimizados. A maximização é realizada utilizando a Equação 8, enquanto a minimização dos indicadores é feita por meio da Equação 9 (Panjaitan, 2019).

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (8)$$

$$R_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (9)$$

Em que:

$x_{ij}$ : valor da alternativa de cada critério;

Max  $x_{ij}$ : maior valor de cada critério;

Min  $x_{ij}$ : menor valor de cada critério;

$R_{ij}$ : avaliação normalizada de desempenho das alternativas.

Na sequência, realiza-se a soma ponderada dos valores normalizados dos indicadores selecionados para cada alternativa (Equação 10).

$$IE_i = 0,2923 * A_{ij} + 0,0655 * A_{ij} + 0,4108 * A_{ij} + 0,1068 * A_{ij} + 0,1246 * A_{ij} \quad (10)$$

Em que:

$A_{ij}$ : valor da alternativa  $i$  para o critério  $j$  (entende-se a alternativa como município e o critério como indicador);

$IE_i$ : índice de eficiência da alternativa  $i$ .

### 3.4.2. Método Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados, em inglês, *Data Envelopment Analysis* (DEA) é uma técnica de programação linear que avalia um conjunto de unidades de produção homogêneas, usando variáveis de entrada (*input*) e variáveis de saída (*output*) com pesos não conhecidos associados a essas variáveis, comparando a Unidades de Tomadas de Decisão, em inglês, *Decision Making Units* (DMU's) (Pardo, Martínez; Zabaleta, 2022). A DMU pode ser representada por um país, uma máquina, uma operadora de sistema de distribuição, dentre outras. O objetivo é encontrar os pesos para maximizar a eficiência de um conjunto de DMU's, por meio de uma fronteira linear por partes (Torres; Torres; Ignacio, 2022).

Há diversos modelos que podem ser utilizados na aplicação da DEA, referentes ao tipo de retorno de escala à orientação e à forma de combinar entradas e saídas.

Quanto ao tipo de retorno de escala, os dois principais modelos são: Retornos Constantes de Escala, em inglês, *Constant Returns to Scale* (CRS), também denominado de CCR em homenagem aos seus desenvolvedores, Charnes, Cooper e Rhodes (1978); e o modelo Retornos Variáveis de Escala, em inglês, *Variable Returns to Scale* (VRS), também denominado de BCC, em homenagem aos seus desenvolvedores, Banker, Charnes e Cooper (1984).

No modelo de Retornos Constantes de Escala, as saídas variam proporcionalmente às entradas em todas as regiões de fronteira. Enquanto no modelo de Retornos Variáveis de Escala, a variação das saídas não necessita ser proporcional às entradas, isto é, as saídas podem crescer proporcionalmente mais que as entradas, ou as saídas podem crescer proporcionalmente menos que as entradas, ou ainda, manter a proporcionalidade.

Quanto aos modelos de orientação a entradas, eles visam à minimização das entradas, mantendo as saídas e os modelos de orientação a saídas visam à maximização das saídas mantendo as entradas. As Equações 11 a 14 correspondem ao modelo BCC orientado a entradas.

$$\text{Max} \sum_{i=1}^m u_i y_{i0} + u \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n v_j x_{j0} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m u_i y_{ik} + u - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0, k = 1, 2, \dots, h \quad (13)$$

$$u_i, v_j \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Em que:

$x_{jk}$ : quantidade da entrada  $j$  da DMU  $k$ ;

$y_{ik}$ : quantidade da saída  $i$  da DMU  $k$ ;

$x_{j0}$ : quantidade da entrada  $j$  da DMU em análise;

$y_{i0}$ : quantidade da saída  $i$  da DMU em análise;

$v_j$ : peso da entrada  $j$ ;

$u_i$ : peso da saída  $i$ ;

$m$ : quantidade de saídas em análise;

$n$ : quantidade de entradas em análise;

$h$ : quantidade de DMU's em análise;

$u$ : coeficiente de retorno a escala.

Chaves e Thomaz (2008) destacam que a DEA é uma ferramenta relevante, visando a auxiliar as decisões de natureza gerencial, de modo a possibilitar a avaliação de cenários alternativos, com base nas melhores práticas identificadas por meio de modelagem matemática.

O método DEA possibilita identificar pares ineficientes e folgas nos recursos. Dessa forma, ao ajustar o nível de entrada e saída, as unidades com maiores ineficiências podem obter mais eficiência operacional (Ahmadi; Osman; Aghdam, 2020).

Cavalcante e Andriola (2012) pontuam que essa técnica de avaliação de modelagem permite a seleção das melhores práticas, considerando diversos critérios predefinidos. No contexto das perdas de água, a aplicação do método DEA é de valia no sentido de apontar as DMUs (cidades) mais eficientes e desenvolver um *ranking* dos municípios com base nessa eficiência. Ressalta-se que a ferramenta DEA fornece projeções (alvos) para atingir a eficiência máxima das DMU's.

### **3.5. Caracterização da análise bibliométrica**

Buscando compreender a temática estudada, é possível recorrer à investigação da produção científica pertinente, possibilitando explicar os domínios e as tendências do conhecimento dessa área. Uma ferramenta para observar os movimentos e focos, em relação à produção científica de determinado assunto, ocorre com a análise de bibliometria, que possui aspectos qualitativos e quantitativos.

Marques, Maculan e Souza (2023) alegam que a análise bibliométrica é uma técnica importante para avaliar a natureza e a extensão do conhecimento gerado, independentemente de ser científico. Andrade e Queiroz (2023) ponderam que essa análise viabiliza o acompanhamento detalhado de uma área científica, delimitando

campos de pesquisa, mapeando a estrutura cognitiva da área e acompanhando sua evolução.

Visando a identificar o estado da arte sobre perdas em sistemas de distribuição de água no âmbito (inter)nacional, foi realizada a análise bibliométrica. Foi escolhida a base Scopus (Elsevier) devido ao seu reconhecimento global. A busca foi realizada utilizando os operadores booleanos “AND” e “AND NOT”, da seguinte forma, "*water management*" (gestão de água) AND "*water supply*" (abastecimento de água) AND "loss" (perda) AND NOT "*irrigation*" (irrigação) a partir de artigos científicos no período de 1970 a 11/03/2024, obtendo 914 artigos. Foram selecionados apenas documentos da língua inglesa e artigos científicos dentre a gama de documentos obtidos.

As pesquisas bibliométricas visam a “examinar a produção de artigos em um determinado campo de saber, mapear as comunidades acadêmicas e identificar as redes de pesquisadores e suas motivações” (Chueke e Amatucci, 2015, p. 2).

Porém, houve necessidade de refinar a busca no sentido de alinhar com o objetivo dessa dissertação, ou seja, perdas em sistemas de distribuição de água. Assim, foi conduzida uma nova busca utilizando a mesma base de dados no dia 11/03/2024, valendo-se das seguintes palavras-chave com os operadores booleanos: "*water distribution systems*" (sistemas de distribuição de água) AND "loss" (perda) AND "leak" (vazar) AND NOT "*irrigation*" (irrigação) AND NOT "*agriculture*" (agricultura). O operador “AND NOT” foi utilizado com a finalidade de excluir os documentos com as palavras-chave irrigação e agricultura, pois as perdas de água em sistemas de distribuição de irrigação e agricultura não foram consideradas nesta dissertação, assim, foram obtidos 158 artigos científicos.

Utilizando programas computacionais e as palavras-chave, é possível quantificar e qualificar as produções científicas sobre o assunto pesquisado e destacar as principais contribuições para a ciência e suas interconexões. As palavras-chave representam um dos focos da análise bibliométrica atual (Urbizagástegui-Alvarado, 2022). Dessa forma, é viável observar os avanços da ciência e apontar periódicos, autores, regiões, instituições de ensino mais influentes sobre determinado assunto (Kaffash; Nguyen; Zhu, 2021).

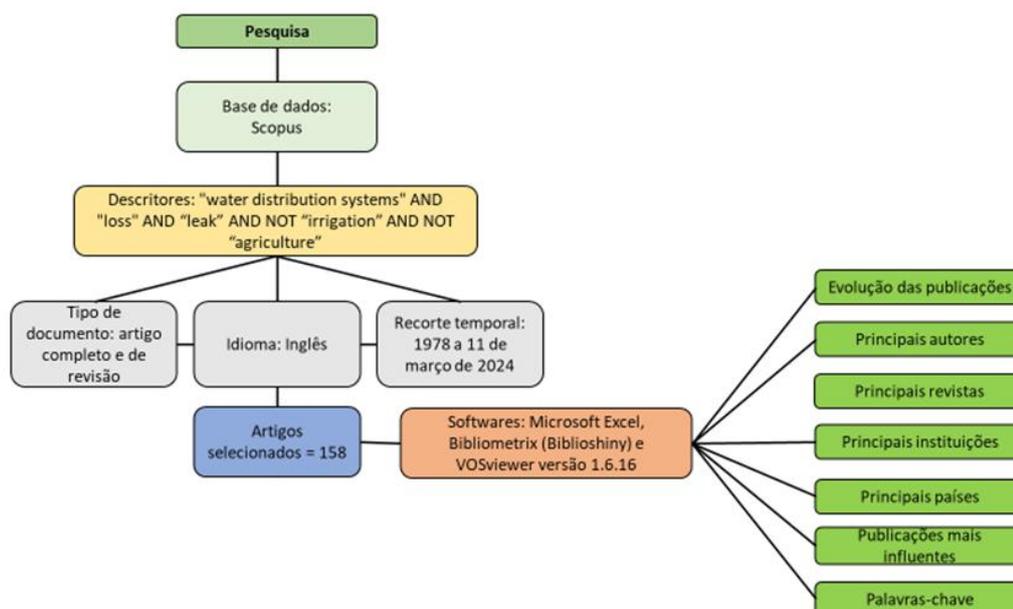
Posteriormente à definição da busca das palavras-chave com seus devidos operadores, foram obtidos os artigos da plataforma Scopus. Em seguida, por meio da ferramenta *Bibliometrix*, foram obtidos resultados para os principais indicadores bibliométricos. O *Bibliometrix*, como uma extensão do *software* R, e sua integração

com o pacote *Biblioshiny*, contém uma ampla gama de funções específicas para análise bibliométrica.

Essa ferramenta possibilita uma abordagem apropriada para a análise da produção científica, permitindo investigações abrangentes e detalhadas (Aria; Cuccurullo, 2017; Moreira; Guimarães; Tsunoda, 2020). Para confecção das redes de coocorrências das palavras-chave, foi utilizado o *software* VOSviewer versão 1.6.20. Além dessas ferramentas, foram utilizados procedimentos como conversão, tabulação e compilação dos dados obtidos.

Para a visualização mais clara do processo foi feito o *framework* da análise bibliométrica, sendo apresentada na Figura 17.

**Figura 17 - Framework da análise de bibliometria**

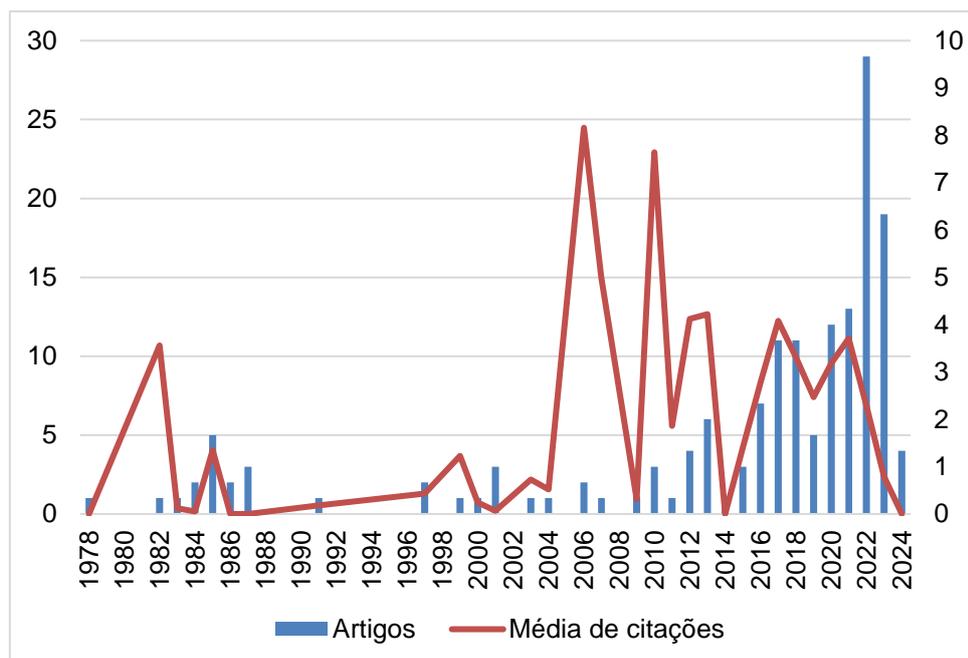


**Fonte:** elaboração própria.

#### 4. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Com as palavras-chave e com os devidos operadores booleanos na base Scopus, "water distribution systems" AND "loss" AND "leak" AND NOT "irrigation" AND NOT "agriculture", como já citado, foram encontrados 158 artigos no período de 1978 até 11 de março de 2024 (Figura 18).

**Figura 18** - Quantidade de artigos publicados entre 1978 e março de 2024



**Fonte:** elaboração própria.

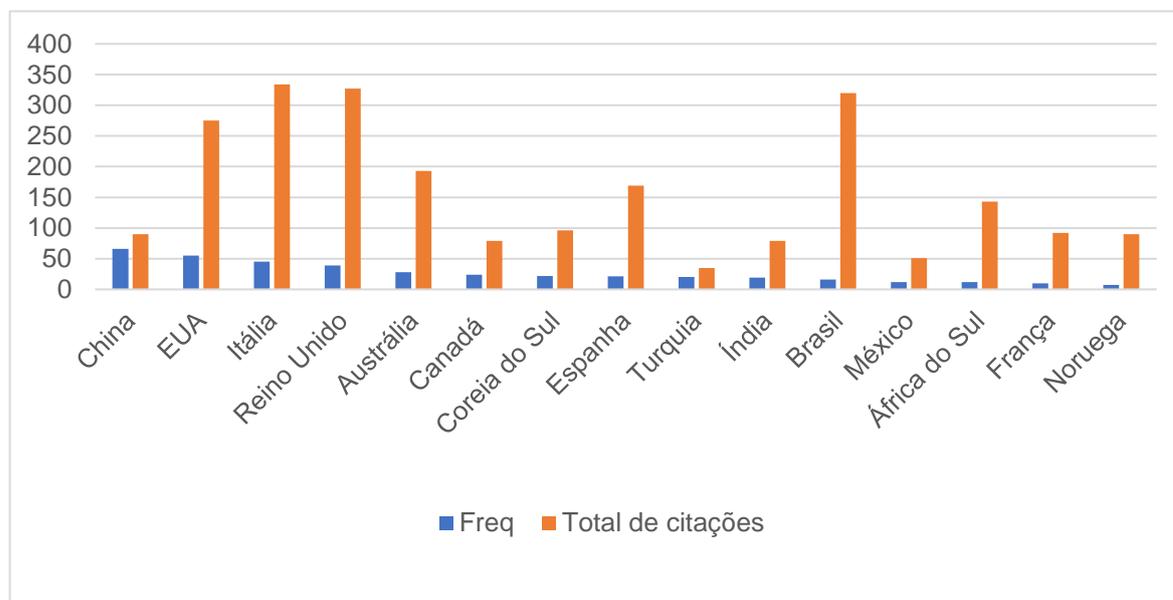
O primeiro artigo publicado corresponde a Kurkjian (1978) e descreve como as válvulas borboletas podem ser utilizadas de diversas formas, buscando obter um sistema de tubulação que opere suavemente as perdas de pressão e sem vazamentos.

Entre 1978 e 2016, o número de artigos publicados oscilou de 0 a 7 artigos. O período de 2017 a março de 2024 corresponde a 66,67% das publicações, o que mostra a notoriedade e interesse de pesquisas sobre o tema, neste período. O ápice de publicações ocorreu no ano de 2022, com 29 artigos.

A média de citações por ano sobre essa temática ficou em sua maioria na faixa de 0 a 5 citações por ano, as maiores médias por ano foram em 2006, com 8,16 e, em 2010, com 7,64.

Quanto à distribuição geográfica, 37 países publicaram artigos sobre essa temática. A Figura 19 apresenta os quinze países que mais produziram artigos sobre o tema e os respectivos números de citações.

**Figura 19** - Quantidade de artigos publicados nos 15 principais países



**Fonte:** elaboração própria.

Os países que apresentam o maior número de publicações em ordem decrescente são: China (66), Estados Unidos (55), Itália (45), Reino Unido (39) e Austrália (28). Já os países com maior número de citações foram: Itália (334), Reino Unido (327), Brasil (320), Estados Unidos (275) e Austrália (193).

As dez instituições que mais desenvolveram pesquisas sobre o assunto e os seus respectivos países estão ilustradas na Tabela 18.

