



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ**  
**PRÓ-REITORIA DE ENSINO E GRADUAÇÃO**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ilana Syanne Martins Uchôa

**PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMA**  
**ALTERNATIVO DE TRATAMENTO EM ZONA URBANA AMAZÔNICA**

MACAPÁ-AP

2026

Ilana Syanne Martins Uchôa

**PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMA  
ALTERNATIVO DE TRATAMENTO EM ZONA URBANA AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão do Curso submetido ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Campus Marco Zero da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha.

MACAPÁ-AP

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP  
Elaborado por Aline Farias Bandeira Couto – CRB-2 1700/O

---

U17p Uchôa, Ilana Syanne Martins.

Parâmetros hidráulicos e de qualidade da água em sistema alternativo de tratamento em Zona Urbana Amazônica / Ilana Syanne Martins Uchôa. - Macapá, 2026.

1 recurso eletrônico.

74 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2026.

Orientador: Alan Cavalcanti da Cunha.

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Engenharia Hidráulica - Abastecimento de água. 2. Saneamento urbano - Amazônia. 3. Estação de Tratamento de Água. I. Cunha, Alan Cavalcanti da, orientador. II. Universidade Federal do Amapá. III. Título.

CDD 23. ed. – 628.1

Ilana Syanne Martins Uchôa

**PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMA  
ALTERNATIVO DE TRATAMENTO EM ZONA URBANA AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão do Curso submetido ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Campus Marco Zero da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 02/03/2026.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha  
Orientador – UNIFAP

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Jennefer Lavor Bentes  
Examinadora interna – UNIFAP

---

Prof. Me. Adenilson Costa de Oliveira  
Examinador interno – UNIFAP

## DEDICATÓRIA

*"À minha mãe, que partiu quando eu tinha apenas três anos, mas cuja presença jamais deixou de existir em minha vida. Onde quer que esteja, espero que sinta orgulho da mulher que me tornei."*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Prof. Alan Cavalcanti da Cunha, pelo apoio incondicional ao longo de toda a pesquisa, pela orientação técnica rigorosa, pela confiança depositada em meu trabalho e, sobretudo, pelo cuidado e sensibilidade com meu equilíbrio emocional durante as etapas mais desafiadoras desta trajetória. Sua condução foi decisiva para a concretização deste estudo.

À Coordenação de Curso e ao Colegiado de Engenharia Civil, pelo suporte administrativo, pela disponibilidade e pelo auxílio nos trâmites institucionais necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos Laboratórios de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA) e de Fenômenos de Transporte, Hidráulica e Saneamento Ambiental (LFTHSAM), pelo acesso à infraestrutura, pela disponibilização de reagentes e equipamentos, e pelo ambiente técnico-científico que proporcionou aprendizado e amadurecimento acadêmico.

Ao Prof. Alaan Ubaiara Brito, pelo suporte técnico no desenvolvimento e implementação do sistema fotovoltaico incorporado à pesquisa, contribuindo significativamente para a viabilidade e qualidade dos resultados obtidos.

Ao técnico administrativo Márcio Clei Silva de Oliveira, pelo apoio fundamental nas atividades práticas em campo, pela parceria, disponibilidade e companheirismo demonstrados ao longo das coletas e ensaios realizados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento concedido por meio de bolsa de pesquisa Pibic, ao Projeto TedPlan (Fundação Nacional da Saúde - FUNASA 06/2018) e aos projetos CNPq #405361/2025-4, #308302/2025-7 e #305875/2021-3, essenciais para a execução deste trabalho.

Por fim, estendo minha gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

## RESUMO

Mananciais subterrâneos constituem fontes estratégicas de abastecimento em regiões com baixa cobertura de saneamento, especialmente na Amazônia, onde soluções descentralizadas podem ampliar o acesso à água tratada. Este estudo avaliou a qualidade da água subterrânea e tratada em zona urbana do estado do Amapá utilizando o protótipo SAASI, composto por poço tubular, filtro, clorador e sistema fotovoltaico de bombeamento de vazão variável. Entre setembro de 2023 e agosto de 2025, foram monitorados parâmetros físico-químicos, microbiológicos e hidráulicos, posteriormente correlacionados estatisticamente com fatores sazonais e etapas de tratamento. Análises multivariadas demonstraram que condicionantes operacionais, vazão, perda de carga, estabilidade hidráulica e transições entre etapas de tratamento, exerceram influência significativa sobre a variabilidade da qualidade da água, afetando especialmente turbidez, coliformes totais e cloro residual. A probabilidade de não conformidades foi maior no período chuvoso ( $p < 0,05$ ). Embora os parâmetros turbidez, cor, fósforo, ferro e manganês tenham apresentado variações expressivas ( $p < 0,05$ ), o sistema manteve elevada eficiência da cloração e desempenho hidráulico consistente. Apesar dessas limitações, o SAASI demonstrou viabilidade técnica e operacional como tecnologia social, reforçando o papel de soluções descentralizadas na segurança hídrica, considerando-se o contexto vulnerável que demanda abordagem adaptativa, sustentável e sensível à dinâmica operacional de sistemas de pequeno porte.

**Palavras-chave:** Abastecimento de água; Manancial Subterrâneo; Estação de Tratamento de Água; Sistema fotovoltaico.

## ABSTRACT

Groundwater sources constitute strategic supplies in regions with limited sanitation coverage, particularly in the Amazon, where decentralized solutions can expand access to treated water. This study evaluated the quality of groundwater and treated water in an urban area of the state of Amapá using the SAASI prototype, composed of a tubular well, filter, chlorinator, and a photovoltaic pumping system with variable flow. Between September 2023 and August 2025, physicochemical, microbiological, and hydraulic parameters were monitored and subsequently statistically correlated with seasonal factors and treatment stages. Multivariate analyses showed that operational conditions—including flow rate, head loss, hydraulic stability, and transitions between treatment steps—exerted significant influence on water quality variability, particularly affecting turbidity, total coliforms, and residual chlorine. The likelihood of noncompliance was higher during the rainy season ( $p < 0.05$ ). Although turbidity, color, phosphorus, iron, and manganese exhibited marked variations ( $p < 0.05$ ), the system maintained high chlorination efficiency and consistent hydraulic performance. Despite these limitations, SAASI demonstrated technical and operational feasibility as a social technology, reinforcing the role of decentralized solutions in water security within vulnerable contexts that require adaptive, sustainable, and operationally sensitive approaches for small-scale systems.

**Keywords:** Water Supply; Groundwater Source; Water Treatment Plant; Photovoltaic System.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Delineamento Amostral para implementação do SAASI.....	23
<b>Figura 2</b> - Localização da área de estudo, equipamentos e etapas de coleta no SAASI.....	24
<b>Figura 3</b> - Pontos Coletados no Protótipo SAASI.....	27
<b>Figura 4</b> - Esquema Simplificado desenvolvido (Protótipo SAASI).....	30
<b>Figura 5 - a e b)</b> Características hidrogeoquímicas do poço tubular com variação sazonal do nível d'água na captação de água do SAASI a cada 2 m; <b>c)</b> Sazonalidade de precipitação e temperaturas em Macapá.....	33
<b>Figura 6</b> - Fluxograma para as análises estatísticas.....	34
<b>Figura 1.A</b> - Modelo conceitual da pesquisa e fluxograma metodológico.....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Variação sazonal de parâmetros da qualidade da água subterrânea por categoria e fase do tratamento.....	37
<b>Gráfico 2</b> - Contribuição das Variáveis no PCA.....	38
<b>Gráfico 3</b> - Análise da Qualidade de Água por Estação por gráfico Biplot.....	39
<b>Gráfico 4</b> - Correlograma de todos os parâmetros físico-químicos, microbiológicos, hidráulicos e cinéticos analisados.....	40
<b>Gráfico 1.A</b> - Correlograma em função da Estação Verão.....	65
<b>Gráfico 2.A</b> - Correlograma em função da Estação Transitória.....	65
<b>Gráfico 3.A</b> - BiPlot PCA.....	66
<b>Gráfico 4.A</b> - BoxPlot para o parâmetro E.coli.....	66
<b>Gráfico 5.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Fósforo.....	67
<b>Gráfico 6.A</b> - BoxPlot para o parâmetro pH.....	67
<b>Gráfico 7.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Nitrato.....	68
<b>Gráfico 8.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Manganês.....	68
<b>Gráfico 9.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Amônia.....	69
<b>Gráfico 10.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Ferro.....	69
<b>Gráfico 11.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Sólidos Suspensos.....	70
<b>Gráfico 12.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Turbidez.....	70
<b>Gráfico 13.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Cloro Livre.....	71
<b>Gráfico 14.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Cloreto.....	71
<b>Gráfico 15.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Cor.....	72
<b>Gráfico 16.A</b> - BoxPlot para o parâmetro Coliformes Totais.....	72
<b>Gráfico 17.A, 18.A e 19.A</b> - Correlogramas em função da Sazonalidade: Inverno, Verão e Transição.....	73
<b>Gráfico 20.A, 21.A, 22.A, 23.A e 24.A</b> - Correlograma para cada fase de tratamento estudada.....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Descrição dos parâmetros da qualidade da água utilizados no experimento, valores máximos permitidos, normas e referências legais.....	26
<b>Tabela 2</b> - Dissolução da pastilha de cloro.....	28
<b>Tabela 3</b> - Parâmetros hidráulicos do protótipo saasi: trechos 1-5; descrição hidráulica dos trechos; perda de carga (hp); observações e referências.....	31
<b>Tabela 4</b> - Índice de conformidade dos parâmetros analisados em comparação com a legislação (%), antes e pós-tratamento no SAASI para $h_{pt} = 30,68 \pm 2,00$ m.c.a e $W = 0,208 \pm 0,02$ g/s.....	35
<b>Tabela 1.A</b> - Dataframe “qabomb8.txt” utilizado para as Análises Estatística da Pesquisa....	51
<b>Tabela 2.A</b> - Cálculo de Perda de Carga Localizada.....	61
<b>Tabela 3.A</b> - Cálculo de Perda de Carga por Hazen-Williams.....	64

## LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico  
ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária  
APHA - American Public Health Association  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
 $Cl_{Total}$  - Cloro Livre  
 $Cl_{Free}$  - Cloro Total  
CT - Coliformes Totais  
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio  
E. coli - *Escherichia coli*  
FUNASA - Fundação Nacional de Saúde  
hpt - Perda de carga total  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
MTC - Método de Titulação Colorimétrica (quando aplicável ao pH)  
 $NH_3$  - Nitrogênio Amoniacal (Amônia)  
P - Fósforo  
pH - Potencial Hidrogeniônico  
PC - Componente Principal (*Principal Component*)  
PCA - Análise de Componentes Principais  
PMSB - Planos Municipais de Saneamento Básico  
PREC - Precipitação  
Pt-Co - Unidade Platina-Cobalto (Cor Aparente)  
PVC - Policloreto de Vinila (material das tubulações)  
Q - Vazão Volumétrica  
RegCHUV - Regime Chuvoso  
RegSECO - Regime Seco  
SAAA - Sistema Alternativo de Abastecimento de Água  
SAASI - Sistema de Abastecimento de Água Subterrâneo Isolado  
SS - Sólidos em Suspensão  
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento  
TCCA - Ácido Tricloroisocianúrico (componente das pastilhas de cloro)

$T_{MAX}$  - Temperatura Máxima

$T_{MIN}$  - Temperatura Mínima

Turb - Turbidez

UH -Unidade Hazen (referente à cor da água)

VMP - Valor Máximo Permitido (referente aos padrões de potabilidade)

UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez

UR - Umidade Relativa

W - Taxa média relativa de dissolução do cloro (parâmetro cinético)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>3. PERCURSO METODOLÓGICO.....</b>	<b>23</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEO ISOLADO (SAASI).....	24
3.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	25
3.4 MONITORAMENTO HIDRÁULICO.....	28
3.5 SAZONALIDADE E PERFILAMENTO PRÉVIO HIDROGEOQUÍMICO DO SOLO.....	32
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	33
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO (PORTARIA Nº 888/2021 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE E RESOLUÇÃO DO CONAMA Nº 357/2005.....	35
4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS, FÍSICOS E MICROBIOLÓGICOS.....	36
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>41</b>
5.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE TRATAMENTO E SAZONALIDADE.....	42
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>50</b>
APÊNDICES A- MODELO CONCEITUAL DA PESQUISA.....	50
APÊNDICE B- TABELAS COM OS DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS	

HIPÓTESES.....	51
APÊNDICE C- GRÁFICO COM OS DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS	
HIPÓTESES.....	65

## 1. INTRODUÇÃO

As fontes subterrâneas representam uma das alternativas mais acessíveis e estratégicas para o abastecimento de água potável, sobretudo em regiões com baixa cobertura de redes públicas de distribuição. Sua principal vantagem está na maior proteção contra poluição externa, além da proximidade em relação ao local de consumo (TSUTIYA, 2006; GIAMPÁ & GONÇALES, 2013; VON SPERLING *et al.*, 2020; SNIS, 2020; GROTT *et al.*, 2018; APHA, 2003). Contudo, apesar desses atributos protetivos e de praticidade de seu uso, a água de poços nem sempre atende integralmente aos padrões legais de potabilidade, podendo apresentar riscos à saúde em função da presença de microrganismos patogênicos devido à poluição natural ou antrópica (VON SPERLING *et al.*, 2020). Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de tratamentos complementares que assegurem sua qualidade.

Na região amazônica os indicadores de infraestrutura e de serviços de saneamento básico são geralmente deficitários. Tais deficiências impactam diretamente os indicadores de saúde pública, meio ambiente, habitação, e o de desenvolvimento socioeconômico regional, tanto das populações urbanas quanto rurais. Todavia, as dimensões mais sensíveis na área de saneamento básico são as de abastecimento de água potável e de esgotamento sanitário (SILVA, A. *et al.*, 2025; PENA *et al.*, 2025; VIEGAS *et al.*, 2024; DE SOUSA *et al.*, 2024; ARAÚJO *et al.*, 2021, 2023).

No estado do Amapá, apenas 33,7% da população tem acesso à rede de abastecimento, sendo os poços frequentemente a única alternativa viável para comunidades urbanas ou rurais isoladas (GIAMPÁ & GONÇALES, 2013; SNIS, 2020; GROTT *et al.*, 2018). Esse cenário evidencia a urgência de soluções simples e adaptadas à realidade socioeconômica amazônica em vista da urgência da universalização dos serviços públicos de abastecimento de água.

Dessa forma, esta pesquisa se justifica pela necessidade de investigar o uso de tecnologias sociais adaptadas à realidade amazônica, buscando garantir o acesso à água potável em sistemas isolados. A utilização de soluções simplificadas, de baixo custo e operacionalmente viável em comunidades rurais e urbanas desassistidas, é garantir minimamente a conformidade sanitária alinhadas com as diretrizes dos Planos Municipais de Saneamento Básico do Estado do Amapá (PMSB) (TEDPLAN, 2023). Ao propor a integração entre um sistema simplificado de captação de água subterrânea, filtração e cloração, justifica-se a busca por uma solução factível para superar a carência de abastecimento de água potável segura, mitigando riscos de contaminação hídrica, especialmente quando associados à ausência de redes coletoras e ao lançamento inadequado de esgoto sanitário em áreas urbanas

e periurbanas (GROTT *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2023; VIEGAS *et al.*, 2024; SILVA, A. *et al.*, 2025).

Entre as alternativas de tratamento, destaca-se a combinação de filtração e simples desinfecção por cloração, proposta como método de baixo custo e de fácil aplicação. A desinfecção desempenha papel central ao reduzir significativamente a carga de bactérias, protozoários, vírus e helmintos, diferindo da esterilização por não eliminar completamente todos os microrganismos presentes (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2015). O cloro, além de ser amplamente disponível, apresenta eficácia comprovada na inativação da maioria dos patógenos, baixo custo, facilidade de dosagem e capacidade de manter um residual que protege a água durante a distribuição e reservação.