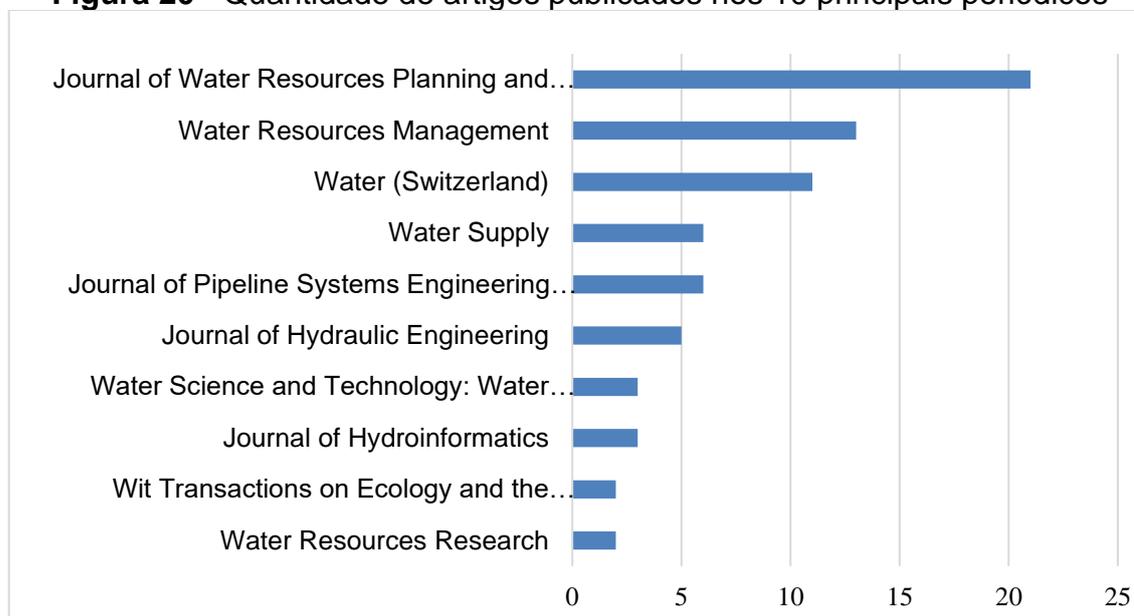
**Tabela 18** - Quantidade de artigos publicados pelas das 10 principais instituições

País	Universidade	Artigos
Austrália	University of Adelaide	15
China	Zhejiang University	15
Reino Unido	University of Sheffield	12
Itália	University of Perugia	10
Espanha	Universitat Politècnica de València	9
Itália	University of Brescia	9
Estados Unidos	Clemenson University	8
China	The Hong Kong Polytechnic University	8
África do Sul	Tshwane University of Technology	8
Tailândia	National Electronics and Computer Technology Center	7

**Fonte:** elaboração própria.

As dez principais instituições que publicaram sobre o assunto representam 26% dos documentos, sendo Universidade de Adelaide (15) na Austrália, Universidade de Zhejiang (15) na China e Universidade de Sheffield (12) no Reino Unido.

As publicações das dez principais instituições estão distribuídas em 80 periódicos, sendo os dez principais mostrados na Figura 20.

**Figura 20** - Quantidade de artigos publicados nos 10 principais periódicos

**Fonte:** elaboração própria.

Observa-se na Figura 20 que, dentre os dez periódicos selecionados, *Journal of Water Resources Planning and Management* apresentou 21 publicações, sendo o maior número de publicações no período considerado.

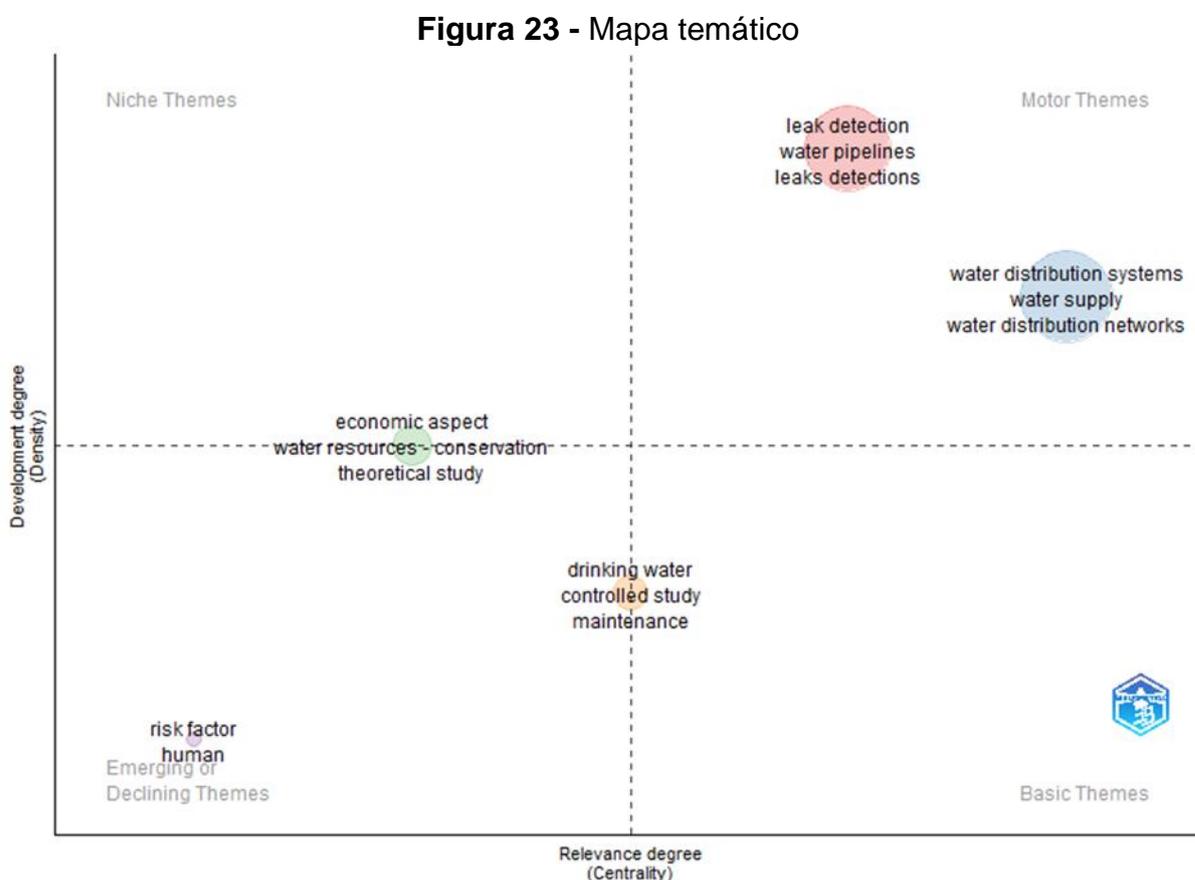




caminha a discussão desse tema que é detecção de vazamentos, qualidade da água, tratamento de água (amarelo).

A temática das perdas em sistemas de distribuição de água revela-se extremamente pertinente e necessária, fundamentando a relevância da pesquisa atual. Entre os anos de 2011 e 2012, a pesquisa estava fortemente vinculada ao abastecimento de água e à provisão desse recurso essencial à população. Na contemporaneidade, o foco do discurso desloca-se para as perdas de água em sistemas de distribuição, refletindo a mudança de preocupações. Isso se deve ao fato de que uma ampla parcela da população mundial já possui acesso à água, evidenciando que o desafio agora reside na minimização dessas perdas, bem como na manutenção e otimização dos sistemas distribuidores de água.

Além disso, a análise é reforçada pelo mapa temático. Este mapa apresenta uma matriz de temas relacionados aos sistemas distribuidores de água, dispostos de acordo com dois eixos principais: o grau de desenvolvimento (densidade) e a importância relativa dos temas (centralidade). Os temas são classificados em quatro quadrantes, como ilustrado na Figura 23.



Fonte: elaboração própria.

- Temas de Nicho (*Niche Themes*): Nesse quadrante estão dispostos os temas menos desenvolvidos e menos centrais, que podem representar áreas emergentes ou altamente específicas. Observa-se que nesse quadrante os Temas de Nicho (“*economic aspect*”, “*water resources conservation*” e “*theoretical study*”) intersectam-se com os Temas Emergentes ou em Declínio.
- Temas Emergentes ou em Declínio (*Emerging or Declining Themes*): Nesse quadrante estão dispostos os temas com baixa densidade, mas alta centralidade, indicando que, embora não sejam amplamente desenvolvidos, são de importância crescente ou em processo de declínio no campo de estudo. Os temas como “*risk factor*” e “*human*”, podem estar relacionados a novas pesquisas sobre os riscos humanos no contexto da gestão da água.
- Temas Básicos (*Basic Themes*): São temas altamente desenvolvidos, mas com menor centralidade. Eles formam a base do conhecimento do campo, mas podem não estar na vanguarda das pesquisas atuais. Nesse estudo em questão, os temas “*drinking water*”, “*controlled study*” e “*maintenance*”, são considerados fundamentais para a compreensão e gestão dos sistemas de distribuição de água.
- Temas Motor (*Motor Themes*): Nesse quadrante estão os temas que possuem tanto alta densidade quanto alta centralidade, representando as áreas-chave de pesquisa e desenvolvimento no campo. Pode-se observar no mapa, que os temas “*leak detection*”, “*water pipelines*”, “*leaks detections*”, “*water distribution systems*”, “*water supply*” e “*water distribution networks*” são exemplos de temas motores, indicando que eles são centrais para o estudo e avanço na gestão eficiente dos recursos hídricos.

Com a finalidade de verificar os autores que mais publicaram no período de 1978 até março de 2024 sobre o tema perdas em sistemas de distribuição de água, construiu-se a Tabela 19.

**Tabela 19 - Distribuição dos 10 principais autores**

<b>Autor</b>	<b>País</b>	<b>Artigos</b>	<b>Citações</b>
Narasimhan, S.	Estados Unidos	6	43
Firat, M.	Turquia	5	21
Boxall, J.	Reino Unido	4	50
Abid, M.	Tunísia	3	3
Beck, S. B. M.	Reino Unido	3	59
Brunone, B.	Itália	3	35
Butterfield, J. D.	Reino Unido	3	59
Collins, R. P.	Reino Unido	3	59
Lambert, M. F.	Austrália	3	39
Li, J.	China	3	3

**Fonte:** elaboração própria.

Entre os dez principais autores, 16,67% dos artigos estão vinculados ao Estados Unidos, 13,88% à Turquia e 36,11% ao Reino Unido, já os números de artigos da Itália e Austrália representam 8,33% para cada país. Os autores Narasimhan, S. (6), Firat, M. (5) e Boxall, J. (4) foram os que mais publicaram. Vale ressaltar que os autores Beck, S. B. M. (3), Butterfield, J. D. (3) e Collins, R. P. (3) publicaram juntos os mesmos três artigos. Porém, os artigos mais citados não pertencem a nenhum dos autores que mais publicaram sobre esse assunto, como pode ser observado na Tabela 20.

**Tabela 20 - Artigos mais citados**

<b>Autor/Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico</b>	<b>Citações</b>
Araujo, Ramos e Coelho (2006)	Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management	Water Resources Management	281
Germanopoulos (1985)	A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models	Civil Engineering Systems	244
Mounce, Boxall e Machell (2010)	Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows	Journal of Water Resources Planning and Management	191
Clark Stafford e Goodrich (1982)	Water distribution systems: a spatial and cost evaluation.	Journal of Water Resources Planning and Management	153
Wu Sage e Turtle (2010)	Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system	Journal of Water Resources Planning and Management	153
Britton, O'halloran e Stewart (2013)	Smart metering: Enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management	Journal of Cleaner Production	150

Fontana, Giugni e Portolano (2012)	Losses Reduction and Energy Production in Water Distribution Networks	Journal of Water Resources Planning and Management	140
Adedeji et al. (2017)	Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview	IEEE Access	126
Nygård et al. (2007)	Breaks and maintenance work in the water distribution systems and gastrointestinal illness: A cohort study	International Journal of Epidemiology	90
Farah e Shahrour (2017)	Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow	Water Resources Management	66

**Fonte:** elaboração própria.

Como observado anteriormente, o estudo bibliométrico abrangeu o período de 1978 a março de 2024, destacando um aumento significativo no número de publicações a partir de 2016 (Figura 20). Esse incremento pode ser atribuído, em parte, à implementação da Agenda 2030 em 2015, refletindo a crescente importância das preocupações ambientais globais. O ápice das publicações científicas sobre o tema foi registrado em 2022.

A análise bibliométrica identificou 466 autores envolvidos e resultou em 4625 referências. A taxa de crescimento anual foi calculada em 3,06%. Além disso, a colaboração internacional foi significativa, representando 17,72% das coautorias identificadas. O periódico *Journal of Water Resources Planning and Management* destacou como sendo o período que mais produziu sobre a temática, com as principais contribuições de Clark, Stafford e Goodrich (1982), Mounce, Boxall e Machell (2010), Wu, Sage e Turtle (2010) e Fontana, Giugni e Portolano (2012).

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação dos dois métodos selecionados (SAW e DEA) com os 65 municípios das Bacias PCJ, como já comentado na seção 3.2.2.

Foram conduzidas três rodadas: a primeira abrangeu os 65 municípios; a segunda foi realizada com os municípios com até 100 mil habitantes e a terceira incluiu os municípios com mais de 100 mil habitantes.

### 5.1. Aplicação do método Simples Ponderação Aditiva

Para a aplicação do método SAW foram definidos os indicadores a serem minimizados: IN049\_AE - Índice de Perdas na Distribuição, IN051\_AE - Índice de perdas por ligação e IN058\_AE - Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, e os indicadores a serem maximizados: IN011\_AE – Índice de macromedição e IN044\_AE - Índice de micromedição relativo ao consumo. A Tabela 21 destaca o *ranking* em ordem decrescente de eficiência, obtido com a aplicação do método SAW para os 65 municípios das Bacias PCJ.

**Tabela 21 - Ranking dos municípios das Bacias PCJ – Método SAW**

Cidade	Natureza jurídica	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE	Eficiência
Sapucaí-Mirim	Economia Mista	100	100	17,94	61,46	0,06	0,921
Mombuca	Economia Mista	100	100	13,23	67,37	1,19	0,874
Santa Maria da Serra	Administração Pública Direta	100	100	16,41	84,9	0,86	0,808
Joanópolis	Economia Mista	100	100	19,61	94,63	0,18	0,798
Pinhalzinho	Economia Mista	100	100	19,34	79,4	0,91	0,775
Bragança Paulista	Economia Mista	100	100	19,25	115,18	0,82	0,762
Elias Fausto	Economia Mista	100	100	19,93	106,41	1,16	0,755
Águas de São Pedro	Economia Mista	100	100	18,95	142,49	1,17	0,755
Campinas	Economia Mista	100	100	20,19	144,85	0,59	0,749
Limeira	Empresa Privada	100	100	20,19	128,82	1,19	0,746
Holambra	Empresa Privada	100	98,35	19,87	270,15	0,64	0,732
Vargem	Economia Mista	100	100	23,56	115,71	0,57	0,729
Morungaba	Economia Mista	100	100	22,93	119,12	1,06	0,726
Monte Mor	Economia Mista	100	100	25,02	135,79	0,29	0,727
Itupeva	Economia Mista	100	100	22,37	149,83	1,04	0,724
Serra Negra	Economia Mista	100	100	22,79	142,8	1,24	0,721
Santa Gertrudes	Empresa Privada	100	100	23,16	133,87	1,25	0,72

Saltinho	Economia Mista	100	100	23,91	129,27	0,94	0,718
Paulínia	Economia Mista	100	99,95	22,4	160,63	2,78	0,717
Ipeúna	Administração Pública Direta	100	100	24,02	129,05	1,98	0,713
Hortolândia	Economia Mista	100	100	26,17	162,44	0,31	0,714
Pedra Bela	Economia Mista	100	100	25,33	126,09	1,67	0,706
Jarinu	Economia Mista	100	99,97	26,05	136,17	0,77	0,704
Brotas	Autarquia	100	100	25,55	167,57	0,6	0,705
Anhembi	Economia Mista	100	100	26,93	128,4	0,74	0,702
Socorro	Economia Mista	100	100	27,73	163,64	0,72	0,691
Nazaré Paulista	Economia Mista	100	100	28,2	145,03	0,93	0,69
Cabreúva	Economia Mista	100	100	28,21	193,49	0,68	0,686
Itapeva	Economia Mista	100	100	30,66	134,69	1,05	0,68
Rafard	Administração Pública Direta	100	93,1	24,65	146,52	2,31	0,676
Vinhedo	Autarquia	99,65	99,85	28,59	222,58	1,04	0,677
Indaiatuba	Autarquia	100	100	29,76	222,16	0,9	0,673
Várzea Paulista	Economia Mista	100	99,99	30,74	203,08	0,82	0,672
Piracaia	Economia Mista	100	100	32,92	186,04	0,8	0,665
Itatiba	Economia Mista	100	99,86	31,51	241,54	0,81	0,665
Botucatu	Economia Mista	100	100	33,01	209,98	0,93	0,664
Campo Limpo Paulista	Economia Mista	100	100	33,04	205,87	1,41	0,662
Extrema	Economia Mista	99,96	100	33,78	244,13	0,76	0,66
Nova Odessa	Economia Mista	97	100	33,41	200,63	0,94	0,66
Toledo	Economia Mista	100	100	35,76	173,31	0,85	0,66
Mairiporã	Economia Mista	100	100	35,29	215,54	0,91	0,656
Cosmópolis	Administração Pública Direta	100	99,79	35,18	354,18	0,45	0,656
Jundiaí	Economia Mista	100	99,28	31,87	373,36	0,98	0,656
Louveira	Administração Pública Direta	100	97,46	31,47	271,52	0,99	0,654
Camanducaia	Economia Mista	99,99	100	37,19	224,69	0,61	0,654
Sumaré	Empresa Privada	98,08	99,98	35,45	256,3	1,02	0,649
Bom Jesus dos Perdões	Administração Pública Direta	100	100	39,76	234,97	1,06	0,641
Jaguariúna	Administração Pública Direta	90,37	100	36,78	339,34	0,91	0,634
Charqueada	Economia Mista	100	100	40,91	273,79	1,7	0,633
Amparo	Autarquia	100	96,63	40,45	287,69	0,72	0,626
Cordeirópolis	Autarquia	100	99,87	45,42	337,64	0,82	0,625
Analândia	Administração Pública Direta	100	88,89	50,55	59,66	2,65	0,623
Valinhos	Autarquia	96,97	100	44,24	401,85	0,89	0,622
Torrinha	Economia Mista	100	100	45,87	342,69	1,68	0,62
Atibaia	Autarquia	100	100	49,5	476,84	0,71	0,616
Santa Bárbara D Oeste	Autarquia	100	100	54,14	532,8	0,42	0,616

Tuiuti	Empresa Privada	99,94	100	48,89	356,06	1,44	0,615
Mogi Mirim	Autarquia	100	100	50,82	445,04	0,73	0,615
Americana	Autarquia	100	100	53,31	589,9	0,8	0,608
Piracicaba	Autarquia	100	100	53,93	598,13	1,02	0,605
Itu	Autarquia	99,06	100	56,71	506,89	0,78	0,604
Tietê	Autarquia	100	99,98	56,36	543,34	1,32	0,601
Capivari	Autarquia	100	100	75,39	1369,92	0,43	0,591
Rio Claro	Autarquia	100	73,62	30,84	271,94	0,79	0,561
Santo Antônio de Posse	Administração Pública Direta	56,67	87,39	43,33	327,47	1,19	0,528

**Fonte:** elaboração própria.

Ao examinar os indicadores de desempenho, como IN049\_AE e IN051\_AE, surgem variações significativas. Por exemplo, cidades como Santa Bárbara d'Oeste (532,8) e Piracicaba (598,13) apresentam valores elevados no IN051\_AE. Em contraste, a cidade de Santo Antônio de Posse apresenta um desempenho inferior em vários indicadores, o que pode indicar desafios em sua administração pública ou em sua estrutura econômica.