A presente pesquisa propõe a análise da implementação de um Sistema de Abastecimento de Água Subterrâneo Isolado (SAASI), o qual é baseado em um pacote tecnológico alternativo de fácil instalação e operação (captação subterrânea, filtração, desinfecção por cloração acoplado a um sistema fotovoltaico de bombeamento). O conceito de acoplamento com sistema fotovoltaico está relacionado com um problema frequente regional em sistemas simplificados de bombeamento, crítica para operar e manter esses sistemas em áreas rurais isoladas (SENA DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Além disso, a deficiência de infraestrutura sanitária de abastecimento público na Amazônia configura um cenário preocupante, caracterizado pela ampla disseminação de instalação de poços em regiões desassistidas como alternativa para assegurar, minimamente, o acesso à água potável (GROTT *et al.*, 2018). A principal justificativa da pesquisa é que a segurança operacional para manter a conformidade legalmente exigida de potabilidade da água também depende de monitoramento contínuo das condições hidráulicas e da qualidade da água dos sistemas alternativos, os quais são significativamente dependentes da sazonalidade hidrológica e de cada etapa de tratamento.

Nossa hipótese principal é que o SAASI apresenta um desempenho técnico-operacional capaz de assegurar padrões mínimos de potabilidade e de operação hidráulica estável, crítica para uso em áreas rurais remotas, constituindo-se como tecnologia social de baixo custo, de fácil operação e replicabilidade na Amazônia, onde inexistem redes de distribuição convencional.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Neste contexto, o objetivo principal da pesquisa é analisar de forma inédita a proposta da solução alternativa do protótipo SAASI, a partir do monitoramento de suas componentes hidráulicas e de qualidade da água, considerando-se sua eficiência e conformidade sanitária (físico-química e microbiológica) a partir do tratamento da água em poço tubular.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Monitorar a qualidade da água bruta e tratada, avaliando sua conformidade às normas ambientais (CONAMA 357/2005) e de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2020;
- 2) Monitorar os parâmetros hidráulicos, correlacionando-os com os de qualidade da água, verificando-se os critérios previstos nas normas técnicas vigentes (ABNT NBR 12.116/1992);
- 3) Testar procedimentos de tratamento, avaliando-se a eficiência operacional durante os processos de filtração e desinfecção de água tratada e no reservatório;
- 4) Comparar e correlacionar sazonalmente o desempenho operacional por etapas específicas de tratamento, sua eficiência e adequação e conformidade técnica de concepção e alternativas de tratamento de água (ABNT NBR 12.116/1992).
- 5) Propor melhorias operacionais gerais do SAASI, quando acoplado a um sistema fotovoltaico isolado de bombeamento;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No contexto urbano amazônico, a forte dependência do consumo humano de águas subterrâneas está relacionada à baixa integração das infraestruturas de saneamento, mobilidade e uso do solo (PENA *et al.*, 2025). Em Macapá, esse quadro é traduzido pela segregação urbana, historicamente associada a desigualdades socioeconômicas, que limita o investimento público em áreas vulneráveis e perpetua disparidades no acesso à infraestrutura (NEIRA *et al.*, 2024; BENASSI & DE FALCO, 2025).

A justificativa da elaboração da presente pesquisa é a necessidade de uma análise crítica sobre as vantagens ou desvantagens potenciais de implementação do SAASI em condições típicas da Amazônia. Principalmente quanto a variabilidade hidrológica sazonal na captação de água do manancial subterrâneo. Além disso, registrar um caso típico de operação de um SAAA (Sistema Alternativo de Abastecimento de Água) em um poço tubular isolado,

destacando-se seu desempenho técnico-operacional de mais longo prazo (2 anos), revela vantagens e limitações técnicas relevantes frente aos níveis de conformidade legal e aos padrões de potabilidade exigidos. Assim, as características hidráulico-operacionais serviram como influência de fatores sazonais na qualidade da água por etapa de tratamento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade da água em sistemas naturais, incluindo mananciais subterrâneos, vem sendo progressivamente afetada por fatores antropogênicos e climáticos. Esse cenário demanda soluções tecnológicas capazes de responder à variabilidade hidrológica e às novas pressões ambientais. Zhang *et al.* (2025) destacam a importância de abordagens adaptativas que integrem variáveis temporais, hidrológicas e sazonais em análises robustas de qualidade da água.

No contexto brasileiro, estudos têm evidenciado a influência da precariedade do saneamento básico na qualidade físico-química e microbiológica das águas subterrâneas, sobretudo em áreas urbanas da Amazônia (SILVA, A. *et al.*, 2025). Em regiões como Cuiabá-MG, por exemplo, o uso de fossas rudimentares e o descarte inadequado de esgoto são apontados como os principais contaminantes dos aquíferos freáticos (APOITIA *et al.*, 2003; SILVA, D. *et al.*, 2014). A legislação brasileira, por meio da Resolução CONAMA nº 396/2008 e da Portaria MS nº 2.914/2011, define água subterrânea destinada ao “consumo humano” como aquela utilizada para banho, preparo de alimentos, dessedentação e higiene pessoal (BRASIL, 2009).

Embora fundamentais para o abastecimento, pesquisas quali-quantitativas sobre águas subterrâneas amazônicas permanecem escassas (BRASIL, 2009; GROTT *et al.*, 2018; SILVA, A. *et al.*, 2025). A situação torna-se crítica em áreas densamente povoadas, como Macapá-AP, cuja zona urbana concentra 522 mil habitantes, representando 68,9% da população estadual (IBGE, 2022). Estima-se que 60–65% dos domicílios dependem de mananciais subterrâneos, enquanto apenas 56,4% possuem ligação à rede de água e menos de 10% são atendidos por rede coletora de esgoto (IBGE, 2022). Entre os demais domicílios, predominam fossas rudimentares e sépticas, além do descarte direto em corpos d’água, ampliando o risco de contaminação e a insegurança hídrica local (GROTT *et al.*, 2018; SILVA, A. *et al.*, 2025).

Além dos problemas de qualidade, novos fatores têm intensificado a vulnerabilidade hidrológica urbana. Em Macapá, períodos de estiagem (setembro a novembro) têm sido associados a rebaixamentos críticos do lençol freático, ainda não quantificados oficialmente, agravados pela forte demanda urbana e pela baixa profundidade dos poços, geralmente entre 6 a 70 m (GROTT *et al.*, 2018). Tais condições elevam o risco de colapso de poços, especialmente sob cenários de mudança climática e recarga limitada dos aquíferos em períodos secos (SOUZA *et al.*, 2024). Por estas razões é importante avaliar as condições hidráulico-operacionais dos poços (taxas de bombeamento x demanda).

Diversos autores identificam como principais contaminantes das águas subterrâneas o esgoto doméstico, vazamentos de combustíveis, resíduos sólidos e dejetos animais (TUNDISI, 2011). Impactos semelhantes são observados em diferentes regiões do mundo, incluindo efeitos de fossas sobre aquíferos (KATZ; EBERTS; KAUFFMAN, 2011), degradação em áreas urbanizadas de clima semiárido nos EUA (CARLSON *et al.*, 2011) e megacidades do sul da Ásia (HAQUE; ONODERA; SHIMIZU, 2013).

Os reflexos sanitários desse cenário são também amplamente documentados na literatura médico-sanitária (NERI, 2004; SOUZA, FAUTINO & RODRIGUES, 2011; DIAS *et al.*, 2013; PORCY *et al.*, 2013; FERRAZ *et al.*, 2014; GROTT *et al.*, 2018; SILVA, A. *et al.*, 2025), evidenciando maior incidência de doenças de veiculação hídrica em localidades sem serviços adequados de saneamento. Mesmo com alternativas paliativas, como o consumo de água mineral, persistem registros de não conformidade da qualidade, ampliando a insegurança em termos gerais (CUNHA *et al.*, 2012).

No que tange ao tratamento, a desinfecção tem por finalidade a destruição de microrganismos patogênicos presentes na água (bactérias, protozoários, vírus e vermes). Todavia, é importante notar a diferença entre desinfecção e esterilização. A desinfecção é necessária porque não é possível assegurar a remoção total dos microrganismos pelos processos físico-químicos, usualmente utilizados no tratamento de água. A esterilização, no entanto, significa destruir ou inativar uma fração ou completamente todos os organismos, patogênicos ou não. Por exemplo, os vírus de hepatite ou poliomielite não são completamente destruídos ou inativados pelos processos usuais de desinfecção (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018).