O *ranking*, que varia de 0,528 a 0,921, evidencia a disparidade entre as cidades. Sapucaí-Mirim lidera o *ranking*, enquanto Santo Antônio de Posse apresenta o pior desempenho. Um dos fatores que pode explicar essa discrepância é o fato natureza jurídica da operadora de saneamento da cidade. Em geral, municípios com operadoras de saneamento com a natureza jurídica Economia Mista têm um melhor desempenho quando comparado àqueles com Administração Pública Direta, como é o caso do município de Santo Antônio de Posse, enquanto Sapucaí-Mirim enquadra-se com a Economia Mista.

A diversidade nos resultados do *ranking* destaca a importância de abordagens específicas para cada cidade. Intervenções direcionadas podem ser necessárias para melhorar a eficiência dos serviços públicos, especialmente nas cidades que estão com desempenho abaixo da média (0,681). Assim, as informações contidas na Tabela 21 podem servir como base para políticas públicas e iniciativas que visem ao desenvolvimento regional e à melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

A Tabela 22 mostra o *ranking* em ordem decrescente de eficiência, obtido com a aplicação do método SAW para as cidades com até 100 mil habitantes.

**Tabela 22 - Ranking dos municípios até 100 mil habitantes - Método SAW**

<b>Cidade</b>	<b>IN011_AE</b>	<b>IN044_AE</b>	<b>IN049_AE</b>	<b>IN051_AE</b>	<b>IN058_AE</b>	<b>Eficiência</b>
Sapucaí-Mirim	100	100	17,94	61,46	0,06	0,921
Mombuca	100	100	13,23	67,37	1,19	0,874
Santa Maria da Serra	100	100	16,41	84,9	0,86	0,808
Joanópolis	100	100	19,61	94,63	0,18	0,798
Pinhalzinho	100	100	19,34	79,4	0,91	0,775
Águas de São Pedro	100	100	18,95	142,49	1,17	0,755
Elias Fausto	100	100	19,93	106,41	1,16	0,755
Holambra	100	98,35	19,87	270,15	0,64	0,732
Vargem	100	100	23,56	115,71	0,57	0,729
Monte Mor	100	100	25,02	135,79	0,29	0,727
Morungaba	100	100	22,93	119,12	1,06	0,726
Itupeva	100	100	22,37	149,83	1,04	0,724
Serra Negra	100	100	22,79	142,8	1,24	0,721
Santa Gertrudes	100	100	23,16	133,87	1,25	0,720
Saltinho	100	100	23,91	129,27	0,94	0,718
Ipeúna	100	100	24,02	129,05	1,98	0,713
Pedra Bela	100	100	25,33	126,09	1,67	0,706
Brotas	100	100	25,55	167,57	0,6	0,705
Jarinu	100	99,97	26,05	136,17	0,77	0,704
Anhembi	100	100	26,93	128,4	0,74	0,702
Socorro	100	100	27,73	163,64	0,72	0,691
Nazaré Paulista	100	100	28,2	145,03	0,93	0,690
Cabreúva	100	100	28,21	193,49	0,68	0,686
Itapeva	100	100	30,66	134,69	1,05	0,680
Vinhedo	99,65	99,85	28,59	222,58	1,04	0,677
Rafard	100	93,1	24,65	146,52	2,31	0,676
Piracaia	100	100	32,92	186,04	0,8	0,665
Campo Limpo Paulista	100	100	33,04	205,87	1,41	0,659
Extrema	99,96	100	33,78	244,13	0,76	0,658
Nova Odessa	97	100	33,41	200,63	0,94	0,658
Toledo	100	100	35,76	173,31	0,85	0,657
Cosmópolis	100	99,79	35,18	354,18	0,45	0,654
Mairiporã	100	100	35,29	215,54	0,91	0,654
Louveira	100	97,46	31,47	271,52	0,99	0,652
Camanducaia	99,99	100	37,19	224,69	0,61	0,651
Bom Jesus dos Perdões	100	100	39,76	234,97	1,06	0,639
Jaguariúna	90,37	100	36,78	339,34	0,91	0,632
Charqueada	100	100	40,91	273,79	1,7	0,631
Amparo	100	96,63	40,45	287,69	0,72	0,623

Cordeirópolis	100	99,87	45,42	337,64	0,82	0,623
Torrinha	100	100	45,87	342,69	1,68	0,618
Analândia	100	88,89	50,55	59,66	2,65	0,617
Tuiuti	99,94	100	48,89	356,06	1,44	0,613
Mogi Mirim	100	100	50,82	445,04	0,73	0,613
Tietê	100	99,98	56,36	543,34	1,32	0,599
Capivari	100	100	75,39	1369,92	0,43	0,589
Santo Antônio de Posse	56,67	87,39	43,33	327,47	1,19	0,527

**Fonte:** elaboração própria.

Os indicadores de desempenho IN049\_AE e IN051\_AE mostram-se uma significativa variabilidade, especialmente nas cidades com maior eficiência, como Sapucaí-Mirim (0,921) e Mombuca (0,874). Essas cidades não apenas mantêm baixos índices de perdas na distribuição e por ligação, como também demonstram melhor desempenho nos indicadores de eficiência, o que sugere uma gestão mais eficaz. Por outro lado, Santo Antônio de Posse, com a menor eficiência (0,527), apresenta valores não adequados, indicando desafios na gestão ou na implementação de políticas públicas.

A Tabela 23 apresenta o *ranking* em ordem decrescente de eficiência, dos municípios com mais de 100 mil habitantes.

**Tabela 23 - Ranking dos municípios com mais de 100 mil habitantes - Método SAW**

Cidade	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE	Eficiência
Bragança Paulista	100	100	19,25	115,18	0,82	0,923
Campinas	100	100	20,19	144,85	0,59	0,914
Hortolândia	100	100	26,17	162,44	0,31	0,904
Limeira	100	100	20,19	128,82	1,19	0,887
Paulínia	100	99,95	22,4	160,63	2,78	0,829
Várzea Paulista	100	99,99	30,74	203,08	0,82	0,785
Indaiatuba	100	100	29,76	222,16	0,9	0,784
Itatiba	100	99,86	31,51	241,54	0,81	0,775
Botucatu	100	100	33,01	209,98	0,93	0,766
Jundiaí	100	99,28	31,87	373,36	0,98	0,751
Sumaré	98,08	99,98	35,45	256,3	1,02	0,741
Santa Bárbara D Oeste	100	100	54,14	532,8	0,42	0,728
Valinhos	96,97	100	44,24	401,85	0,89	0,704
Atibaia	100	100	49,5	476,84	0,71	0,701
Americana	100	100	53,31	589,9	0,8	0,684
Itu	99,06	100	56,71	506,89	0,78	0,680
Piracicaba	100	100	53,93	598,13	1,02	0,672

Rio Claro	100	73,62	30,84	271,94	0,79	0,668
-----------	-----	-------	-------	--------	------	-------

**Fonte:** elaboração própria.

Com uma média de eficiência de aproximadamente 0,772 e um desvio padrão de 0,086, a maioria das cidades com mais de 100 mil habitantes demonstra um desempenho eficiente na gestão de recursos e serviços públicos. Bragança Paulista (0,923) e Campinas (0,914) destacam-se com os índices mais elevados de eficiência, o que sugere possuírem uma administração eficaz e uma boa alocação de recursos.

Por outro lado, Rio Claro (0,668), Piracicaba (0,672) e Itu (0,680) apresentam índices de eficiência abaixo da média, indicando que existem desafios significativos em suas gestões.

Em resumo, a análise quantitativa dos dados, utilizando o método SAW, revela que a eficiência na gestão e na utilização de recursos hídricos varia significativamente entre as cidades. Isso ressalta a necessidade de intervenções específicas para melhorar a eficiência nas cidades com desempenho inferior, além de reforçar a importância de práticas sustentáveis de gestão da água. Medidas direcionadas podem ser cruciais para reduzir perdas e garantir uma distribuição equitativa e eficaz dos recursos hídricos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável das comunidades.

## 5.2. Aplicação do método Análise Envoltória de Dados

Para as três rodadas da DEA, foi utilizado o modelo BCC orientado a entradas (UQ, 2025). Como entradas consideraram-se: IN049\_AE - Índice de Perdas na Distribuição, IN051\_AE - Índice de perdas por ligação e IN058\_AE - Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Enquanto, as saídas foram: IN011\_AE – Índice de macromedição e IN044\_AE - Índice de micromedição relativo ao consumo. O modelo BCC orientado a entradas, visa a determinar o quanto as entradas de uma DMU podem ser reduzidas, mantendo-se os mesmos níveis de saídas, para que a DMU se torne eficiente. Os resultados da rodada com os 65 municípios em ordem decrescente de eficiência são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24 - Ranking dos municípios das Bacias PCJ - Método DEA**

Município	Natureza Jurídica	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE	Eficiência
Analândia	Administração Pública Direta	100	88,89	50,55	59,66	2,65	1
Mombuca	Economia Mista	100	100	13,23	67,37	1,19	1
Sapucaí-Mirim	Economia Mista	100	100	17,94	61,46	0,06	1
Santa Maria da Serra	Administração Pública Direta	100	100	16,41	84,9	0,86	0,91
Joanópolis	Economia Mista	100	100	19,61	94,63	0,18	0,893
Pinhalzinho	Economia Mista	100	100	19,34	79,4	0,91	0,81
Holambra	Empresa Privada	100	98,35	19,87	270,15	0,64	0,807
Campinas	Economia Mista	100	100	20,19	144,85	0,59	0,803
Bragança Paulista	Economia Mista	100	100	19,25	115,18	0,82	0,802
Águas de São Pedro	Economia Mista	100	100	18,95	142,49	1,17	0,763
Elias Fausto	Economia Mista	100	100	19,93	106,41	1,16	0,735
Limeira	Empresa Privada	100	100	20,19	128,82	1,19	0,723
Vargem	Economia Mista	100	100	23,56	115,71	0,57	0,701
Monte Mor	Economia Mista	100	100	25,02	135,79	0,29	0,694
Itupeva	Economia Mista	100	100	22,37	149,83	1,04	0,681
Morungaba	Economia Mista	100	100	22,93	119,12	1,06	0,665
Hortolândia	Economia Mista	100	100	26,17	162,44	0,31	0,662
Saltinho	Economia Mista	100	100	23,91	129,27	0,94	0,654
Serra Negra	Economia Mista	100	100	22,79	142,8	1,24	0,651
Brotas	Autarquia	100	100	25,55	167,57	0,6	0,648
Santa Gertrudes	Empresa Privada	100	100	23,16	133,87	1,25	0,641
Jarinu	Economia Mista	100	99,97	26,05	136,17	0,77	0,622
Anhembi	Economia Mista	100	100	26,93	128,4	0,74	0,606
Socorro	Economia Mista	100	100	27,73	163,64	0,72	0,592
Paulínia	Economia Mista	100	99,95	22,4	160,63	2,78	0,591
Cabreúva	Economia Mista	100	100	28,21	193,49	0,68	0,586
Nazaré Paulista	Economia Mista	100	100	28,2	145,03	0,93	0,567
Ipeúna	Administração Pública Direta	100	100	24,02	129,05	1,98	0,564
Pedra Bela	Economia Mista	100	100	25,33	126,09	1,67	0,563
Vinhedo	Autarquia	99,65	99,85	28,59	222,58	1,04	0,552
Indaiatuba	Autarquia	100	100	29,76	222,16	0,9	0,543
Rafard	Administração Pública Direta	100	93,1	24,65	146,52	2,31	0,537
Rio Claro	Autarquia	100	73,62	30,84	271,94	0,79	0,533
Várzea Paulista	Economia Mista	100	99,99	30,74	203,08	0,82	0,533
Itatiba	Economia Mista	100	99,86	31,51	241,54	0,81	0,521
Itapeva	Economia Mista	100	100	30,66	134,69	1,05	0,519

Louveira	Administração Pública Direta	100	97,46	31,47	271,52	0,99	0,511
Jundiaí	Economia Mista	100	99,28	31,87	373,36	0,98	0,506
Piracaia	Economia Mista	100	100	32,92	186,04	0,8	0,502
Botucatu	Economia Mista	100	100	33,01	209,98	0,93	0,493
Extrema	Economia Mista	99,96	100	33,78	244,13	0,76	0,492
Cosmópolis	Administração Pública Direta	100	99,79	35,18	354,18	0,45	0,491
Nova Odessa	Economia Mista	97	100	33,41	200,63	0,94	0,487
Campo Limpo Paulista	Economia Mista	100	100	33,04	205,87	1,41	0,467
Mairiporã	Economia Mista	100	100	35,29	215,54	0,91	0,465
Toledo	Economia Mista	100	100	35,76	173,31	0,85	0,463
Camanducaia	Economia Mista	99,99	100	37,19	224,69	0,61	0,458
Sumaré	Empresa Privada	98,08	99,98	35,45	256,3	1,02	0,458
Jaguariúna	Administração Pública Direta	90,37	100	36,78	339,34	0,91	0,448
Amparo	Autarquia	100	96,63	40,45	287,69	0,72	0,419
Bom Jesus dos Perdões	Administração Pública Direta	100	100	39,76	234,97	1,06	0,412
Charqueada	Economia Mista	100	100	40,91	273,79	1,7	0,379
Valinhos	Autarquia	96,97	100	44,24	401,85	0,89	0,379
Santo Antônio de Posse	Administração Pública Direta	56,67	87,39	43,33	327,47	1,19	0,377
Cordeirópolis	Autarquia	100	99,87	45,42	337,64	0,82	0,372
Atibaia	Autarquia	100	100	49,5	476,84	0,71	0,347
Torrinha	Economia Mista	100	100	45,87	342,69	1,68	0,344
Mogi Mirim	Autarquia	100	100	50,82	445,04	0,73	0,338
Tuiuti	Empresa Privada	99,94	100	48,89	356,06	1,44	0,331
Santa Bárbara D Oeste	Autarquia	100	100	54,14	532,8	0,42	0,325
Americana	Autarquia	100	100	53,31	589,9	0,8	0,321
Piracicaba	Autarquia	100	100	53,93	598,13	1,02	0,313
Itu	Autarquia	99,06	100	56,71	506,89	0,78	0,303
Tietê	Autarquia	100	99,98	56,36	543,34	1,32	0,294
Capivari	Autarquia	100	100	75,39	1369,92	0,43	0,236

**Fonte:** elaboração própria.

A Tabela 24 reflete a eficiência com que cada município utiliza seus recursos, sendo que valores próximos a 1,00 indicam alta eficiência, enquanto valores mais baixos indicam cidades menos eficientes quanto aos indicadores selecionados.

Na análise das pontuações, observa-se uma ampla variação entre os municípios. A título de exemplo, Capivari, com uma pontuação de 0,236, é identificado

como o município menos eficiente. Em contraste, municípios como Analândia, Mombuca e Sapucaí-Mirim alcançaram a pontuação máxima de 1,00. A análise quantitativa da Tabela 24 revela uma variação significativa nas pontuações de eficiência entre os municípios, com valores que vão de 0,236 a 1.

Quando observado a distribuição das pontuações, é notável que apenas três municípios (Analândia, Mombuca e Sapucaí-Mirim) atingiram a pontuação máxima, o que representa 4,6% do total. Por outro lado, 26 municípios apresentaram pontuações inferiores a 0,5, evidenciando-se uma proporção considerável de cidades que não utilizam seus recursos de maneira eficiente. Essa concentração de 26 municípios, com desempenho inferior, sugere a necessidade de intervenções focadas para incrementar a eficiência em áreas específicas.

A Tabela 25 apresenta o *ranking* em ordem decrescente de eficiência, dos municípios com até 100 mil habitantes.