Entre os agentes da desinfecção em água de abastecimento humano o mais amplamente utilizado é o cloro pelas seguintes razões: 1) é facilmente disponível como gás, líquido ou sólido (hipoclorito); 2) baixo custo, 3) fácil aplicação devido sua alta solubilidade (7,0 g/L a aproximadamente 20°C; 4) deixa um residual em solução, de concentração facilmente quantificável que, não sendo perigoso a saúde humana, protege o sistema de distribuição; 5) É capaz de destruir/desativar a maioria dos microrganismos patogênicos (TSUTYIA, 2007; HELLER, 2010; LIBÂNIO, 2010; RICHTER, 2009; LENZI, 2009; KERRY J. HOWE, *et al.*, 2012; VON SPERLING, *et al.*, 2020; MIHELIC e ZIMMERMAN, 2012, AZEVEDO NETTO, 2018).

A cloração tem como objetivo principal a desinfecção e tem sido muito extensamente utilizado para este fim que os termos cloração e desinfecção são praticamente sinônimos. Mas o maior poder oxidante do cloro torna-se útil também para outras finalidades, como o controle

de odor, remoção de sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico que causa fedor de esgoto), Fe, Mn, remoção de cor, entre outros (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018). Na Amazônia, em geral, tanto o Fe quanto o Mn são persistentes e frequentes em águas subterrâneas, sendo fatores críticos na escolha destes mananciais com este propósito (GROTT, et al, 2018; ARAÚJO et al., 2021). Os cloradores são aparelhos destinados a fazer a aplicação do cloro na água, destacando-se os de aplicação direta sob pressão e os de solução a vácuo. Nos primeiros, o cloro é aplicado diretamente aproveitando a pressão. Todavia, o tipo direto só é recomendado onde não é possível operar o injetor. E, para muitas instalações em áreas remotas, sem recursos, utiliza-se o tipo direto com solução (até 54 kg/dia) (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018).

O mecanismo de desinfecção depende basicamente da natureza do desinfetante e do tipo de organismo que se pretende inativar. Algumas espécies como esporos e vírus são mais resistentes que as bactérias (AZEVEDO NETTO, 2018). E como os mecanismos da desinfecção não são completamente conhecidos, há fortes evidências de que alguns agentes químicos da desinfecção agem pela inativação de enzimas essenciais à vida destes microrganismos ou vírus. Todavia, o decaimento da concentração de microrganismo não parece ser modelado a partir de uma equação do tipo “reação de 1ª ordem (equação diferencial de 1ª ordem) onde o seu decaimento, K, depende da temperatura, pH e outros fatores do meio ambiente (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018), mas sim a partir da seguinte equação:  $dN/dt = -K.N.t$ . (1) que ao ser integrada na base 10 pode apresentar a seguinte forma:  $t^2 = 2/K \log(N/N_0)$  (2) Em pH 7, valores de K para o cloro são cerca de  $1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  para o cloro livre e de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  para o cloro combinado. Isto é, para condições idênticas, o cloro combinado necessita de um tempo de aproximadamente 30 vezes maior que o cloro livre.

A influência da concentração de cloro (C) segue aproximadamente a relação empírica  $Cn.t = \text{Constante}$ , onde n é uma constante de diluição, determinado experimentalmente, onde  $n < 1$  indica que o tempo de contato é mais importante que a concentração, onde  $[0,5 < n < 1,0]$ . Por outro lado, o efeito do pH na desinfecção pode ser apreciado tanto para o caso de aplicação quanto para o caso de cloro livre quanto como no caso de cloraminas. Assim, quanto maior o pH maiores são os tempos necessários para sua destruição. Razão pela qual nas estações de tratamento de água é necessário fazer a cloração antes da elevação do pH (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018).

O hipoclorito HClO é o agente mais ativo da desinfecção, e o íon hipoclorito é praticamente inativo. A valores de pH normais no tratamento da água, o ácido hipocloroso

dissocia-se na proporção entre 100% a 0% para diferentes níveis de pH. Quanto maior o pH menor a dissociação e quanto menor o pH maior a concentração de HClO (RICHTER, 2009; AZEVEDO NETTO, 2018).

### 3. PERCURSO METODOLÓGICO

A presente pesquisa foi tipicamente experimental e aplicada, com abordagem quantitativa, voltada à avaliação do desempenho hidráulico e da avaliação da qualidade físico-química e microbiológica da água bruta e tratada a partir de um sistema alternativo simplificado de abastecimento e simples desinfecção. O estudo foi realizado através de coletas mensais da qualidade da água, com acompanhamento hidráulico do SAASI, entre setembro de 2023 e agosto de 2025. Portanto, foi possível quantificar o efeito da sazonalidade hidrológico-climática sobre o poço, onde seu perfil hidrogeoquímico é conhecido, servindo como referência para avaliar e interpretar os parâmetros da qualidade da água no manancial a partir da influência do nível do lençol freático. Para melhor compreensão do funcionamento um modelo conceitual do SAASI são apresentadas as etapas de pesquisa, com suas respectivas descrições e detalhamento na figura 1 abaixo e nos Apêndices (Apêndice A, Figura 1.A).

**Figura 1** - Delineamento Amostral para implementação do SAASI.



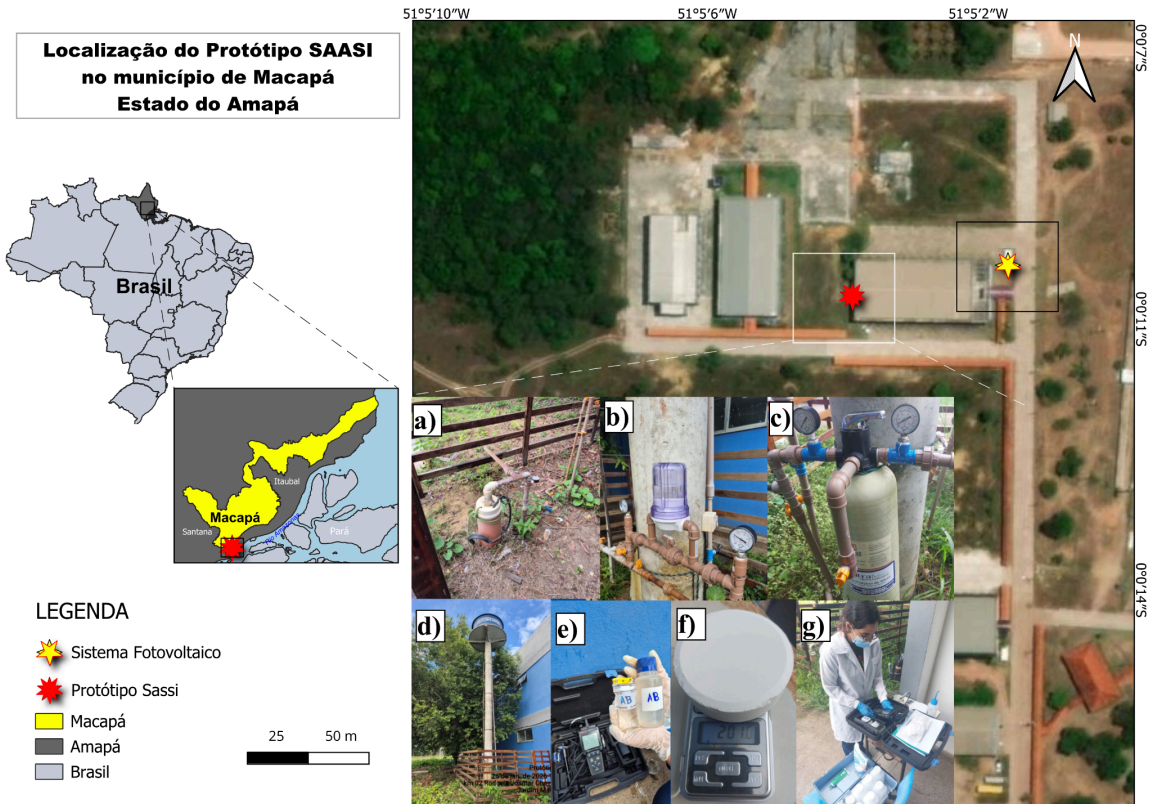
**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em um poço tubular, instalado nas dependências do Bloco de Engenharia Elétrica, no campus Marco Zero da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). O poço encontra-se em operação isolada da rede pública convencional de abastecimento, sendo utilizado experimentalmente para avaliar sua eficiência como SAAA, doravante

denominado de SAASI (Figura 2).