**Tabela 25 – Ranking dos municípios com até 100 mil habitantes - Método DEA**

Município	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE	Eficiência
Analândia	100	88,89	50,55	59,66	2,65	1,000
Mombuca	100	100	13,23	67,37	1,19	1,000
Sapucaí-Mirim	100	100	17,94	61,46	0,06	1,000
Santa Maria da Serra	100	100	16,41	84,9	0,86	0,910
Joanópolis	100	100	19,61	94,63	0,18	0,893
Pinhalzinho	100	100	19,34	79,4	0,91	0,810
Holambra	100	98,35	19,87	270,15	0,64	0,807
Águas de São Pedro	100	100	18,95	142,49	1,17	0,763
Elias Fausto	100	100	19,93	106,41	1,16	0,735
Vargem	100	100	23,56	115,71	0,57	0,701
Monte Mor	100	100	25,02	135,79	0,29	0,694
Itupeva	100	100	22,37	149,83	1,04	0,681
Morungaba	100	100	22,93	119,12	1,06	0,665
Saltinho	100	100	23,91	129,27	0,94	0,654
Serra Negra	100	100	22,79	142,8	1,24	0,651
Brotas	100	100	25,55	167,57	0,6	0,649
Santa Gertrudes	100	100	23,16	133,87	1,25	0,641
Jarinu	100	99,97	26,05	136,17	0,77	0,622
Anhembi	100	100	26,93	128,4	0,74	0,606
Socorro	100	100	27,73	163,64	0,72	0,592
Cabreúva	100	100	28,21	193,49	0,68	0,586
Nazaré Paulista	100	100	28,2	145,03	0,93	0,567
Ipeúna	100	100	24,02	129,05	1,98	0,564

Pedra Bela	100	100	25,33	126,09	1,67	0,563
Vinhedo	99,65	99,85	28,59	222,58	1,04	0,553
Rafard	100	93,1	24,65	146,52	2,31	0,537
Itapeva	100	100	30,66	134,69	1,05	0,519
Louveira	100	97,46	31,47	271,52	0,99	0,511
Piracaia	100	100	32,92	186,04	0,8	0,502
Extrema	99,96	100	33,78	244,13	0,76	0,492
Cosmópolis	100	99,79	35,18	354,18	0,45	0,491
Nova Odessa	97	100	33,41	200,63	0,94	0,487
Campo Limpo Paulista	100	100	33,04	205,87	1,41	0,467
Mairiporã	100	100	35,29	215,54	0,91	0,465
Toledo	100	100	35,76	173,31	0,85	0,463
Camanducaia	99,99	100	37,19	224,69	0,61	0,458
Jaguariúna	90,37	100	36,78	339,34	0,91	0,448
Amparo	100	96,63	40,45	287,69	0,72	0,419
Bom Jesus dos Perdões	100	100	39,76	234,97	1,06	0,412
Charqueada	100	100	40,91	273,79	1,7	0,379
Santo Antônio de Posse	56,67	87,39	43,33	327,47	1,19	0,377
Cordeirópolis	100	99,87	45,42	337,64	0,82	0,373
Torrinha	100	100	45,87	342,69	1,68	0,344
Mogi Mirim	100	100	50,82	445,04	0,73	0,338
Tuiuti	99,94	100	48,89	356,06	1,44	0,331
Tietê	100	99,98	56,36	543,34	1,32	0,294
Capivari	100	100	75,39	1369,92	0,43	0,236

**Fonte:** elaboração própria.

As pontuações da Tabela 25 variam de 0,236 (Capivari) a 1,00 (Analândia, Mombuca e Sapucaí-Mirim), o que indica uma ampla gama de eficiência entre as cidades.

A distribuição das pontuações mostra que apenas três municípios alcançaram a pontuação máxima de 1,00, representando cerca de 6,38% do total analisado. Por outro lado, 26 cidades têm pontuações inferiores à média (0,580), indicando que uma proporção considerável de municípios apresenta ineficiências significativas. Entre as cidades com as pontuações mais baixas se destacam, Capivari, Tietê e Tuiuti.

A análise da variação das pontuações revela um intervalo de 0,765 entre a cidade menos eficiente (Capivari) e a mais eficiente (Analândia, Mombuca e Sapucaí-Mirim). Esse resultado indica uma disparidade acentuada na eficiência entre os municípios, o que pode ser atribuída a fatores como gestão administrativa, infraestrutura disponível e acesso a recursos. Além disso, a presença de municípios

como Holambra e Joanópolis, com pontuações de 0,807 e 0,893, respectivamente, sugere que práticas de gestão bem-sucedidas podem ser observadas e potencialmente replicadas em outras cidades menos eficientes.

A aplicação do modelo DEA para a avaliação da eficiência municipal permite identificar áreas críticas que necessitam de atenção. A comparação entre as cidades fornece uma base sólida para a formulação de políticas públicas e estratégias de desenvolvimento. Municípios com pontuações mais baixas podem se beneficiar da análise das melhores práticas adotadas por aqueles com desempenho superior, promovendo um aprendizado organizacional que pode resultar em melhorias na eficiência e na gestão dos recursos disponíveis.

Os resultados da DEA para os municípios com mais de 100 mil habitantes são apresentados na Tabela 26, em ordem decrescente de eficiência.

**Tabela 26 - Ranking dos municípios com mais de 100 mil habitantes - Método DEA**

Município	IN011_AE	IN044_AE	IN049_AE	IN051_AE	IN058_AE	Eficiência
Bragança Paulista	100	100	19,25	115,18	0,82	1,000
Campinas	100	100	20,19	144,85	0,59	1,000
Hortolândia	100	100	26,17	162,44	0,31	1,000
Limeira	100	100	20,19	128,82	1,19	0,953
Paulínia	100	99,95	22,4	160,63	2,78	0,859
Santa Bárbara D Oeste	100	100	54,14	532,8	0,42	0,738
Várzea Paulista	100	99,99	30,74	203,08	0,82	0,700
Rio Claro	100	73,62	30,84	271,94	0,79	0,687
Indaiatuba	100	100	29,76	222,16	0,9	0,676
Itatiba	100	99,86	31,51	241,54	0,81	0,672
Botucatu	100	100	33,01	209,98	0,93	0,653
Jundiaí	100	99,28	31,87	373,36	0,98	0,630
Sumaré	98,08	99,98	35,45	256,3	1,02	0,573
Valinhos	96,97	100	44,24	401,85	0,89	0,518
Atibaia	100	100	49,5	476,84	0,71	0,507
Americana	100	100	53,31	589,9	0,8	0,466
Itu	99,06	100	56,71	506,89	0,78	0,447
Piracicaba	100	100	53,93	598,13	1,02	0,433

**Fonte:** elaboração própria.

Observa-se na Tabela 26 que as pontuações variam de 0,433 (Piracicaba) a 1 (Bragança Paulista, Campinas e Hortolândia), com uma média geral de 0,695 e um

desvio-padrão de 0,195. Essa média indica que, de forma geral, as cidades estão aproximando-se de um nível de eficiência relativamente alto, embora ainda haja espaço para melhorias em localidades com pontuações abaixo da média, como Piracicaba, Itu e Americana.

A concentração de cidades com desempenho elevado, como Paulínia (0,859) e Limeira (0,953), sugere que essas localidades estão utilizando seus recursos de maneira eficaz, refletindo boas práticas de gestão e infraestrutura. Em contraste, as cidades com pontuações mais baixas, como Piracicaba (0,433) e Itu (0,447) podem se beneficiar de análises aprofundadas para identificar as causas subjacentes de sua ineficiência.

O intervalo entre a pontuação mais baixa (0,433) e a mais alta (1,00) é de 0,567, o que aponta para uma disparidade considerável na eficiência entre as cidades avaliadas. Essa variação pode ser atribuída a diferentes fatores, como a capacidade de gestão pública, o investimento em infraestrutura e a alocação de recursos. A presença de municípios como Rio Claro (0,687) e Várzea Paulista (0,700), que estão próximos da média, indica que há um potencial para melhorias, especialmente se adotarem práticas observadas nas cidades mais eficientes.

A análise das pontuações de eficiência fornece uma base para a formulação de políticas públicas e estratégias de desenvolvimento. Cidades com desempenho inferior podem inspirar-se em exemplos de sucesso, como ocorre em Bragança Paulista e em Campinas, para implementar melhorias em suas operações.

O mesmo ocorre com municípios que apresentam eficiência acima da média, como Santa Bárbara d'Oeste e Paulínia, ao promover a troca de boas práticas e o aprendizado organizacional entre as localidades, contribuindo para um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável.

A análise dos dados sugere que fatores como investimentos em infraestrutura, formação de gestão pública e políticas locais podem influenciar diretamente essas pontuações, criando um ambiente propício para eficiências em algumas áreas e otimizando os resultados em outras.

A troca de experiências e a adoção de estratégias eficientes podem promover uma melhoria geral na gestão pública e na utilização de recursos, contribuindo para um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável entre os municípios analisados.

Por fim, a análise quantitativa das pontuações de eficiência não apenas fornece *insights* sobre o desempenho das cidades, bem como serve como base para o desenvolvimento de políticas públicas.

### 5.3. Síntese da aplicação dos dois métodos

A aplicação dos métodos *Simple Additive Weighting* (SAW) e *Data Envelopment Analysis* (DEA), no contexto das perdas de água em sistemas de abastecimento dos municípios das Bacias PCJ, oferece uma abordagem robusta e multidimensional para a avaliação da eficiência da perda hídrica. A análise realizada nesta seção para ambos os métodos, SAW e DEA, refere-se à rodada dos 65 municípios.

A DEA é um modelo de otimização que avalia a eficiência relativa de unidades de decisão, neste caso, municípios das Bacias PCJ, com base em múltiplas entradas e saídas. O SAW, por outro lado, é um método de decisão multicritério que agrega diferentes critérios em uma única pontuação, permitindo, desta forma, uma comparação mais direta. A comparação dos resultados dos dois métodos para cada município proporciona uma visão abrangente da eficiência em diferentes contextos.

Ao observar os resultados, é evidente que os valores de eficiência variam entre os dois métodos. Em geral, os municípios frequentemente apresentam pontuações mais altas no SAW em comparação ao método DEA. A título de exemplo, enquanto o município de Capivari apresenta uma pontuação na DEA de 0,236, sua pontuação no SAW é significativamente maior, 0,591.

Isso sugere que, embora a eficiência técnica possa ser baixa segundo a DEA, o desempenho em termos de critérios ponderados, como IN011\_AE – Índice de macromedição, IN049\_AE - Índice de Perdas na Distribuição, IN051\_AE - Índice de perdas por ligação e IN058\_AE - Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água e IN044\_AE - Índice de micromedição relativo ao consumo, são analisados como mais positivo no SAW.

O município de Analândia apresenta um contraste significativo entre os dois métodos na rodada para os 65 municípios, no contexto das perdas em SAA. Enquanto a DEA atribui à Analândia uma pontuação máxima de 1,00, indicando uma eficiência técnica exemplar na gestão dos recursos hídricos, a pontuação de 0,623 no SAW revela ineficiências na abordagem adotada para o mesmo problema.

Essa discrepância indica que, embora o município destaque-se em alguns indicadores no método DEA, já no método SAW este município pode revelar ineficiências na minimização de perdas.

Ressalta-se a importância de uma abordagem integrada que combine os *insights* de ambos os modelos matemáticos utilizados nesta pesquisa, visando a uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos.

Assim, é essencial considerar as diferentes abordagens técnicas de cada método para identificar e implementar melhorias significativas no sistema de abastecimento, garantindo a utilização mais eficiente dos recursos disponíveis.

Essa análise ressalta a importância de considerar fatores como a estrutura administrativa e a flexibilidade operacional ao abordar a eficiência na gestão de recursos hídricos, sugerindo que modelos híbridos, como os de Economia Mista, podem oferecer soluções inovadoras e mais eficazes para os desafios hídricos enfrentados nas Bacias PCJ.

A presença de aglomerados subnormais em municípios como Atibaia, Sumaré, Piracicaba e Jundiaí contribui significativamente para o aumento das perdas de água, possivelmente devido à alta incidência de ligações clandestinas e fraudes, resultando em perdas físicas e aparentes. Enquanto na cidade de Louveira, de pequeno porte e de administração pública direta, observou-se alto nível de perda de água, possivelmente devido à precariedade dos hidrômetros (Santi, 2018).

A análise dos dados dos métodos SAW e DEA revela que a percepção da eficiência do sistema de abastecimento é média na cidade de Indaiatuba (0,543). Em relação aos municípios com desempenhos superiores, Joanópolis (0,893) e Limeira (0,723) ao cruzar os valores de eficiência com o número de práticas de controle abordadas por Santi (2018), observa-se que Joanópolis adota 46 práticas das 54, Limeira aplica 100% das práticas.

Ressalta-se que algumas cidades das Bacias PCJ promovem ações educativas que envolvem a população, gerando uma cultura de preservação e uso consciente da água, o que reflete diretamente na eficiência do sistema de abastecimento.

As práticas mais importantes para o controle de perdas de água incluem o treinamento da equipe de leitura, que é fundamental para garantir a qualidade na execução e na antecipação de problemas relacionados a fraudes. Além disso, inspeções regulares de ligações suspeitas e análise do histórico de consumo são essenciais para identificar inconsistências. A definição de metas claras para a redução

das perdas e a atualização regular do cadastro de usuários contribuem para melhor gerenciamento das ligações clandestinas. A adoção de um planejamento estratégico e o investimento em tecnologias de controle também devem ser usados para melhorar a eficiência e a eficácia das utilidades na gestão de água, promovendo um desempenho superior (Santi; Cetrulo; Malheiros, 2021).

A Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A, SANASA (2023), destaca algumas ações de combate às perdas reais e aparentes. As principais ações para combater as perdas reais e aparentes são apresentadas no Quadro 9.

**Quadro 9** - Ações de combate às perdas de água em sistemas de abastecimento

<b>Ações de base</b>	<b>Ações Indiretas de Controle e Redução Perdas</b>	<b>Ações Diretas de Controle e Redução Perdas</b>
Cadastro Técnico	Setorização	Micromedição
Tecnologia da Informação (TI)	Macromedição	Combate às irregularidades nas Ligações de Água
Telemetria/Telecomando – Automação	Monitoramento de Parâmetros Hidráulicos Vazão e Pressão	Manutenção
	Modelagem Hidráulica para Combate às Perdas Físicas	Controle de Pressão
	Pesquisa de Vazamentos	Readequação da Infraestrutura
	Qualidade de Materiais, Equipamentos e Obras	Ensaio de Estanqueidade

**Fonte:** elaboração própria a partir da SANASA (2023).

As principais ações de base combativas e respaldadas são Telemetria/Telecomando, uma tecnologia que permite monitorar e controlar válvulas dentro do sistema de distribuição a partir de uma sala de comando, ou seja, à distância; o uso da Tecnologia da Informação (TI); a aplicação de Inteligência Artificial (IA) e o uso de modelos matemáticos podem ajudar a definir a posição ideal de sensores nas tubulações dos sistemas de distribuição de água. Essa abordagem pode

auxiliar na detecção de vazamentos de água e, conseqüentemente, na redução da perda de água não faturada.

O desenvolvimento e a implementação de sistemas baseados em IA e Redes Neurais estão realizando um papel fundamental na detecção e localização de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Mounce, Boxall e Machell (2010) são pioneiros nesse campo, ao utilizarem redes neurais e IA para criar um sistema *online* capaz de identificar fluxos anormais e vazamentos. Esse avanço na gestão de perdas de água não apenas demonstrou os benefícios dessas tecnologias na detecção de vazamentos, como também melhorou significativamente a eficiência operacional das redes de distribuição de água.

Britton, O'halloran e Stewart (2013) conduziram um estudo sobre a implementação de uma tecnologia de medição inteligente em Hervey Bay, Austrália. Essa tecnologia automatizada possibilitou localizar e gerenciar, eficientemente, vazamentos pós-medidor, ressaltando-se eficácia na redução de perdas de água, promoção da sustentabilidade no setor de abastecimento de água e melhoria da eficiência operacional.

Conjuntamente, Farah e Shahrour (2017) fizeram um estudo complementar na Universidade de Lille, França, onde implementaram sistemas inteligentes de água para detectar vazamentos não reportados e mitigar perdas não faturadas. Com uma metodologia avançada de sensores hidráulicos e balanço hídrico, as perdas foram reduzidas em 36%, o que demonstra a eficácia desses sistemas na gestão de otimização na minimização de desperdícios dos recursos hídricos.

Adedeji *et al.* (2017) desenvolveram um algoritmo para detecção precisa de vazamentos em redes de tubulação de água. Ao implementar sensores de pressão e comunicação sem fio, eles evidenciaram a viabilidade da detecção de vazamentos, contribuindo, consideravelmente, para a eficiência das redes de tubulação de água. Esses esforços buscaram reduzir as perdas de água e melhorar a eficiência geral do abastecimento de água.

Pesquisas como as de Pérez *et al.* (2021), Bohorquez *et al.* (2022), Vanijirattikhan *et al.* (2022), Basnet *et al.* (2023) e Yu *et al.* (2023), têm reafirmado a importância da IA e das Redes Neurais nesse contexto.

Como observado no Quadro 9 as ações indiretas para redução e controle de perdas são: Setorização, Monitoramento de Parâmetros Hidráulicos Vazão e Pressão,

Modelagem Hidráulica para Combate às Perdas Físicas, Pesquisa de Vazamento, Qualidade de Materiais, Equipamentos e Obras.

Yu *et al.* (2023) realçam a aplicação de modelos matemáticos para determinar a posição ótima de sensores nas tubulações dos sistemas de distribuição de água, agregando assim a abordagem de Mounce, Boxall e Machell (2010).

Desta forma, a coleta de dados por sensores tem-se mostrado indispensável para o monitoramento em tempo real e detecção eficiente de vazamentos, colaborando para uma gestão mais ágil e eficaz das redes de distribuição de água.

As ações diretas de controle e redução de perdas são: Micromedição; Combate às irregularidades nas Ligações de Água; Manutenção; Controle de Pressão; Readequação da Infraestrutura da rede de abastecimento de água. A detecção e localização rápida de vazamentos nos sistemas de distribuição é de extrema importância, pois além de evitar ônus econômicos, pode ajudar a mitigar problemas ambientais (Benítez *et al.*, 2012; Shiddiqi, Cardell-Oliver; Datta, 2020; Kafle; Fong; Narasimham, 2022; Blázquez-García *et al.*, 2021; Li, Zheng; Lu, 2022; Basnet *et al.*, 2023) e preservar graves riscos à saúde (Avila *et al.*, 2021; Kafle, Fong e Narasimham, 2022).

Araujo, Ramos e Coelho (2006) e Fontana, Giugni e Portolano (2012) visaram a aplicar Algoritmos Genéticos buscando uma solução otimizada para o controle de pressão e gerenciamento de válvulas no SAA e, como consequência, a redução das perdas. A aplicação de Algoritmos Genéticos para a detecção de vazamentos foi realizada também por Ayad *et al.* (2021), Wu, Sage e Turtle (2010), Farley, Mounce e Boxall (2013) e Steffelbauer e Fuchs-Hanusch (2016).

A análise dos dados indica que a integração entre métodos de avaliação e práticas de controle é essencial para a melhoria contínua dos SAA.

A comparação entre municípios mais e menos eficientes evidencia a necessidade de uma abordagem holística na gestão dos recursos hídricos. A combinação de práticas de controle eficazes, treinamento contínuo e ações de conscientização da comunidade são essenciais para a minimização das perdas de água e a promoção de uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

A DEA, ao se concentrar na eficiência técnica, pode ser mais adequada para identificar áreas que necessitam de melhorias imediatas em termos de eficiência operacional. Em contraste, o SAW pode ser mais útil para decisões em que múltiplos

critérios sejam relevantes e onde a avaliação técnica dos sistemas de abastecimento é fundamental.

O SAW complementa as informações da DEA, ajudando a identificar áreas que necessitam de melhorias específicas na gestão hídrica. A Tabela 27 apresenta os dados estatísticos descritivos dos resultados das eficiências de ambos os métodos.

**Tabela 27 - Visão sumária dos resultados com a aplicação dos métodos SAW e DEA**

	<b>SAW</b>	<b>DEA</b>
1° Quartil	0,629	0,434
2° Quartil (mediana)	0,672	0,533
3° Quartil	0,720	0,664
Média	0,681	0,560
Desvio padrão	0,068	0,183

**Fonte:** elaboração própria.

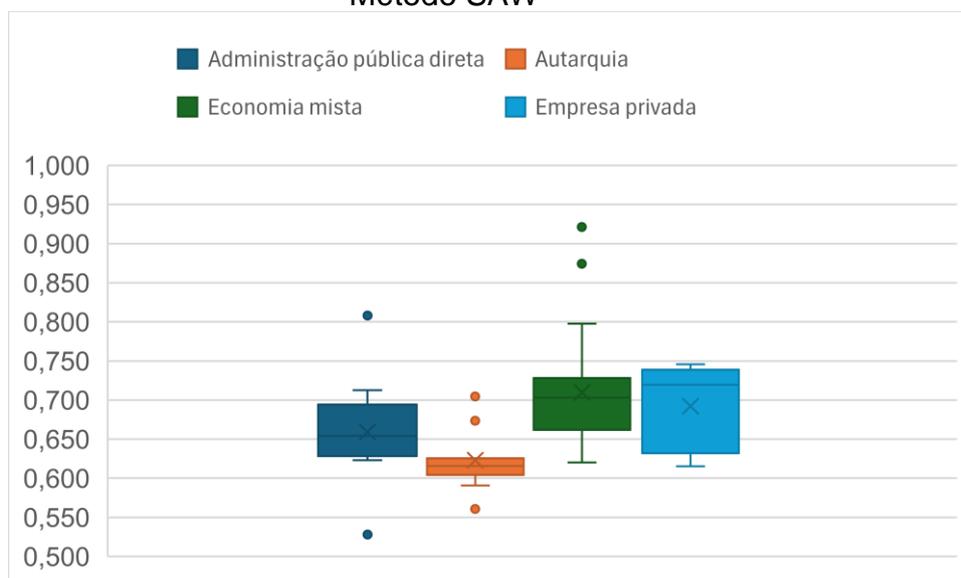
Os quartis indicam a distribuição dos dados, isto é, 25% dos valores das eficiências do SAW estão abaixo de 0,629, enquanto para DEA esse limite é mais baixo. A mediana, ou 2° quartil, indica que, 50% dos valores das eficiências de SAW estão abaixo de 0,672, enquanto para DEA esse valor é 0,533.

Além disso, o 3° quartil (Q3) revela que 75% dos valores das eficiências do SAW estão abaixo de 0,720, enquanto para DEA esse valor é 0,664. Essas medidas ajudam a compreender a posição dos dados. A média de SAW é 0,681, superior à média de DEA, que é 0,560, isto é, o método SAW apresentou um desempenho maior em comparação à DEA.

O desvio padrão, que é de 0,068 para SAW e 0,183 para DEA, sugere que os dados de SAW são menos dispersos em relação à média, indicando maior consistência nos resultados. Em contraste, o maior desvio padrão em DEA indica uma maior variabilidade nos dados.

Com a finalidade de comparar as eficiências obtidas por natureza jurídica das operadoras, a Figura 24 mostra o *box plot* dos níveis de eficiência dos municípios quando observado as naturezas jurídicas das operadoras do sistema de distribuição de água com a aplicação do método SAW.

**Figura 24 – Box plot da eficiência dos municípios quanto à natureza jurídica – Método SAW**

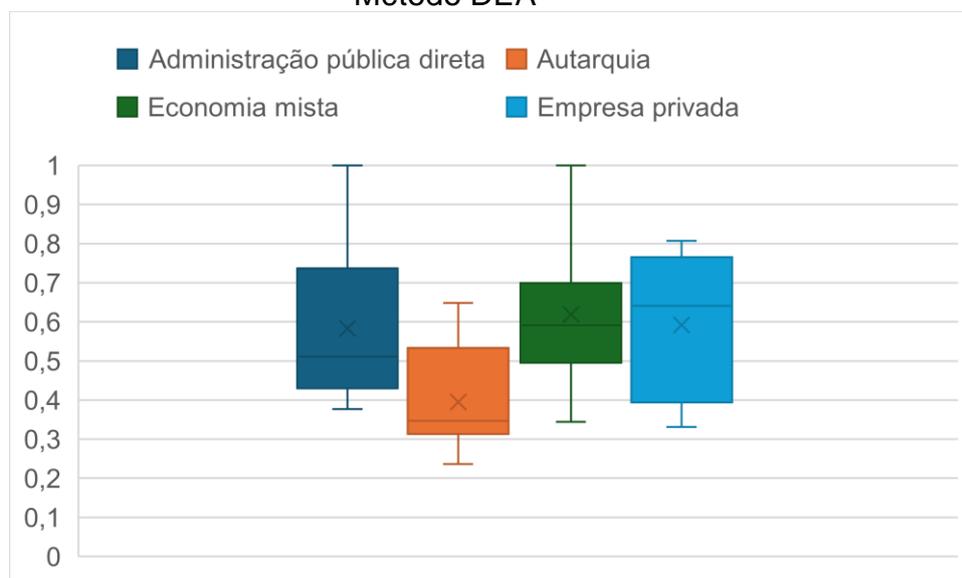


**Fonte:** elaboração própria.

A partir da Figura 26 observa-se que a natureza jurídica Administração Pública Direta possui dois *outliers* Santo Antônio de Posse (0,528) e Santa Maria da Serra (0,808). Também a Administração Pública Direta possui o valor mínimo de pontuação no método SAW de 0,623 e o valor máximo de 0,713. Já para Autarquia o menor valor é 0,591 e o maior é 0,626 e possui três *outliers* Rio Claro (0,561), Indaiatuba (0,673) e Brotas (0,705). Na natureza jurídica Economia Mista o menor valor é 0,620 e o maior valor é 0,728 e possui dois *outliers* Mombuca (0,874) e Sapucaí-Mirim (0,921). Por último, para a Empresa Privada, o menor valor é 0,615 e o maior valor é 0,746.

A Figura 25 apresenta o *box plot* da eficiência dos municípios quando observado as naturezas jurídicas das operadoras do sistema de distribuição de água com a aplicação do método DEA.

**Figura 25 - Box plot da eficiência dos municípios quanto à natureza jurídica – Método DEA**



**Fonte:** elaboração própria.

A partir da Figura 27, observa-se que a natureza jurídica Administração Pública Direta o valor mínimo da pontuação no método DEA é 0,337 e o valor máximo é 1,000. Para a natureza jurídica Autarquia, o menor valor é 0,236 e o maior é 0,648. Já na Economia Mista, o menor valor é 0,344 e o maior valor é 1,000 e para a natureza jurídica Empresa Privada, o menor valor é 0,331 e o maior valor é 0,807.

A natureza jurídica Economia Mista apresenta uma distribuição mais simétrica. O modelo jurídico de gestão do saneamento escolhido por um município impacta significativamente a confiabilidade dos dados operacionais, o que, por sua vez, afeta a avaliação dos sistemas com base em indicadores (Santi; Cetrulo; Malheiros, 2018). Isso destaca a complexidade da gestão em diferentes contextos de naturezas jurídicas, sugerindo que uma análise mais detalhada é necessária para identificar melhores práticas e superar os desafios enfrentados por municípios de Administração Pública Direta e Autarquias.

Em resumo, a combinação dos métodos SAW e DEA proporciona uma análise abrangente das perdas de água em SAA, permitindo uma compreensão dos fatores que afetam a eficiência e facilitando a implementação de estratégias de gestão mais eficazes. A integração dessas abordagens pode levar a tomada de decisões mais adequadas e, conseqüentemente, à gestão hídrica mais sustentável.

A Tabela 28, em ordenação decrescente em relação à DEA, mostra os investimentos feitos no período de 1999 a 2018, juntamente com o investimento *per capita* das respectivas cidades e seus níveis de eficiência no método SAW e DEA.

**Tabela 28** - Investimentos pelas Bacias PCJ em perdas e eficiência municipal (1999-2018)

Cidade	Natureza jurídica	IN049_AE (%)	Investimento 1999 - 2018 (R\$)	Investimento <i>per capita</i> (R\$)	Eficiência SAW	Eficiência DEA
Sapucaí-Mirim	Economia Mista	17,94	48.903,31	0,39	0,921	1
Santa Maria da Serra	Administração Pública Direta	16,41	300,82	0,0035	0,808	0,91
Holambra	Empresa Privada	19,87	139.861,20	0,91	0,732	0,807
Campinas	Economia Mista	20,19	61.668.565,37	2,79	0,749	0,803
Águas de São Pedro	Economia Mista	18,95	153,36	0,0045	0,755	0,763
Hortolândia	Economia Mista	26,17	11.088,59	0,004	0,714	0,662
Saltinho	Economia Mista	23,91	78.161,54	0,61	0,718	0,654
Santa Gertrudes	Empresa Privada	23,16	73.445,00	0,2	0,72	0,641
Jarinu	Economia Mista	26,05	160.554,91	0,29	0,704	0,622
Paulínia	Economia Mista	22,4	5.287,64	0,01	0,717	0,591
Nazaré Paulista	Economia Mista	28,2	805,1	0,003	0,69	0,567
Ipeúna	Administração Pública Direta	24,02	164.740,40	1,18	0,713	0,564
Vinhedo	Autarquia	28,59	9.823.155,20	7,55	0,677	0,552
Indaiatuba	Autarquia	29,76	11.093.679,28	2,63	0,673	0,543
Rafard	Administração Pública Direta	24,65	40.745,68	0,23	0,676	0,537
Várzea Paulista	Economia Mista	30,74	637.632,27	0,27	0,672	0,533
Rio Claro	Autarquia	30,84	5.686.110,82	1,52	0,561	0,533
Itatiba	Economia Mista	31,51	631.668,86	0,28	0,665	0,521
Itapeva	Economia Mista	30,66	71.056,38	0,41	0,68	0,519
Louveira	Administração Pública Direta	31,47	310.015,82	0,41	0,654	0,511
Jundiaí	Economia Mista	31,87	477.438,14	0,07	0,656	0,506
Extrema	Economia Mista	33,78	263.681,81	0,46	0,66	0,492
Cosmópolis	Administração Pública Direta	35,18	74.830,00	0,07	0,656	0,491
Nova Odessa	Economia Mista	33,41	25.846.810,00	24,49	0,66	0,487
Campo Limpo Paulista	Economia Mista	33,04	435.085,13	0,27	0,662	0,467
Toledo	Economia Mista	35,76	45.544,63	0,4	0,66	0,463
Camanducaia	Economia Mista	37,19	151.852,84	0,36	0,654	0,458
Sumaré	Empresa Privada	35,45	13.978,52	0,004	0,649	0,458

Jaguariúna	Administração Pública Direta	36,78	1.415.452,23	1,5	0,634	0,448
Amparo	Autarquia	40,45	4.264.867,33	3,17	0,626	0,419
Bom Jesus dos Perdões	Administração Pública Direta	39,76	271.221,29	0,85	0,641	0,412
Valinhos	Autarquia	44,24	6.028.326,42	2,57	0,622	0,379
Santo Antônio de Posse	Administração Pública Direta	43,33	62.319,10	0,16	0,528	0,377
Cordeirópolis	Autarquia	45,42	3.566.783,99	7,91	0,625	0,372
Atibaia	Autarquia	49,5	880.754,07	0,35	0,616	0,347
Tuiuti	Empresa Privada	48,89	31.673,96	0,26	0,615	0,331
Santa Bárbara D Oeste	Autarquia	54,14	6.425.762,88	1,75	0,616	0,325
Americana	Autarquia	53,31	698.793,72	0,17	0,608	0,321
Piracicaba	Autarquia	53,93	22.999.715,51	3,06	0,605	0,313
Capivari	Autarquia	75,39	7.051.759,39	7,04	0,591	0,236

**Fonte:** elaboração própria a partir de Carvalho (2023).

A análise dos dados apresentados na Tabela 28 revela uma relação entre o investimento *per capita*, a eficiência dos métodos de avaliação SAW e DEA, e a natureza jurídica das cidades.

A cidade de Nova Odessa, com um investimento *per capita* de R\$ 24,4945, destaca-se por seu considerável aporte financeiro na gestão de recursos hídricos. No entanto, apesar desse investimento significativo, a cidade apresenta um *ranking* modesto nas avaliações DEA (0,487) e SAW (0,660), sugerindo que a eficiência na aplicação desses recursos ainda pode ser aprimorada. Essa discrepância indica a necessidade de uma gestão mais estratégica e integrada, visando a maximizar os resultados dos investimentos e a garantir um SDA mais eficiente e sustentável

O investimento total de Campinas, que alcançou R\$ 61.668.565,37 entre 1999 e 2018, destaca-se como o maior entre os municípios analisados. Com um investimento *per capita* de R\$ 2,7855, Campinas obteve um desempenho relevante nas avaliações de eficiência, com eficiência DEA de 0,803 e SAW de 0,749. Adicionalmente, este município implementou práticas de gestão eficazes, garantindo um SAA que atende adequadamente as necessidades da população.

Em contraste, municípios como Águas de São Pedro, com um investimento *per capita* de apenas R\$ 0,0045, apresentou eficiência relativamente alta nos métodos SAW e DEA (0,755 e 0,763, respectivamente). Isso indica que, mesmo com um investimento reduzido, a cidade consegue aplicar 29,5 práticas eficientes na gestão

dos recursos hídricos, possivelmente devido a uma gestão mais eficaz ou focada em ações de conscientização e controle. Isso sugere que a eficiência não depende exclusivamente do volume de recursos, mas sim da qualidade da gestão.

Por outro lado, municípios com investimento *per capita* relativamente alto, Rio Claro (R\$ 1,5210), Capivari (R\$ 7,0390) e Piracicaba (R\$ 3,0585) apresentaram baixa eficiência nos métodos DEA e SAW. Este fenômeno pode ser atribuído a deficiências na aplicação dos recursos ou na execução de práticas de gestão.

Outros municípios, como Holambra (R\$ 0,9090) e Santa Maria da Serra (R\$ 0,0035), demonstram que mesmo com investimentos *per capita* baixos, podem alcançar *rankings* competitivos. O caso de Santa Maria da Serra, com o menor investimento *per capita* de R\$ 0,0035, porém um *ranking* SAW de 0,808, sugere que a eficiência pode ser alcançada por meio de uma gestão focada em resultados e inovação, possivelmente, priorizando ações de baixo custo que gerem grande impacto.

Municípios que investem em capacitação e que utilizam ferramentas de monitoramento tendem a apresentar resultados superiores em eficiência, destacando a importância de uma gestão proativa e bem estruturada.

Por fim, a análise crítica sugere que, embora o investimento *per capita* seja um fator relevante para a eficiência na gestão dos recursos hídricos, a eficiência reside na combinação do investimento, do planejamento estratégico e das práticas de gestão inovadoras. Municípios com baixos investimentos, porém com altos índices de eficiência, como Águas de São Pedro, podem servir como modelos para outras cidades, enfatizando que a gestão eficiente da água não depende apenas de recursos financeiros, mas também de uma abordagem integrada e consciente.

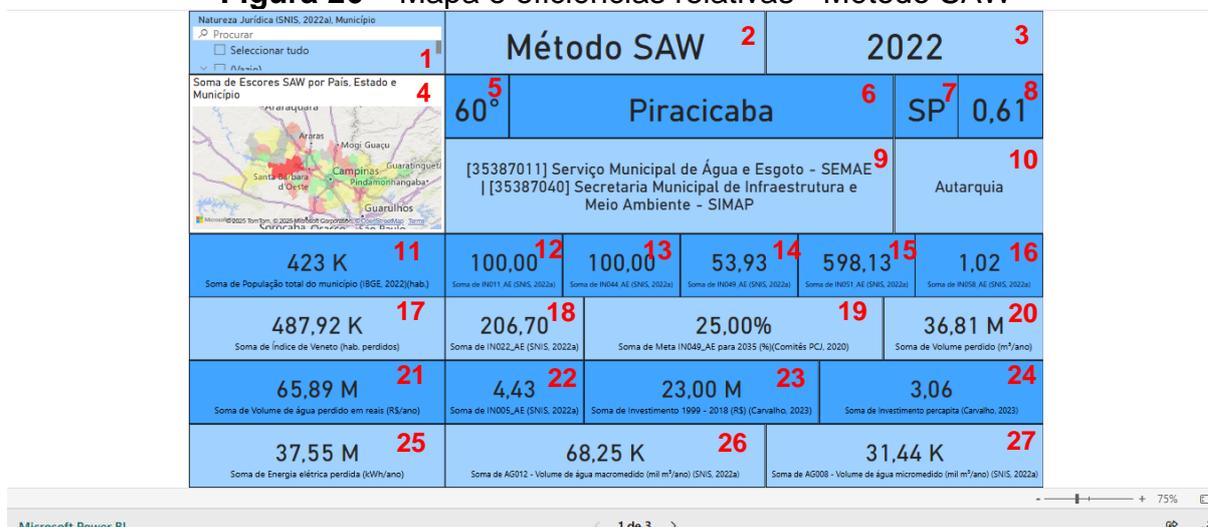
A variação nos índices de eficiência entre as cidades analisadas evidencia a necessidade de abordagem diferenciada em políticas públicas. Enquanto algumas cidades conseguem maximizar a utilização de seus recursos e oferecer serviços de qualidade, outras enfrentam dificuldades que podem comprometer o desenvolvimento local. Assim, um plano de ação direcionado pode contribuir significativamente para melhorar a eficiência das cidades com menor desempenho, promovendo uma gestão pública mais equitativa e eficiente.