**Figura 2** - Localização da área de estudo, equipamentos e etapas de coleta no SAASI.



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

### 3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEO ISOLADO (SAASI)

De acordo com a Figura 2 o poço tubular de captação de água subterrânea está localizado em área de cerrado de terra firme (tipo latossolo amarelo), hidrogeoquimicamente perfurado a cada 2 m no total de 30 m de profundidade) (ABREU E CUNHA, 2021). A infraestrutura é composta por filtro com meio filtrante de zeólita, clorador por dissolução de pastilhas sólidas e sistema de bombeamento para captação de água com vazão variável. A bomba de captação possui alimentação elétrica híbrida, podendo operar tanto por meio da rede convencional de energia quanto por sistema fotovoltaico, garantindo maior flexibilidade operacional e segurança no abastecimento.

A opção operacional de acoplamento do sistema fotovoltaico de bombeamento de água de acoplamento direto, teve como objetivo garantir a segurança no abastecimento. O sistema proporciona maior autonomia energética, uma vez que há possibilidade de alimentação elétrica híbrida, por meio da rede convencional ou de sistema fotovoltaico,

reduzindo assim, a dependência exclusiva da concessionária de energia e assegurando continuidade operacional mesmo em situações de interrupção do fornecimento. Portanto, promove maior confiabilidade no abastecimento hídrico, especialmente em comunidades isoladas ou com instabilidade no fornecimento elétrico e reduz custos operacionais no médio e longo prazo, especialmente com o uso da energia solar (SENA *et al.*, 2021).

Ao longo do processo de tratamento da água bruta, foram instalados manômetros em trechos específicos para a quantificação da pressão, cuja finalidade foi quantificar a perda de carga por trecho ou dispositivo hidráulico relevante do sistema (localizadas/contínuas) (Figura 2 a, b e c). A quantificação das taxas de dissolução de cloro foi realizada usando gravimetria (massa por tempo - pré-determinado em  $\pm 5$  min). Deste modo, foram asseguradas as condições adequadas de operação integrada e simplificada.

A integração dos dados dos parâmetros de qualidade da água com os hidráulicos e taxa de dissolução do cloro serviram para avaliar a eficiência do clorador, isto é, como parte da avaliação da eficiência global de tratamento e conformidade legal (ANVISA, 2021).

### 3.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

As etapas de amostragem e componentes do SAASI são descritas da seguinte forma, de acordo com a Figura 2: a) Ponto de Captação (Bombeamento); b) pré-cloração e cloração; c) pré-filtro, filtro e pós filtro; d) Reservatório com 1500 L; e) Utensílios para coleta de amostras do monitoramento da qualidade de água; f) pesagem da pastilha de cloro sólida (seca antes e pós operação de monitoramento) em balança analítica e determinação da taxa de dissolução de cloro na água no clorador; g) Preparação e Coleta das amostras de água para análise da qualidade em laboratório. Os dados de qualidade da água bruta e tratada coletados em campo foram analisados nos Laboratórios de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA) e de Fenômenos de Transporte, Hidráulica e Saneamento Ambiental (LFTHSAM).

O monitoramento físico-químico e microbiológico da qualidade da água foi realizado mensalmente (24 meses consecutivos) em diferentes etapas do tratamento da água, desde a sua captação no manancial subterrâneo até cada uma das etapas operacionais (bruta, pré-cloração, pós-cloração, filtração, reservatório etc.) (Figura 2a, 1b, 1c E 1d). Assim, o delineamento experimental considerou tanto a eficiência quanto à conformidade legal em relação aos padrões de potabilidade estabelecidos em norma (PORTARIA N.º 888, de 4 de maio de 2021), além das etapas operacionais e o período sazonal (seco, transição e chuvoso-série histórica entre setembro de 2023 a agosto de 2025).

O monitoramento da qualidade da água foi conduzido para os seguintes indicadores de potabilidade (água bruta e tratada): turbidez, pH, cor,  $\text{NH}_4\text{-H}$ , sólidos em suspensão; cloreto; Fe; Mn; fluoreto; P;  $\text{NO}_3$ ; coliformes totais e *E. Coli* (Tabela 1). Os equipamentos utilizados foram os seguintes: turbidímetro; espectrofotômetro (íons em geral); pH-metro; estufas de incubação de DBO; seladora, câmara de luz ultravioleta e vidrarias em geral (APHA, 2003).

**Tabela 1** - Descrição dos parâmetros da qualidade da água utilizados no experimento, valores máximos permitidos, normas e referências legais

Parâmetro	Justificativa para Análise	VMP*	Referências Normativas
<b>pH</b>	Indica acidez ou alcalinidade da água; essencial para garantir a potabilidade e proteger a infraestrutura.	6.0 a 9.5	
<b>Cloro Total (<math>\text{Cl}_{\text{Total}}</math>)</b>	Necessário para desinfecção e controle microbiológico da água.	Máximo: $\leq 2,0$ mg/L $\geq 0,2$ mg/L	
<b>Cloro Livre (<math>\text{Cl}_{\text{Free}}</math>)</b>	Verifica eficiência da desinfecção e manutenção do residual sanitário	(mínimo) $\leq 2,0$ mg/L (máximo)	
<b>Ferro (Fe)</b>	Pode causar manchas e alterar o sabor da água; também afeta sistemas de tubulações	Máximo: 0,3 mg/L	
<b><i>E. coli</i></b>	Indica contaminação recente por fezes e risco de doenças de origem hídrica.	Ausente em 100 mL	
<b>Coliformes Totais</b>	Indica a presença de matéria orgânica e potenciais patógenos.	Ausente em 100 mL	Portaria GM/MS nº 888/2021
<b>Turbidez</b>	Avalia partículas suspensas na água, que podem abrigar microrganismos.	Máximo: 5 UNT	
<b>Cor aparente</b>	Indica a presença de materiais orgânicos e inorgânicos que afetam a estética e a qualidade da água.	Máximo: 15 UH	
<b>Salinidade (Cloreto)</b>	Relacionado à concentração de sais, afetando a potabilidade e a corrosividade da água	Máximo: 250 mg/L	
<b>Nitrato (<math>\text{NO}_3</math>)</b>	Avaliação de contaminação agrícola ou esgoto, com riscos à saúde, como a metemoglobinemia.	Máximo: 10 mg/L	
<b>Mangânes (Mn)</b>	Necessário avaliar pois em concentrações elevadas causa impactos operacionais, estéticos e sanitários.	Máximo: 0,1 mg/L	
<b>Amônia (<math>\text{NH}_3/\text{NH}_4^+</math>)</b>	Indica contaminação recente, interferência na cloração e nitrificação	Máximo: 1,2 mg/L	
<b>Fósforo (P)</b>	Indicar aporte antrópico e risco de eutrofização (fossas sépticas, por exemplo).	Máximo: 0,3 mg/L	
<b>Sólidos em Suspensão (SS)</b>	Avalia partículas suspensas e eficiência do pré-tratamento	Máximo: $\leq 20$ (Classe 1) / $\leq 100$ (Classe 2) mg/L	CONAMA 357/2005*

\* Valor Máximo Permitido

Fonte: elaborado pelos autores, 2026, com adaptação de Silva, A., 2025.

As amostras coletadas foram realizadas com uso de frascos de polipropileno, em duplicatas para cada categoria (um frasco destinado às análises físico-químicas e outro às análises microbiológicas), respectivamente. O tempo de espera para coleta das amostras era de  $\pm 5$  minutos, em média, com base na vazão medida e efetivada pela bomba, conforme apresentado na figura 3 a seguir.