#### 5.4. **Dashboard** para a gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água das Bacias PCJ

Nesta seção, é apresentado o *dashboard* desenvolvido para auxiliar a gestão das perdas de água em sistemas de abastecimento de água das Bacias PCJ. O painel de controle é uma ferramenta interativa que visa a facilitar a visualização e a análise dos dados relacionadas às perdas de água em SAA, proporcionando uma interface amigável para usuários e gestores. Estruturado em três abas distintas, o *dashboard* oferece uma abordagem abrangente para entender os desafios enfrentados na gestão da água das Bacias PCJ. Os dados exibidos no *dashboard* correspondem aos resultados obtidos pelos métodos SAW e DEA na rodada com 65 municípios.

No *dashboard*, os números servem como marcadores visuais para identificar e organizar cada caixa de forma clara e sequencial. Essa numeração, de 1 a 27, guia o usuário na navegação e leitura dos dados, facilitando a localização rápida das informações. A título de exemplo, a Figura 26 destaca as informações do *dashboard* para a cidade de Piracicaba.

**Figura 26 – Mapa e eficiências relativas - Método SAW**



**Fonte:** elaboração própria.

**Nota:** identificação e função de cada caixa: 1-Filtro de busca; 2-Método empregado na aba correspondente; 3-Ano base dos dados; 4-Mapa interativo; 5-Colocação da cidade no *ranking*; 6-Nome da cidade; 7-Estado da cidade; 8-O escore de eficiência da cidade; 9-Prestador responsável pela cidade; 10-Natureza jurídica do prestador da cidade; 11-População da cidade; 12-Valor do indicador IN011\_AE para a cidade; 13-Valor do indicador IN044\_AE para a cidade; 14-Valor do indicador IN049\_AE para a cidade; 15-Valor do indicador IN051\_AE para a cidade; 16-Valor do indicador

IN058\_AE para a cidade; 17-Índice de Veneto da cidade; 18-Valor do indicador IN022\_AE para a cidade; 19-Meta para 2035 do IN049\_AE da cidade; 20-Volume perdido da cidade; 21-Volume de água perdido em reais da cidade; 22-Valor do indicador IN005\_AE para a cidade; 23-Investimento da cidade entre 1999-2018; 24-Investimento *per capita* da cidade; 25-Energia elétrica perdida da cidade; 26-Volume de água macromedido da cidade; 27-Volume de água micromedido da cidade.

A primeira aba, apresenta um mapa interativo (4) que utiliza o método SAW (2), permitindo ao usuário visualizar as eficiências relativas (8) do município (6) quanto às perdas de água de forma geográfica e identificar áreas críticas.

Há o filtro de busca (1) que permite selecionar uma ou mais cidades, ou ainda filtrar por natureza jurídica, podendo escolher uma ou mais opções de naturezas jurídicas. Quando selecionada mais de uma cidade ou mais de uma natureza jurídica, o *dashboard* automaticamente contabiliza a soma dos valores dos dados das cidades escolhidas ou das cidades relacionadas àquela natureza jurídica. Como resultado, as caixas de texto são atualizadas com o total dessas somas.

O mapa interativo (4) que ilustra as localidades das Bacias PCJ, com um clique é possível visualizar outras cidades. As cores vibrantes representam diferentes níveis de escore, definidos com base nos quartis apresentados na Tabela 27. Os municípios com escores superiores a zero e iguais ou inferiores a 0,629 são destacados em vermelho. Aqueles com escores superiores a 0,629 e iguais ou inferiores a 0,720 aparecem em amarelo. Cidades com escores superiores a 0,720 e iguais ou inferiores a 1 são representadas na cor verde. Por fim, os municípios excluídos, devido a incongruências nos dados, recebem o valor zero e são indicados em cinza, porém, alguns indicadores desses municípios são apresentados no painel de controle.

Estão indicados o “Método SAW” (2) e o ano “2022” (3), que especificam o método utilizado e o ano base dos dados coletados para os indicadores. Encontra-se a informação “60°” (5), que representa a posição no *ranking* da cidade de “Piracicaba” (6), juntamente com o estado em que se encontra, “SP” (7), e a pontuação obtida pelo município no Método SAW, que é de “0,61” (8).

Estão listados os prestadores de serviços da cidade: “Serviço Municipal de Água e Esgoto” e “Secretaria Municipal de Infraestrutura e Meio Ambiente” (9). Ao lado dessas informações, é especificado o tipo de natureza jurídica, que é “Autarquia” (10).

É apresentada a população total do município (11) de Piracicaba, que é de aproximadamente “423 k”, onde “k” significa mil, isto é, 423 mil habitantes. Ao lado dessa informação, são informados os valores dos indicadores para o município de Piracicaba: IN011\_AE (100,00) (12), IN044\_AE (100,00) (13), IN049\_AE (53,93) (14), IN051\_AE (598,13) (15) e IN058\_AE (1,02) (16).

As informações sobre o Índice de Veneto (17) do município de Piracicaba, indica uma perda de “487,92 k” habitantes. O valor do indicador IN022\_AE “206,70” encontra-se em (18), ressalta-se que a meta estipulada nos Comitês PCJ (2020) para o ano de 2035 de “25,00%” (19) e o Volume perdido, “36,81 M” (20), onde “M” representa milhões, totalizando 36,81 milhões de m<sup>3</sup> em 2022.

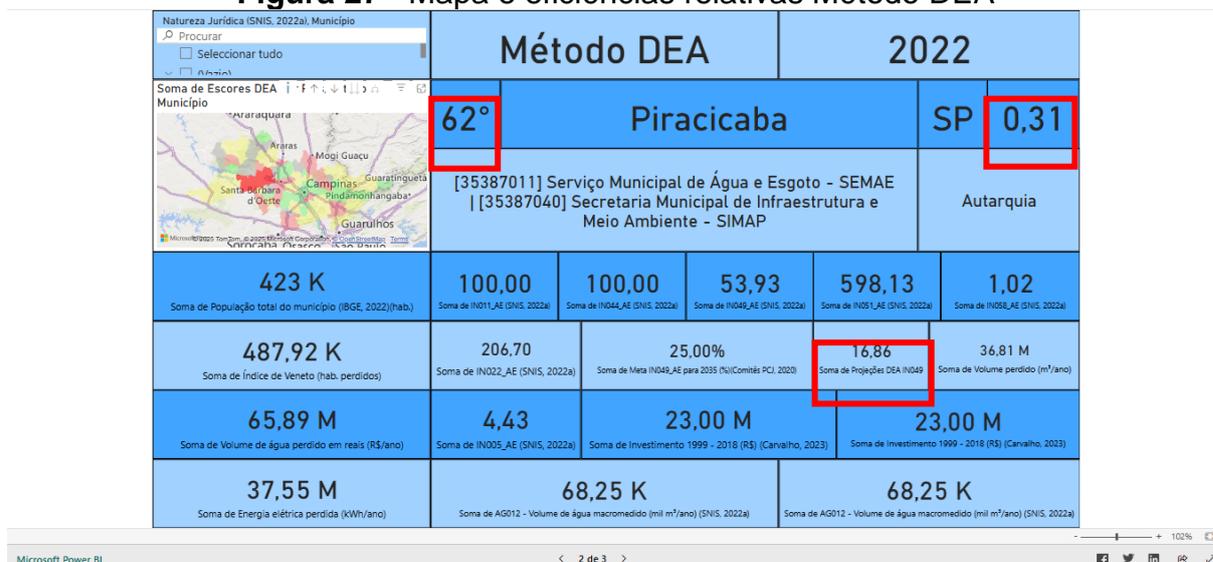
As informações financeiras da cidade de Piracicaba relacionadas ao Volume de água perdido em reais, estimado em “65,89 M” (21), totalizando 65,89 milhões de reais no ano de 2022. Ao lado dessa informação, está o indicador IN005\_AE, que apresenta o valor de “4,43” (22), isto é, a tarifa média de água. Em seguida, são mencionados o investimento realizado nesse município no período de 1999 a 2018 de “23,00 M” (23) e o investimento *per capita* do município, que é de “3,06” (24), conforme Carvalho (2023).

As informações sobre a energia elétrica perdida no ano de 2022, na cidade de Piracicaba, totalizaram “37,55 M” (25), isto é, 37,55 milhões de kWh no ano de 2022. Em seguida, são destacados os dados do indicador AG012, isto é, o volume de água macromedido (mil m<sup>3</sup>/ano), com um total de “68,25 k” (26), e o indicador AG008, que se refere ao volume de água micromedido (mil m<sup>3</sup>/ano), com um total de “31,44 k” (27).

Algumas cidades não apresentaram dados (-) ou os valores são iguais a zero. Essa padronização na apresentação permite uma comparação mais clara e eficiente entre os municípios, assegurando que as informações exibidas sejam precisas e confiáveis.

A segunda aba, apresenta o mapa interativo baseado no método DEA, fornecendo uma visão detalhada da eficiência dos municípios quanto às perdas de água nos sistemas de abastecimento de água. A título de exemplo, a Figura 27 destaca as informações do *dashboard* para a cidade Piracicaba com a aplicação do método DEA.

**Figura 27 - Mapa e eficiências relativas Método DEA**



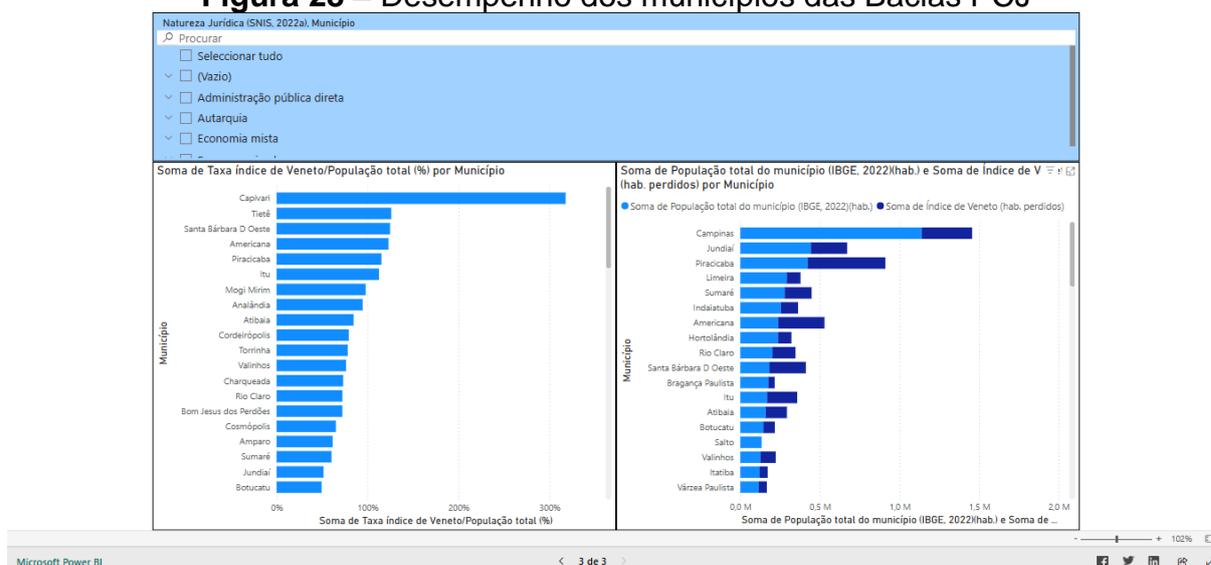
**Fonte:** elaboração própria.

De acordo com a Tabela 27, os municípios com escores superiores a zero e iguais ou inferiores a 0,434 são destacados em vermelho. Aqueles com escores superiores a 0,434 e iguais ou inferiores a 0,664 aparecem em amarelo. Cidades com escores superiores a 0,664 e iguais ou inferiores a 1 são representadas na cor verde. Por fim, os municípios excluídos devido a incongruências nos dados recebem o valor zero e são indicados em cinza, porém, alguns indicadores desses municípios são apresentados no painel de controle.

As caixas vermelhas destacadas na Figura 27 apontam as diferenças dessa aba em relação à aba do método SAW. No método DEA a cidade de Piracicaba obteve a colocação no *ranking* de “62°” e a eficiência “0,31”. Ademais, o método DEA aponta que a projeção do IN049\_AE é “16,86”, isto é, o valor adequado desse indicador para atingir a eficiência máxima da cidade de Piracicaba.

Essa abordagem permite identificar quais são as metas para o indicador IN049\_AE até 2035, segundo Comitês PCJ (2020) e qual é a projeção obtida pela DEA para esse indicador nos municípios estudados.

A terceira aba contém gráficos do *dashboard* que complementam a análise, oferecendo uma visualização dinâmica das tendências e padrões das perdas de água nos municípios. Esses gráficos são essenciais para a interpretação dos dados, permitindo a identificação de correlações entre variáveis relevantes (Figura 28).

**Figura 28 – Desempenho dos municípios das Bacias PCJ**

**Fonte:** elaboração própria.

A Figura 28 apresenta o filtro de pesquisa, que permite selecionar um ou mais municípios, com diferentes naturezas jurídicas, ou municípios com naturezas jurídicas iguais. O primeiro gráfico, à esquerda, mostra o índice de Veneto dividido pela população total do município (%). Valores dessa taxa superiores a 100% indicam que o número de possíveis habitantes perdidos é maior que o total de habitantes da cidade. Em ordem decrescente, as cidades paulistas que se enquadram nessa situação são: Capivari (317,78%), Tietê (126,05%), Santa Bárbara d'Oeste (124,75%), Americana (123,02%), Piracicaba (115,26%) e Itu (112,59%). Esses dados sugerem que esses municípios podem estar enfrentando problemas de perdas de água em seus sistemas de abastecimento de água.

O segundo gráfico, localizado à direita, ilustra a população total do município (azul claro) e o índice de Veneto (azul escuro). Quando a barra azul escura é maior que a barra azul clara, indica que o município tem possíveis habitantes perdidos maior que o total de habitantes da cidade. Essa visualização permite analisar a relação entre a população e a capacidade de abastecimento em cada município

O painel de controle desenvolvido nesta pesquisa possibilita a consolidação e análise integrada dos dados coletados nos 65 municípios estudados, fornecendo uma visão abrangente e quantitativa das perdas. A partir dos índices desenvolvidos, torna-se evidente a magnitude dos impactos gerados: ao longo de um ano, observou-se a perda de 240,24 milhões de metros cúbicos de água no ano de 2022, o que representa um desperdício significativo de recursos hídricos essenciais, e dos insumos de

tratamento da água, especialmente em contextos de crescente escassez e demanda por sustentabilidade ambiental.

Ademais, os dados revelam perdas expressivas em outros domínios fundamentais. Estima-se a perda de 3,61 milhões de habitantes no ano de 2022, obtida pela soma do índice de Veneto para os 65 municípios considerados na análise. Do ponto de vista econômico, verificou-se um prejuízo anual de R\$ 430,04 milhões, valor que compromete a eficiência financeira e a capacidade de investimento do sistema. Em termos energéticos, foram desperdiçados 201,91 milhões de kWh por ano, o que acarreta consequências para a matriz energética e a emissão de gases de efeito estufa. Esses resultados evidenciam a urgência de intervenções estruturais e políticas públicas mais eficazes para mitigação das perdas nos serviços analisados. Essa informação é apresentada no *dashboard* quando não há cidades selecionadas no mapa.

O acesso do painel de controle pode ser feito pelo <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiYTUzNDczMmEtM2ZkNS00YjNjLWFhNWMtMzBkOTFhMWViYmFliwidCI6IjA4MGJjMDIzLTVINWEtNDZmYi1iYmU4LWViINTQ4ZTk4NzNhNiJ9>.

A estrutura e apresentação do *dashboard*, com suas caixas de texto organizadas, mapas e gráficos interativos, oferece uma importante ferramenta para gestores, pesquisadores e a sociedade em geral. A interatividade do painel possibilita que os usuários explorem os dados de forma intuitiva, promovendo melhor compreensão dos desafios enfrentados na gestão hídrica.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo analisar e avaliar as perdas de água nos sistemas de distribuição de água dos municípios inseridos nas Bacias PCJ, ao utilizar métodos multicritério, *Simple Additive Weighting* (SAW) e *Data Envelopment Analysis* (DEA), e fornecer um *dashboard* no *Power BI*. O *Power BI* possibilita visualizar e apoiar o monitoramento das perdas de água, e criar painéis de controle interativos de forma simples e prática. Através dessa análise, buscou-se não apenas entender a eficiência dos municípios, mas também compreender a eficácia das práticas de gestão, possibilitando identificar as nuances que influenciam os resultados obtidos por diferentes cidades, levando em consideração suas naturezas jurídicas e contextos administrativos.

A aplicação dos métodos SAW e DEA revelou-se relativamente acessível, permitindo uma comparação clara entre as cidades. A facilidade na implementação dessas ferramentas destaca sua utilidade na avaliação de desempenho, uma vez que possibilita a visualização rápida das ineficiências e a identificação de municípios que necessitam de melhorias. Essa simplicidade, no entanto, não deve obscurecer a profundidade da análise necessária para uma compreensão holística da gestão hídrica e eficiência dos sistemas de abastecimento de água.

Além disso, a necessidade de um gestor para avaliar os indicadores a serem utilizados no SAW é primordial. A ponderação adequada desses indicadores é crucial para garantir que os resultados reflitam verdadeiramente a eficiência dos municípios. A validação dos resultados obtidos por meio dessa metodologia deve ser um processo contínuo, permitindo ajustes e melhorias nas estratégias adotadas, além de facilitar uma gestão adaptativa diante das mudanças climáticas e das necessidades da população.

A rodada realizada para os 65 municípios com o método SAW evidenciou a eficiência relativa dos cinco melhores e cinco piores municípios, conforme os índices de desempenho. Em ordem decrescente de eficiência, os cinco melhores municípios foram: Sapucaí-Mirim (0,921), Mombuca (0,874), Santa Maria da Serra (0,808), Joanópolis (0,798) e Pinhalzinho (0,775). Por outro lado, os cinco piores municípios foram: Itu (0,604), Tietê (0,601), Capivari (0,591), Rio Claro (0,561) e Santo Antônio de Posse (0,528).

A análise dos municípios com até 100 mil habitantes revelou variações substanciais no desempenho dos melhores e piores municípios. Os cinco melhores

municípios dessa categoria foram: Sapucaí-Mirim (0,921), Mombuca (0,874), Santa Maria da Serra (0,808), Joanópolis (0,798) e Pinhalzinho (0,775). Em contrapartida, os cinco piores municípios dessa mesma categoria foram: Tuiuti (0,613), Mogi Mirim (0,613), Tietê (0,599), Capivari (0,589) e Santo Antônio de Posse (0,527), que apresentaram resultados abaixo da média.

A comparação entre as rodadas dos municípios com mais de 100 mil habitantes evidenciou um cenário distinto, com variações significativas nos desempenhos. Os cinco melhores municípios dessa categoria foram: Bragança Paulista (0,923), Campinas (0,914), Hortolândia (0,904), Limeira (0,887) e Paulínia (0,829). Em contrapartida, os cinco piores municípios dessa mesma rodada foram: Atibaia (0,701), Americana (0,684), Itu (0,680), Piracicaba (0,672) e Rio Claro (0,668). Esses resultados refletem o impacto negativo de uma gestão deficiente em áreas de alta demanda populacional.

Todavia, a rodada realizada para os 65 municípios, utilizando o método DEA, revelou a eficiência relativa dos cinco melhores e cinco piores municípios dos 65 municípios com algumas divergências quando comparado ao método SAW, conforme os índices de desempenho obtidos. Em ordem decrescente de eficiência, os cinco municípios mais eficientes foram: Analândia (1,000), Mombuca (1,000), Sapucaí-Mirim (1,000), Santa Maria da Serra (0,910) e Joanópolis (0,893). Por outro lado, os cinco municípios com menor eficiência foram: Americana (0,321), Piracicaba (0,313), Itu (0,303), Tietê (0,294), Capivari (0,236).

Ao considerar os municípios com até 100 mil habitantes, a aplicação do método DEA também revelou disparidades nos desempenhos em relação ao método SAW. Os cinco municípios mais eficientes nessa categoria foram: Analândia (1,000), Mombuca (1,000), Sapucaí-Mirim (1,000), Santa Maria da Serra (0,910) e Joanópolis (0,893). Por outro lado, os cinco municípios menos eficientes dessa categoria foram: Torrinha (0,344), Mogi Mirim (0,338), Tuiuti (0,331), Tietê (0,294) e Capivari (0,236).

A rodada dos municípios com mais de 100 mil habitantes, utilizando o método DEA, destacou as variações de desempenho em relação aos melhores e piores municípios dessa categoria. Os cinco municípios mais eficientes foram: Bragança Paulista (1,000), Campinas (1,000), Hortolândia (1,000), Limeira (0,953) e Paulínia (0,859). Em contraste, os cinco municípios com menor eficiência foram: Valinhos (0,518), Atibaia (0,507), Americana (0,466), Itu (0,447), Piracicaba (0,433). Esses resultados refletem o impacto negativo de uma gestão com baixa eficiência,

especialmente em municípios de maior porte, onde a complexidade administrativa, a alta demanda populacional pode aumentar os desafios nos sistemas de abastecimento de água dessas cidades.

O método DEA, embora tenha-se mostrado eficaz na avaliação de eficiência, apresenta alguns desafios. Um caso emblemático é o da cidade de Analândia com um Índice de Perdas na Distribuição (IN049\_AE) acima de 50%, apesar de apresentar uma elevada pontuação no *ranking*, enfrenta sérios problemas relacionados a perdas de água. Essa discrepância entre a pontuação e a realidade prática indica que a eficiência medida não se traduz necessariamente em resultados tangíveis na gestão dos recursos hídricos. Portanto, é fundamental que a análise dos resultados com a aplicação do método DEA seja complementada por uma avaliação qualitativa das práticas de gestão.

Dessa forma, a validação dos resultados deve considerar não apenas a eficiência obtida com a aplicação dos métodos multicritério, mas também as condições locais, os investimentos realizados e as ineficiências operacionais que podem não ser capturadas pelos métodos quantitativos. Essa abordagem multifacetada pode permitir uma compreensão mais rica e fidedigna da realidade hídrica nas cidades das Bacias PCJ.

Ademais, é fundamental que os gestores públicos e privados estejam cientes das limitações das ferramentas analíticas utilizadas. A interpretação crítica dos resultados e a disposição para revisar e aprimorar as práticas de gestão são essenciais para promover melhorias significativas na eficiência hídrica. A gestão adaptativa, que incorpora *feedback* e aprendizado contínuo, é uma abordagem que pode contribuir para a superação dos desafios enfrentados.

A análise dos dados também sugere que a colaboração entre diferentes entidades, sejam públicas ou privadas, pode trazer soluções inovadoras para os problemas de gestão hídrica. A troca de experiências e boas práticas entre as cidades pode fomentar um ambiente propício para a inovação, levando a uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

A análise crítica dos métodos e dos dados disponíveis, aliada à avaliação contínua dos indicadores, é uma ferramenta valiosa para o aprimoramento das práticas de gestão hídrica nas cidades das Bacias PCJ, assegurando que os objetivos de eficiência e sustentabilidade sejam efetivamente alcançados.

O painel de controle desenvolvido nesta pesquisa possibilitou a análise integrada dos dados dos 65 municípios, revelando perdas significativas em diversas áreas. Ao longo de um ano, estima-se um desperdício de 240,24 milhões de metros cúbicos de água, destacando-se como recurso essencial perdido num contexto de crescente escassez hídrica. Além disso, pelo Índice de Veneto, calculou-se uma perda de 3,61 milhões de habitantes-ano, refletindo a magnitude dos impactos no serviço prestado à população.

O desperdício gerou um prejuízo anual de R\$ 430,04 milhões, comprometendo a eficiência financeira do sistema. Em relação ao consumo de energia elétrica foram desperdiçados 201,91 milhões de kWh por ano, implicando não apenas em perdas financeiras, mas também em impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa. Esses dados sublinham a necessidade urgente de estratégias para mitigar as perdas e otimizar os recursos disponíveis.

A pesquisa reforça a importância de um compromisso contínuo com a melhoria da gestão hídrica dos municípios das Bacias PCJ. A implementação de políticas públicas embasadas em dados robustos e análises rigorosas é crucial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos, especialmente num contexto de crescente demanda e mudanças climáticas. Assim, a busca por soluções inovadoras e eficientes deve ser uma prioridade, visando não apenas à eficiência, bem como à equidade no acesso aos recursos hídricos, como proposto no ODS 6 da Agenda 2030.

### **6.1. Limitações e sugestões para futuras pesquisas**

Ressaltam-se algumas deficiências nas informações disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que podem impactar as análises realizadas. Isso é particularmente relevante para os 11 municípios excluídos das rodadas dos métodos SAW e DEA, devido a inconsistências nos dados apresentados.

A falta de dados robustos, atualizados e auditados limita a capacidade dos gestores municipais em tomar decisões embasadas neles, comprometendo a eficácia das políticas públicas implementadas para o controle das perdas de água em sistemas de abastecimento de água. Essa lacuna ressalta a urgência de um sistema de informação que seja mais integrado e que forneça dados mais precisos.

A pesquisa restringiu-se unicamente à aplicação dos métodos multicritério SAW e DEA, com a utilização de apenas alguns indicadores obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e nas Bacias PCJ. Espera-se que pesquisas

futuras levem em conta a aplicação de outros métodos e sobretudo a importância de uma abordagem integrada nos níveis estratégicos, táticos e operacionais, especialmente na escolha dos indicadores e de seus pesos. A partir de uma perspectiva estratégica, as decisões sobre quais indicadores utilizar e, quais pesos atribuir a eles, podem refletir objetivos de longo prazo, como a sustentabilidade e a eficiência global dos sistemas de abastecimento de água. No nível tático, as escolhas tendem a ser mais focadas em metas de médio prazo, considerando o equilíbrio entre recursos disponíveis e a capacidade de execução das práticas. Já no nível operacional, as decisões se concentram na implementação prática e imediata das ações, com foco em resultados concretos e em tempo real no combate de perdas de água em sistemas de abastecimento de água.

Esses diferentes níveis de tomada de decisão podem, portanto, levar a escolhas críticas distintas, com implicações diretas nos resultados obtidos, sobretudo a participação ativa dos gestores dos sistemas de abastecimento de água é essencial para análise crítica na seleção dos indicadores, definição de seus pesos e avaliação dos resultados. A colaboração entre os diferentes níveis de gestão garante que as decisões sejam alinhadas às necessidades e às realidades de cada contexto municipal, permitindo uma gestão mais eficiente e eficaz dos recursos hídricos e serviços, com impacto direto na redução das perdas de água e melhoria da qualidade dos serviços prestados.

Futuras pesquisas na área de gestão de recursos hídricos no estado de São Paulo, especialmente na Região Metropolitana de São Paulo e na Região Metropolitana de Campinas, devem explorar a aplicação de métodos complementares aos já utilizados, como o SAW e a DEA. Outras abordagens, tais como Análise de Redes Neurais, Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Índice de Veneto (fruto da presente pesquisa), auxiliam nas interações complexas entre variáveis ambientais, operacionais e sociais.

Além disso, a incorporação de análises bibliométricas que explorem diferentes palavras-chave e combinações lógicas permite uma compreensão mais abrangente das tendências de pesquisa e das lacunas existentes no conhecimento sobre perdas de água.

A integração de Inteligência Artificial (IA) nas análises de dados pode transformar significativamente a forma como as informações sobre perdas de água são processadas e interpretadas, oferecendo *insights* mais profundos e preditivos.

Pesquisas futuras que explorem a aplicação de algoritmos de *machine learning* e *big data* para otimizar a detecção de padrões nas perdas de água poderão resultar em soluções mais eficientes para o gerenciamento dos sistemas de abastecimento. Além disso, a utilização de dados provenientes de sensores em tempo real auxilia em análises mais precisas, contribuindo para uma gestão hídrica mais responsiva e adaptativa.

Essa combinação de tecnologias avançadas não apenas enriquecerá a base teórica da pesquisa, como proporcionará ferramentas práticas que podem ser implementadas por gestores de recursos hídricos. Dessa forma, pode promover a adaptabilidade, sustentabilidade e eficiência dos serviços de abastecimento, possibilitando uma compreensão mais profunda das interações complexas entre as variáveis que afetam a eficiência hídrica.

Outra diretriz para futuras pesquisas é a realização de estudos comparativos entre diferentes regiões do Brasil, ao investigar como as variáveis socioeconômicas e ambientais influenciam a gestão de perdas de água. A análise da eficácia de modelos de gestão pública e privada em diferentes contextos pode revelar *insights* valiosos e intervenções sobre as melhores práticas e estratégias de mitigação de perdas de água nos sistemas de abastecimento de água.

Uma direção promissora para pesquisas futuras é a criação de uma plataforma de ensino dedicada a práticas de combate às perdas de água. Essa plataforma pode disponibilizar cursos interativos, *webinars* e materiais didáticos que abordem desde técnicas de monitoramento até estratégias de gestão e conservação de recursos hídricos.

Ao capacitar profissionais e a comunidade em geral com o conhecimento prático, o *dashboard* possibilita não apenas promover a conscientização sobre a importância da eficiência hídrica, bem como incentivar a implementação de soluções inovadoras em diversos contextos, fortalecendo a luta contra a escassez de água.

O *dashboard* obtido permite realizar testes de usabilidade e validação. Isso envolve a revisão das visualizações e a verificação da precisão dos dados apresentados. *Feedback* dos usuários finais deve ser coletado para identificar possíveis melhorias e ajustes, assegurando que o *dashboard* atenda às expectativas e necessidades da equipe de gestão.

Adicionalmente, a capacitação dos usuários sobre como utilizar o *dashboard* é uma etapa importante. Treinamentos devem ser realizados para garantir que os

gestores compreendam as funcionalidades do *Power BI* e interpretem as visualizações de forma eficaz. A familiarização com a ferramenta é essencial para garantir que os dados se traduzam em ações concretas e informadas.

Por fim, a manutenção contínua do *dashboard* deve ser planejada. Isso inclui a atualização regular dos dados, a revisão dos KPIs e a adaptação das visualizações conforme novas necessidades surgirem. A gestão hídrica é um campo dinâmico, e o *dashboard* deve evoluir para refletir as mudanças nas condições e prioridades, garantindo que continue a ser uma ferramenta valiosa para a eficiência hídrica nas Bacias PCJ.

O *dashboard* interativo não só melhora a compreensão dos dados, mas também possibilita uma análise mais profunda das relações entre os municípios, ajudando a identificar áreas que podem beneficiar-se de melhorias e investimentos estratégicos.

Além disso, pesquisas que explorem a participação da comunidade e a conscientização sobre a gestão da água podem fornecer dados qualitativos que, quando combinados com análises quantitativas, resultarão em uma abordagem completa para enfrentar os desafios hídricos enfrentados em diversas localidades do país.

A combinação de contextos, tecnologias avançadas, práticas educacionais e uma abordagem integrada à gestão hídrica pode transformar radicalmente a forma como é enfrentada as perdas de água em sistemas de abastecimento água. Ao investir em pesquisa e inovação, não apenas respondendo aos desafios atuais, mas também moldando um futuro mais sustentável e responsável. Isso representa uma oportunidade de garantir que os recursos hídricos sejam preservados para as futuras gerações, refletindo compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água: Posicionamento e contribuições técnicas da ABES**, 2015.

ADEDEJI, K. B.; ABE, B. T.; HAMAM, Y.; ABU-MAHFOUZ, A. M. Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. **IEEE Access**, v. 5, 20272-20285, 2017.

AFSHARI, A. *et al.* Simple Additive Weighting approach to Personnel Selection problem. **International Journal of Innovation, Management and Technology**, v. 1, n. 5, 2010.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Localização**. 2019. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/localizacao/>. Acesso em 18 out. 2024

AHMADI, Meghdad; OSMAN, Mohd Hassan Mohd; AGHDAM, Mohammad Molani. Integrated exploratory factor analysis and Data Envelopment Analysis to evaluate balanced ambidexterity fostering innovation in manufacturing SMEs. **Asia pacific management review**, v. 25 n. 3: 142-155, 2020.

AL-WASHALI, T.; SHARMA, S.; AL-NOZAILY, F.; HAIDERA, M.; KENNEDY, M. Modelling the Leakage Rate and Reduction Using Minimum Night Flow Analysis in an Intermittent Supply System. **Water**, v. 11, n. 48, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11010048>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Divisão Hidrográfica segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos**, 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/623673f5-4594-4f0f-96a1-78558083e8d9>. Acesso em: 13 set. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Saneamento Básico no Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/saneamento-basico-no-brasil>. Acesso em: 12 set. 2024.

ANDRADE SOBRINHO, R.; BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 783-795, 2016.

ANDRADE, F. M.; QUEIROZ, A. P. de. Publicações de autoria feminina no boletim paulista de geografia (1949-2018): análise da participação e das palavras-chave.

**RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 56, 121-139, 2023.

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.84267>.

ARAUJO, L. S., RAMOS, H.; COELHO, S. T. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. **Water Resources Management**, v. 20, p. 133-149, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>.

ARAÚJO, M. P. M.; ZVEIBIL, V. Z. A relação titular-prestador nos serviços na contratação dos serviços de saneamento básico. In CORDEIRO, B. S. (org.). **Lei Nacional de Saneamento Básico: Perspectivas para as políticas e gestão dos serviços públicos**. Brasília: Ministério das Cidades, 2009, v. 3, p. 467-486.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

ARES-PCJ. Agência Reguladora dos Serviços de Saneamento das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Missão e Visão**. Disponível em: <https://www.arespcj.com.br/conteudo/missao-e-visao>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ARSESP. Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.arsesp.sp.gov.br/agencia/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ATANANE, O. *et al.* Smart Buildings: Water Leakage Detection Using TinyML. **Sensors**, v. 23, n. 22, e9210, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23229210>

ÁVILA, C. A. M.; SÁNCHEZ-ROMERO, F. J.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; SÁNCHEZ, M. P. Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes. **Water**, v. 13, n. 14, e1909, 2021. <https://DOI:10.3390/w13141909>

AYAD, A.; KHALIFA, A.; FAWY, M.; MOAWAD, A. An integrated approach for non-revenue water reduction in water distribution networks based on field activities, optimisation, and GIS applications. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 4, p. 3509-3520, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.007>

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BASNET, L.; BRILL, D.; RANJITHAN, R.; MAHIN THAKUMAR, K., Supervised Machine Learning Approaches for Leak Localization in Water Distribution Systems: Impact of Complexities of Leak Characteristics. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 149, n. 8, 2023. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6047>

BECKER, LT, & GOULD, EM. Microsoft *Power BI*: Estendendo o Excel para Manipular, Analisar e Visualizar Dados Diversos. **Serials Review**, 45 (3), 184–188. 2019 <https://doi-org.ez128.periodicos.capes.gov.br/10.1080/00987913.2019.1644891>

BENÍTEZ, J.; DELGADO-GALVÁN, X.; IZQUIERDO, J.; PÉREZ-GARCÍA, R. Improving consistency in AHP decision-making processes. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 5, p. 2432-2441, 2012.

BEZERRA, S. T. M.; PERTEL, M.; MACÊDO, J. E. S. Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro. **Ambiente construído**, v. 19, n. 3, p. 249-258, 2019.