**Figura 3** - Pontos Coletados no Protótipo SAASI.



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Os pontos específicos de coleta de amostras de águas do SAASI são descritos em cinco níveis: 1) H<sub>2</sub>O BRUTA (Água de captação do poço em sua condição natural); 2) H<sub>2</sub>O CAIXA D'ÁGUA (Água reservada após tratamento); 3) H<sub>2</sub>O FILTRADA NÃO CLORADA (Água tratada somente com auxílio de filtrador); 4) H<sub>2</sub>O FILTRADA E CLORADA (Água completamente tratada: filtro e clorador, (com dispositivo “by pass” para permitir somente a filtração sem passagem pelo clorador); e por fim, 5) H<sub>2</sub>O 45° CLORADA FILTRADA (Válvulas abertas nos ângulos de 45° na entrada para controle do clorador e do filtro) (Figura 3).

O processo de cloração utilizado foi o de dissolução de pastilha sólida de cloro. As pastilhas utilizadas no experimento são da empresa “Meu Filtro - Tratamento de Água”, compostas predominantemente por ácido tricloroisocianúrico (TCCA), com teor médio de cloro ativo entre 60 e 65%. Cada unidade possui massa nominal de  $\pm 200$  g, formato cilíndrico comprimido e dissolução lenta controlada (Figura 2f). O mecanismo de liberação ocorre por hidrólise gradual, liberando ácido hipocloroso (HOCl), responsável pela ação desinfetante. A taxa de dissolução é influenciada pela área superficial exposta, vazão do sistema e condições

hidráulico-operacionais (MEU FILTRO, 2026). Na tabela 2 são apresentadas as condições de uso da pastilha para os níveis de tratamento; 4) H<sub>2</sub>O FILTRADA E CLORADA e 5) H<sub>2</sub>O 45° CLORADA FILTRADA, correspondendo a 10 minutos de operação (5 minutos por categoria).

**Tabela 2 - Dissolução da pastilha de cloro**

<b>Operação</b>	<b>Tempo de Dissolução (s)</b>	<b>Quantidade de Pastilhas</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Massa Dissolvida (g)</b>	<b>Dissolução Acumulada (%)</b>	<b>Taxa Média de Dissolução (g/s)</b>
27/09/2024		0	0	0	0	100,00	0,0000
29/10/2024		3	594	504	90	15,09	0,1493
17/12/2024		3	488	474	14	20,18	0,0233
31/01/2025		3	450	333	117	43,92	0,1950
26/02/2025		2	291	125	166	78,95	0,2767
31/03/2025	600	2	65	0	65	100,00	0,1083
30/04/2025		1	200	172	28	71,03	0,0467
29/05/2025		1	157	136	21	77,10	0,0350
27/06/2025		1	129	102	27	82,82	0,0450
30/07/2025		1	100	52	48	91,24	0,0800
27/08/2025		1	48	0	48	100,00	0,0800

**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

### 3.4 MONITORAMENTO HIDRÁULICO

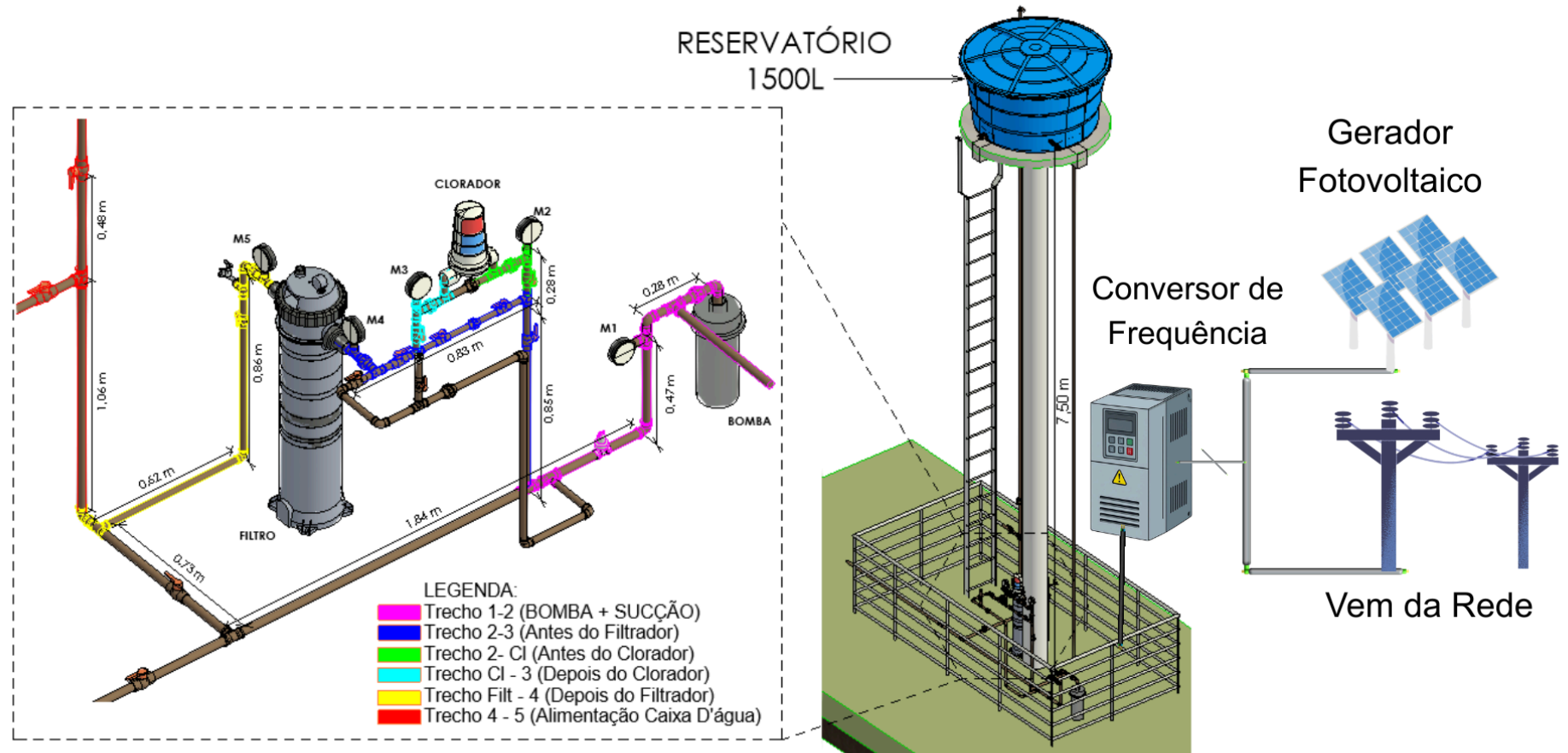
Na Figura 4 é mostrado, em detalhes, as diferentes etapas de tratamento da água do Protótipo SAASI. O processo inicia-se com a captação da água bruta por meio de bombeamento convencional ou acoplado ao sistema fotovoltaico, incluindo equipamentos hidráulicos destinados à medição das perdas de carga. Em seguida, a água é direcionada a um sistema de cloração em *by-pass*, que permite o controle do fluxo com ou sem aplicação de cloro, conforme as alternativas previstas no desenho experimental. O objetivo foi verificar se o filtro, na etapa subsequente, seria capaz de, isoladamente, garantir a eficiência microbiológica e físico-química da água em níveis compatíveis com os padrões de potabilidade estabelecidos pela ANVISA (2021). Os ensaios experimentais foram realizados

com controle do by-pass em duas condições de cloração: (a) com a válvula de controle de fluxo parcialmente fechada ( $45^\circ$ ) e (b) com a válvula de controle de fluxo completamente aberta ( $180^\circ$ ). O ajuste da válvula nessas posições funcionou como mecanismo de controle fino da taxa de dissolução da pastilha de cloro ( $W$ ), evitando tanto a dosagem excessiva quanto a insuficiente no processo de cloração.

Os parâmetros hidráulicos monitorados foram os seguintes: perdas de cargas contínuas e localizadas do dispositivo (pressão no manômetro -  $h_p$ ), vazão variável  $Q$  (em função do sistema de bombeamento convencional/fotovoltaico acoplado) (Figura 4).

A pressão manométrica foi obtida pelo manômetro na linha de tratamento (Figura 4 a-c), permitindo quantificar as perdas de carga ( $h_{pt}$ ) nas diferentes etapas operacionais. As tomadas de pressão foram realizadas nos pontos de sucção e recalque da bomba, com destaque para os trechos antes e depois do clorador e do filtro (Figura 4). Para uma verificação mais ampla da análise, foi criada tabelas para avaliar os comprimentos equivalentes e perdas de cargas totais, identificando suas respectivas descrições de detalhamento, disponíveis nos Apêndices (Apêndice B, Tabelas 2S E 3S).

Figura 4 - Esquema Simplificado desenvolvido (Protótipo SAASI)



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

A leitura direta das pressões manométricas foi em quilopascal (kPa) e bar, para cada nível de tratamento do sistema, de modo a permitir o registro das oscilações de pressão em diferentes condições de operação. Na tabela 3 são apresentados os trechos que compreendem as perdas de cargas localizadas do sistema desenvolvido.

**Tabela 3** - Parâmetros hidráulicos do protótipo saasi: trechos 1-5; descrição hidráulica dos trechos; perda de carga (hp); observações e referências.

<b>Dispositivo Hidráulico</b>	<b>Descrição/Função</b>	<b>Hazen-Williams</b>	<b>Observação/Referências</b>
<b>1-2</b>	<b>Trecho 1-2</b> (4 Joelho 90°, 1 Válvula Esfera Reduzida, 1 Tê de Passagem Direto, 3 Tê de Saída Bilateral, 1 União) - Diâmetro de 32mm, tubulação em PVC.	0,25	
<b>2-3</b>	<b>Trecho 2-3</b> (2 Registro de Ângulo Aberto, 1 Joelho de 90°, 1 Válvula de Retenção, 1 Tê de Passagem Direto, 3 Tê de Saída Bilateral, 1 União) - Diâmetro de 25mm, tubulação em PVC e (2 Registro de Ângulo Aberto e 1 União) - Diâmetro de 20mm, tubulação em PVC.	3,53	
<b>2-Cl</b>	<b>Trecho 2-CL</b> (1 Registro de Ângulo Aberto, 1 Tê de Saída Bilateral, 1 Tê de Saída de Lado, 2 União, 1 Válvula de Retenção) - Diâmetro de 25mm, tubulação em PVC.	0,46	ABNT NBR 5626:2020;
<b>CL-3</b>	<b>Trecho CL-3</b> (1 Registro de Ângulo Aberto, 1 Tê de Saída Bilateral, 1 Tê de Saída de Lado, 1 União, 1 Válvula de Retenção) - Diâmetro de 25mm, tubulação em PVC.	0,30	Netto (2018).
<b>Filt-4</b>	<b>Trecho Filt-4</b> (1 Registro de Ângulo Aberto, 1 Tê de Saída Bilateral, 1 Tê de Passagem Direto, 1 União, 2 Joelho 90°) - Diâmetro de 25mm, tubulação em PVC e (1 Tê de Saída Bilateral, 1 Válvula de Retenção e 1 Joelho 90°) - Diâmetro de 32mm, tubulação em PVC.	0,44	
<b>4-5</b>	<b>Trecho 4-5</b> (2 Registro de Ângulo Aberto, 1 Tê de Saída Bilateral, 2 Joelho 90°) - Diâmetro de 32mm, tubulação em PVC.	0,35	

**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

A vazão volumétrica (Q) foi obtida por gravimetria (volume por tempo) durante as etapas mensais de monitoramento, por intermédio de ensaio simplificado de balanço integral de massa (vasilhame graduado de 14 L e um cronômetro), posicionado na saída do ponto de

descarga do sistema hidráulico. O tempo necessário para o preenchimento completo do volume do balde era repetido para todos os procedimentos em réplicas. Quando o erro entre as médias era maior que 5%, a medida era novamente repetida, até um limite igual ou abaixo de 5% [ $E \leq 5\%$ ].

### 3.5 SAZONALIDADE E PERFILAMENTO PRÉVIO HIDROGEOQUÍMICO DO SOLO

Os dados secundários de precipitação mensais médios foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015) e de Lima *et al.*, (2025) para simples avaliação da precipitação. O objetivo foi auxiliar na interpretação da climatologia de precipitação em Macapá durante o período de estudo, e avaliar potenciais influências da precipitação em relação ao nível de água do lençol freático (perfil hidrogeoquímico) do poço e qualidade da água. As séries climatológicas médias mensais foram obtidas da estação da Fazendinha-AP (Lat -0.04, Lon -51.11) (série de 51 anos diários), útil para classificar os períodos seco, transição e chuvoso (LIMA *et al.*, 2025).

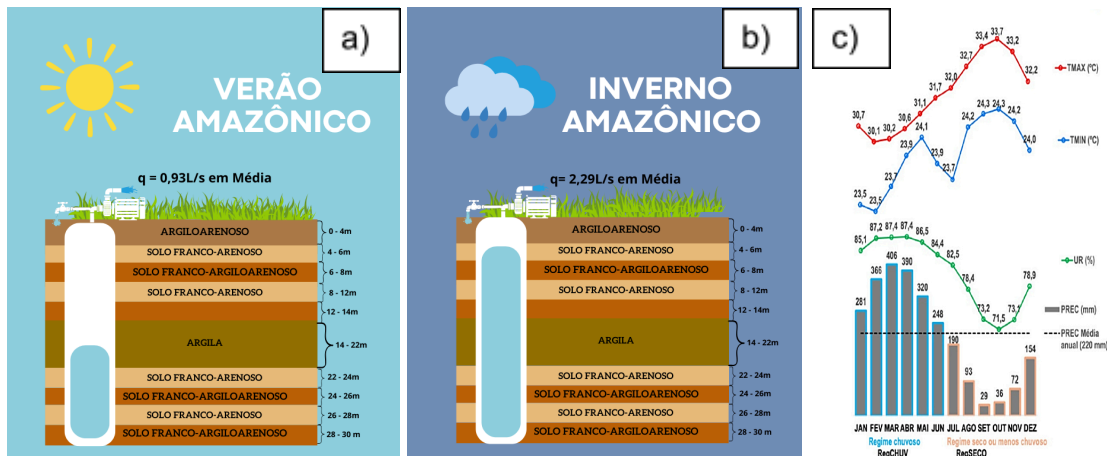
De acordo com Grott *et al.*, (2018), o estado do Amapá encontra-se na Província Hidrogeológica Amazonas, parcialmente coincidente com a bacia hidrográfica do rio homônimo, que ocupa área aproximada de 1.300.000 km<sup>2</sup>. O Aquífero Barreiras é considerado como o sistema que abastece a cidade de Macapá (ANA, 2015), no qual a população com ou sem acesso à rede convencional da concessionária, faz uso generalizado e geralmente sem um controle dos aquíferos do tipo livre. A profundidade dos poços livres varia entre 6 e 14 m de profundidade, ou semiconfinados, em profundidades de 30 a 70 m, com vazões médias de 2 a 5 m<sup>3</sup>/h, alcançando até 14 m<sup>3</sup>/h (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Tanto os parâmetros hidroclimáticos quanto hidráulicos foram utilizados como variáveis explicativas da influência de parâmetros da qualidade da água. O fator sazonalidade hidroclimática tende a influenciar o nível do lençol freático, a taxa de bombeamento (vazão Q) e a qualidade da água bruta ao longo do ano (GROTT *et al.*, 2018). Na Figura 5 é mostrado duas ilustrações características do poço tubular do SAASI. Primeiro, a variação do nível d'água do poço e sua influência sazonal na vazão média de captação (a e b). Em segundo, o ciclo anual (c) (médias climatológicas mensais de 1985 a 2022) da estação meteorológica de Macapá (LIMA *et al.*, 2025).