BLÁZQUEZ-GARCÍA, A.; CONDE, A.; MORI, U.; LOZANO, J. A., Water leak detection using self-supervised time series classification. **Information Sciences**, v. 574, p. 528-541, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.06.015>

BOHORQUEZ, J.; LAMBERT, M.F.; ALEXANDER, B.; SIMPSON, A.R.; ABBOTT, D. Stochastic Resonance Enhancement for Leak Detection in Pipelines Using Fluid Transients and Convolutional Neural Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 148, n. 3, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001504)

BORGES, M. C. P. *et al.* The Brazilian National System for Water and Sanitation Data (SNIS): Providing information on a municipal level on water and sanitation services. **Journal of Urban Management**, v. 11, n. 4, p. 530-542, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.08.002>. Acesso em: 31 out. 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz?** Agência Nacional de Águas. Brasília: SAG, 2011.

BRASIL. **Agenda 21 Global**. Ministério do Meio Ambiente, 2002. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global.html>. Acesso em: 29 abr. 2025

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019. 94p. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/publicacoes/ods6/ods6.pdf>. Acesso em 04 set. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 09 out. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Manual de Melhores Práticas da Gestão da Informação sobre Saneamento**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/projeto-acertar/AcertarManualdeMelhoresPraticasdaGestaodaInformacao.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Portaria nº 490, de 22 de março de 2021**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 23 mar, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-490-de-22-de-marco-de-2021-309988760>. Acesso em: 27 jul. 2024.

BRASIL DAS ÁGUAS. **Projeto Brasil das Águas: Revelando o Azul do Verde e Amarelo**. Disponível em: <https://brasildasaguas.com.br/educacional/regioes-hidrograficas/>. Acesso em: 07 fev. 2024.

BRITTON, T.; O'HALLORAN, K.; STEWART, R. A. Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 166-176, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.018>

CARVALHO, R. S. **Investimentos em controle de perdas dos sistemas de abastecimento de água nas bacias hidrográficas Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. Dissertação (Mestrado), 158 fls. Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2023.

CAVALCANTE, S. M. A.; ANDRIOLA, W. B. Avaliação da eficiência dos cursos de graduação da Universidade Federal do Ceará (UFC) através da Análise Envoltória de Dados (DEA). **Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa**, v. 5, p. 291-313, 2012.

CETRULO, T. B.; MARQUES, R. C.; MALHEIROS, T. F. An analytical review of the efficiency of water and sanitation utilities in developing countries. **Water research**, v. 161, p. 372-380, 2019.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Medindo a eficiência de unidades de tomada de decisão. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 1, p. 429-444, 1978.

CHAVES, A. C.; THOMAZ, A. C. F. Gestão pública e pesquisa Operacional: avaliação de desempenho em Agências da Previdência Social. **Revista do Serviço Público**, Brasília, DF, v. 59, n. 2, p. 221-236, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.21874/rsp.v59i2.146>. Acesso em: 07 dez. 2023.

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M., O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. **InternexT**, v. 10, n. 2, p. 1-5, 2015. <https://doi.org/10.18568/1980-4865.1021-5>.

CLARK, R. M.; STAFFORD, C. L.; GOODRICH, J. A. Water distribution systems: A spatial and cost evaluation. **Journal of the Water Resources Planning and Management Division**, v. 108, n. 3, p. 243-256, 1982.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciência Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336 p.

COMITÊS PCJ. **Relatório Síntese: Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035**. Porto Alegre: Consórcio Profill-Rhama PCJ, 2020.

COMITÊS PCJ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022: ano base 2021; versão simplificada**. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias PCJ, 2023. Disponível em: [https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/RELATORIO\\_SITUACAO\\_2023.pdf](https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/RELATORIO_SITUACAO_2023.pdf). Acesso em: 09 de out. 2023.

DIAZ, L.; GONZÁLEZ, A.; ROMERO, C. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. **European Journal of Operational Research**, v. 258, p. 607-616, 2017.

ELFIRDOUSSI, Selwa, *et al.* Assessing distance learning in higher education during the COVID-19 pandemic. **Education Research International**, 2020, 2020.1: 8890633.

FARAH, E.; SHAHROUR, I. Leakage detection using smart water system: Combination of water balance and automated minimum night flow. **Water Resources Management**, v. 31, p. 4821-4833, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1780-9>.

FARLEY, B.; MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B. Development and Field Validation of a Burst Localization Methodology. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 6, p. 706-733, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000290](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000290)

FARLEY, M., GARY, W., GHAZALI, Z. B. M., Istandar, A.; SINGH, S. **The Manager's NonRevenue Water Handbook a Guide to Understanding Water Losses**. Malaysia. Ranhill Utilities Berhad and the United States Agency for International Development (USAID), 2008.

FAROUK, A. M.; RAHMAN, R. A.; ROMALI, N. S. Non-revenue water reduction strategies: a systematic review. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 12, n. 1, p. 181-199, 2023. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0071>

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D., Losses reduction and energy production in water-distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 3, p. 237-244, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000179)

FORMIGA-JOHNSON, R. M.; BRITTO, A. L. Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, e02071, 2020.

FRACALANZA, A. P.; PAZ, M. G. A. da; ALVES, E. M. Water and sanitation in Brazil: conflicts, appropriation, and climate injustice. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 62, p. 904-918, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/DMA.V62I0.89421>. Acesso em: 09 out. 2024.

FREITAS, C. L. de; SILVA, F. G. B. DA; SILVA, A. T. Y. L.; BARBEDO, M. D. G. Analysis of a real water distribution system in Southern Minas Gerais using

geographical information system. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 31-39, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200380>

FUCHIGAMI, H. Y.; BARBOSA, F. C. **Análise Envoltória de Dados: Teoria e Aplicações práticas**. 1. ed., Itumbiara: ULBRA, 2018.

GERMANOPOULOS, G. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. **Civil Engineering Systems**, v. 2, n. 3, p. 171-179, 1985. <https://doi.org/10.1080/02630258508970401>

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GRANGEIRO, E. L. A.; RIBEIRO, M. M. R.; MIRANDA, L. I. B. de. Integração de políticas públicas no Brasil: o caso dos setores de recursos hídricos, urbano e saneamento. **Cadernos Metrópole**, v. 22, n. 48, p. 417–434, 2020.

GULARTE, C. **Um Estudo sobre a Submedição em Hidrômetros para Aplicação no Controle de Perdas Aparentes no Sistema de Abastecimento de Água de Blumenau**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, H. **Capitalismo Natural: criando a próxima revolução industrial**. São Paulo: Cultrix, 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População do Brasil e das Unidades da Federação**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 02 abr. 2024.

INDEX MUNDI. **People using at least basic sanitation services (% of population): Country Ranking, 2020**. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/SH.STA.BASS.ZS/rankings>. Acesso em: 02 ago. 2024.

ITB. **Estudo aponta que as perdas de água potável nos sistemas de distribuição desperdiçam mais de R\$ 10 bilhões/ano e quase 7 mil piscinas olímpicas de água/dia**, 2022. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/press-release-3.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.

ITB. Instituto Trata Brasil. **Água perdida no país poderia abastecer todas as 17,9 milhões de pessoas que residem nas favelas do Brasil por cerca de um ano e meio**. GO Associados, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp->

<content/uploads/2023/06/Press-Release-Estudo-de-Perdas-2023.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.

ITB. Instituto Trata Brasil. **Perdas de Água 2024**. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/perdas-de-agua-2024/>. Acesso em: 27 jul. 2024.

JACOBI, P. R. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, v. 36, n. 128, p. 189-205, 2006.

JACOBI, P. R.; BUCKERIDGE, M; RIBEIRO, W. C. Governança da água na Região Metropolitana de São Paulo – desafios à luz das mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 209-226, 2021.

KAFFASH, S.; NGUYEN, A. T.; ZHU, J. Big data algorithms and applications in intelligent transportation system: A review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 231, e107868, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107868>

KAFLE, M. D.; FONG, S.; NARASIMHAM, S. Active acoustic leak detection and localization in a plastic pipe using time delay estimation. **Applied Acoustics**, v. 187, e108482, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108482>

KINGDOM, B.; LIEMBERGER, R.; MARIN, P. **The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries**. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. World Bank Discussion Paper Number 8. Washington D.C., 2006.

KURKJIAN, G. Proper butterfly valve application avoids costly repairs. **Water Sewage Works**, v. 125; n. 6, p. 84-89, 1978.

KUSTERKO, S.; ENSSLIN, S.R.; ENSSLIN, L.; CHAVES, L. C. Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água: uma abordagem construtivista. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 615-626, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018156436>

LIEMBERGER, R.; WYATT, A. *Quantifying the global non-revenue water problem*. *Water Science & Technology*, v. 19, n. 3, p. 831-839, 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article-abstract/19/3/831/41417/Quantifying-the-global-non-revenue-water-problem?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 8 maio 2025.

LAYRARGUES, P. P.; LIMA, G. F. C. Mapeando as macro-tendências político-pedagógicas da educação ambiental contemporânea no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 1, p. 23-40, 2014.

- LI, J.; ZHENG, W.; LU, C. An Accurate Leakage Localization Method for Water Supply Network Based on Deep Learning Network. **Water Resources Management**, v. 36, n. 7, p. 2309-2325, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03144-x>
- LIEMBERGER, R; WYATT, A. Quantifying the global non-revenue water problem. **Water Supply**, v. 19, n.3, p.831-837, 2019.
- MALTA, F. S.; COSTA, E. M.; MAGRINI, A. Índice de vulnerabilidade socioambiental: uma proposta metodológica utilizando o caso do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 12, p. 3933-3944, 2017. <https://doi.org/10.1590/1413-812320172212.25032017>
- MARCON, A. M.; WESZ JÚNIOR, V. J. Informações sobre os serviços de saneamento básico: a realidade do déficit no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 2, e11521-e11521, 2024.
- MARQUES, F. B.; MACULAN, B. C. M. S.; SOUZA, R. R. A bibliometria na pós-graduação brasileira: uma revisão integrativa da literatura. **Transinformação**, v. 35, e227089, 2023. <https://doi.org/10.1590/2318-0889202335e227089>
- MARTINS, G. de A.; THEÓPHILO, C. R. **Metodologia da investigação científica para ciências sociais e aplicadas**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Balanco Hídrico**. Projeto COM+ÁGUA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/pmss/projeto-com-agua/balanco-hidrico>. Acesso em: 18 out. 2024.
- MVONGO, V. D.; DEFO, C.; NGUEMA, P. F.; EFON, B.; MBEYI, J. G. O. Analysis of water losses in seven small and medium-sized water distribution networks in the south region of Cameroon (Central Africa). **Water Practice & Technology**, p. 1-17, 2024. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.248>
- MOREIRA, P. S. C.; GUIMARÃES, A. J. R.; TSUNODA, D. F. Qual ferramenta bibliométrica escolher? um estudo comparativo entre softwares. **P2P & Inovação**, v. 6, n. 2, Ed. Especial, p. 140-158, 2020. <https://doi.org/10.21721/p2p.2020v6n2.p140-158>
- MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B.; MACHELL, J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 3, p. 309-318, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000030)

NEDJAR, N. H.; DJEBBAR, Y.; DJEMILI, L. Application of the analytical hierarchy process for planning the rehabilitation of water distribution networks. **Arab Gulf Journal of Scientific Research**, v. 41, n. 4, p. 518-538, 2023 <https://doi.org/10.1108/AGJSR-07-2022-0110>.

NYGÅRD, K.; TEVERDAL, A.; WAHL, E.; AAVITSLAND, P. Breaks and maintenance work in the water distribution systems and gastrointestinal illness: a cohort study. **International Journal of Epidemiology**, v. 36, n. 4, p. 873-880, 2007. <https://doi.org/10.1093/ije/dym029>

OCDE. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. OECD Publishing, Paris, 2015.

ONU. Organização das Nações Unidas. A Agenda 2030, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>. Acesso em: 25 set. 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas. **ONU News**. Perspectiva Global Reportagens Humanas, 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/03/1811712#:~:text=Em%20um%20planeta%20com%208,equivalente%20a%203%2C6%20bilh%C3%B5es>. Acesso em: 2 ago. 2024.

OVIEDO-OCAÑA, E. R., et al. Water-loss management under data scarcity: Case study in a small municipality in a developing country. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 3, e05020001, 2020.

PANJAITAN, M. I. Simple Additive Weighting (SAW) method in determining beneficiaries of foundation benefits. **Login**, v. 13, n. 1, p. 19-25, 2019.

PARDO, M. C.; MARTÍNEZ, P. F.; ZABALETA, A. P. An initial assessment of water security in Europe using a DEA approach. **Sustainable Technology and Entrepreneurship**, v. 1, n. 1, e100002, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100002>

PÉREZ-PÉREZ, E. J.; LÓPEZ-ESTRADA, F. R.; VALENCIA-PALOMO, G.; TORRES, L.; PUIG, V.; MINA-ANTONIO, J. D. Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. **Control Engineering Practice**, v. 107, e104677, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>

PHILIPPI JR., A.; PELICIONI, M. C. F. **Educação ambiental e sustentabilidade**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2011.

R Core Team R. A Language and environment for statistical computing. (Version 4.1) [Computer software]. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2022-01-01), 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org>. Acesso em: 12 abr. 2024.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1970. [https://DOI: 10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-1)

SAATY, T. L. Decision making: the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). **Journal of systems science and systems engineering**, v. 13, n. 1, p. 1-35, 2004. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

SANASA. Sistema de Abastecimento de Água e Saneamento. **Programa de controle de perdas de água**, 2023. Disponível em: [https://www.sanasa.com.br/conteudo/conteudo2.aspx?f=l&par\\_nrod=1529&flag=TF](https://www.sanasa.com.br/conteudo/conteudo2.aspx?f=l&par_nrod=1529&flag=TF). Acesso em: 09 out. 2024.

SANTI, A. D. de. **Benchmarking aplicado ao controle das perdas de água no contexto das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. Dissertação (Mestrado), 170 fls. Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

SANTI, A. D. de; CETRULO, T. B.; MALHEIROS, T. F. Indicadores de perdas de água em sistemas de saneamento: disponibilidade e confiabilidade de dados em nível de bacia hidrográfica. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2: p. 386-410, 2018. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e22018386-410>

SANTI, A. D. de; CETRULO, T. B.; MALHEIROS, T. F. Water loss control practices in developing countries: a case study of a Brazilian region. **Water Supply**, v. 21, n. 2, p. 848–858, 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.351>

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. rev. atual. São Paulo: Cortez, 2017.

SHIDDIQI, A. M.; CARDELL-OLIVER, R.; DATTA, A. An Advanced Sensor Placement Strategy for Small Leaks Quantification Using Lean Graphs. **Water**, v. 12, n. 12, e3439, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123439>

SILVA, M. S. L.; MATTHIENSEN, A.; BRITO, L. T. L.; LIMA, J. E. F. W.; CARVALHO, C. J. R. de. **Água e Saneamento**: contribuições da EMBRAPA. Brasília-DF: EMBRAPA, 2018.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** (ano-base 2022), 2022a. Disponível em: <https://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em: 27 jul. 2024.

SNIS. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Glossário de indicadores**: Água e Esgotos Indicadores econômico-financeiros e administrativos, 2022b.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto – Visão Geral (ano base 2022)**, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_AE\\_SNIS\\_2023.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf).

Acesso em: 09 de out. 2024.

SODKOMKHAM, Thanwarhat; RATANATAMSKUL, Chavalit; CHANDRACHAI, Achara. A novel integrated material flow cost accounting (MFCA)-IoT-lean management system approach to improving water use efficiency and reducing costs in the beverage industry. **Cleaner Environmental Systems**, 2024, 15: 100232.

SOUZA, A. C. de; FIALHO, F. A. P.; OTANI, N. **TCC – Métodos e Técnicas**. Florianópolis: Visual Books, 2007.

STEFFELBAUER, D. B.; FUCHS-HANUSCH, D. Efficient Sensor Placement for Leak Localization Considering Uncertainties. **Water Resour Manage**, v. 30, p. 5517–5533, 2016. <https://DOI.10.1007/s11269-016-1504-6>

SUCENA, M. P.; SILVA, L. M. Método de análise multicritério fuzzy para seleção de transportadora de cargas rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 12, n. 2, 2020.

TARDELLI FILHO, J. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**, p. 1-20, 2016. DOI 10.4322/dae.2015.012  
The jamovi project (2022). *jamovi*. (Version 2.3) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

THORNTON, J.; STHURM, R.; KUNKEL, G. **Water loss control**. 2. ed. New York: Mc Graw Hill, 2008.

- TORRES, Y. L.; TORRES, B. G.; IGNACIO, A. A. V. Análise da performance dos times do Campeonato Brasileiro de Futebol Masculino de 2019 através do Network DEA. **Revista Brasileira de Futsal e Futebol**, v. 14, n. 58, p. 201-219, 2022.
- TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **A água**. Scienza: São Carlos, 2020.
- TZANAKAKIS, V. A.; PARANYCHIANAKIS, N. V.; ANGELAKIS, A. N. Water Supply and Water Scarcity. **Water**, v. 12, n. 2347, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12092347>.
- URBIZAGÁSTEGUI-ALVARADO, R. Bibliometria brasileira: análise de copalavras. **Transinformação**, v. 34, e220004, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0889202234e220004>.
- UQ. University of Queensland Economics. CEPA Software. University of Queensland. Disponível em: <https://economics.uq.edu.au/cepa/software>. Acesso em: 12 mai. 2025.
- VANIJJIRATTIKHAN, R.; KHOMSAY, S.; KITBUTRAWAT, N.; KHOMSAY, K.; SUPAKCHUKUL, U.; UDOMSUK, S.; SUWATTHIKUL, J.; OUMTRAKUL, N.; ANUSART, K. AI-based acoustic leak detection in water distribution systems. **Results in Engineering**, v. 15, e100557, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.10055>.
- VOSviewer. VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**. Manual for VOSviewer version 1.6.20. Universiteit Leiden, 2023.
- WU, Z.Y; SAGE, P.; TURTLE, D. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 1, p. 116-128, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(116))
- YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- YU, T.; CHEN, X.; YAN, W.; XU, Z.; YE, M., Leak detection in water distribution systems by classifying vibration signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 185, n. 15, e109810, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109810>