O clima em Macapá é do tipo equatorial (quente e úmido) com temperaturas elevadas durante todo ano, variando entre 26 e 38°C. O índice pluviométrico observado é aproximadamente 2.500 mm/ano, distribuído entre dois períodos críticos, o mais chuvoso ou

úmido e o menos chuvoso ou seco. O período seco (chuva trimestral abaixo de 200 mm) ocorre na primavera (setembro a novembro) e o mais chuvoso (chuva trimestral acima de 1.000 mm) ocorre no outono (março a maio). Entre ambos os períodos críticos há um período que pode ser considerado como de transição (LIMA *et al.*, 2025).

**Figura 5 - a e b)** Características hidrogeoquímicas do poço tubular com variação sazonal do nível d'água na captação de água do SAASI a cada 2 m; **c)** Sazonalidade de precipitação e temperaturas em Macapá



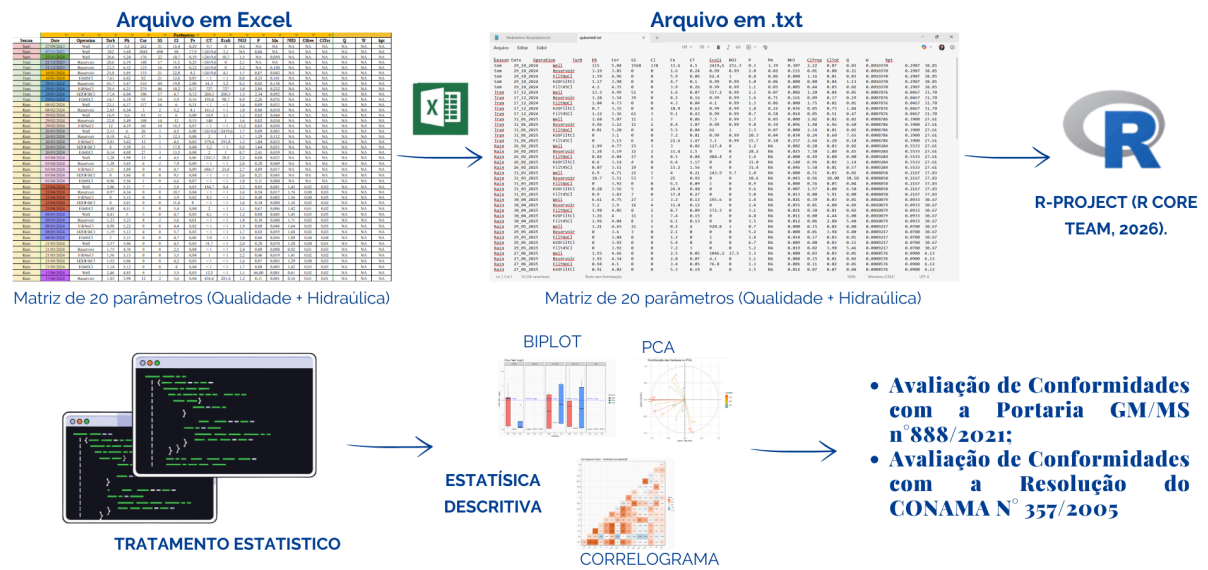
**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026, com adaptação de LIMA *et al.*, (2025).

O comportamento sazonal da precipitação é pronunciado, com os meses do regime chuvoso - RegCHUV (chuva mensal acima da média anual de 220 mm) entre janeiro e junho, enquanto o regime seco- RegSECO se manifesta entre julho a dezembro, com precipitação abaixo deste limite. Observa-se que a temperatura máxima (TMAX) apresenta um comportamento sazonal oposto ao da UR e PREC. Mas, no caso da TMIN, há uma breve singularidade em relação a TMAX, entre junho e julho (fase da transição).

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para testar as hipóteses elencadas na presente pesquisa, tanto os dados de qualidade da água quanto os hidráulicos, foram organizados em um dataframe do tipo “.txt”, cujas colunas foram inseridas os parâmetros e nas linhas os valores por sazonalidade (data de coleta, estação sazonal etc.). No arquivo de dados constam 20 parâmetros/fatores no total. Estes foram organizados da seguinte forma (arquivo “qabomb8.txt”): a) Fatores: "Season", "Date", "Operation"; b) Qualidade da Água: "Turb", "pH", "Cor", "SS", "Cl", "Fe", "CT", "Ecoli", "NO<sub>3</sub>", "P", "Mn", "NH3", "Cl<sub>free</sub>" e "Cl<sub>Tot</sub>"; c) Hidráulicos: "Q", e "h<sub>pt</sub>"; e d) Cinético: "W", representando uma taxa média relativa de dissolução do cloro no processo, conforme apresentado na figura 6 abaixo e nos Apêndices (Apêndice B, Tabela 1.A).

**Figura 6 - Fluxograma para as análises estatísticas.**



**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

De acordo com a figura 6, as análises foram iniciadas por etapas descritivas, seguidas das inferenciais multivariadas no ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2025). E para investigar as relações entre os fatores operacional e sazonais com as variáveis hidráulicas e de qualidade da água, foi elaborada uma matriz de correlação de Spearman (distribuições não paramétricas) com o objetivo de testar potenciais significâncias das correlações ( $p < 0,05$ ). Para avaliação dos efeitos de variação dos parâmetros da qualidade da água por trecho ou etapa de tratamento da água, além da sazonalidade, foram utilizadas avaliações de gráficos tipo box-plot para verificação visual das diferenças observadas na etapa experimental (CRAWLEY, 2007).

A técnica estatística multivariada PCA (Análise de Componentes Principais), que reduz a dimensionalidade de um conjunto de dados, transforma várias variáveis originais em menos componentes principais que concentram a maior parte da variância. É representada por “eixos” que resumem a informação mais relevante dos dados em poucas dimensões (normalmente duas). Deste modo, foi possível identificar padrões e agrupamentos em conjuntos complexos de variáveis. No presente caso, a qualidade da água, a cinética de dissolução do cloro e a influência hidráulica no protótipo. Enfim, a PCA serviu como suporte para analisar e interpretar os dados (níveis multidimensionais), demonstrando as principais correlações para cada uma das variáveis estudadas, não perceptíveis isoladamente na análise de correlação, (R CORE TEAM, 2025; CRAWLEY, 2007).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO (PORTARIA Nº 888/2021 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE E RESOLUÇÃO DO CONAMA Nº 357/2005)

Para cada parâmetro foi atribuída uma sigla de modo a facilitar a organização e compreensão da análise estatísticas descritiva e inferencial. Na Tabela 4 constam tanto os parâmetros que resultaram em significância ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 4** - Índice de conformidade dos parâmetros analisados em comparação com a legislação (%), antes e pós-tratamento no SAASI para  $h_{pt} = 30,68 \pm 2,00$  m.c.a e  $W = 0,208 \pm 0,02$  g/s

Parâmetros	Água Bruta (%)	Água Tratada	Valor Máximo Permitido
Turb (Seco)	0	91,9	5
Turb (Chuvoso)	76,92	100	5
pH (MTC) (Seco)	0	0	6 a 9,5
pH (MTC) (Chuvoso)	0	20	6 a 9,5
COR (Pt-Co) (Seco)	0	100	15
COR (Pt-Co) (Chuvoso)	50	100	15
NH <sub>3</sub> (Seco)	0	80	1,2
NH <sub>3</sub> (Chuvoso)	80	84,36	1,2
Coliformes Totais (Seco) (CT)(0/100ml)	0	60	0/100 ml
Coliformes Totais (Chuvoso) (CT)(0/100ml)	15,4	100	0/100 ml
<i>E.Coli</i> (0/100ml) (Seco)	0	80	0/100 ml
<i>E.Coli</i> (0/100ml) (Chuvoso)	46,15	100	0/100 ml

**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

De acordo com a Tabela 4, os índices de conformidade apresentaram-se de acordo com a norma vigente (ANVISA, 2021). Isto é, demonstram aumento significativo dos índices de conformidade após o tratamento em praticamente todos os parâmetros avaliados, evidenciando eficiência operacional do sistema. Enquanto a água bruta apresenta baixos índices de conformidade especialmente para parâmetros microbiológicos e físico-químicos, a água tratada apresenta percentuais significativamente mais elevados, frequentemente próximos ou iguais a 100%. Em relação ao parâmetro pH, o tratamento realizado pelo SAASI não apresentou eficiência significativa. Observou-se que, no período chuvoso, houve uma

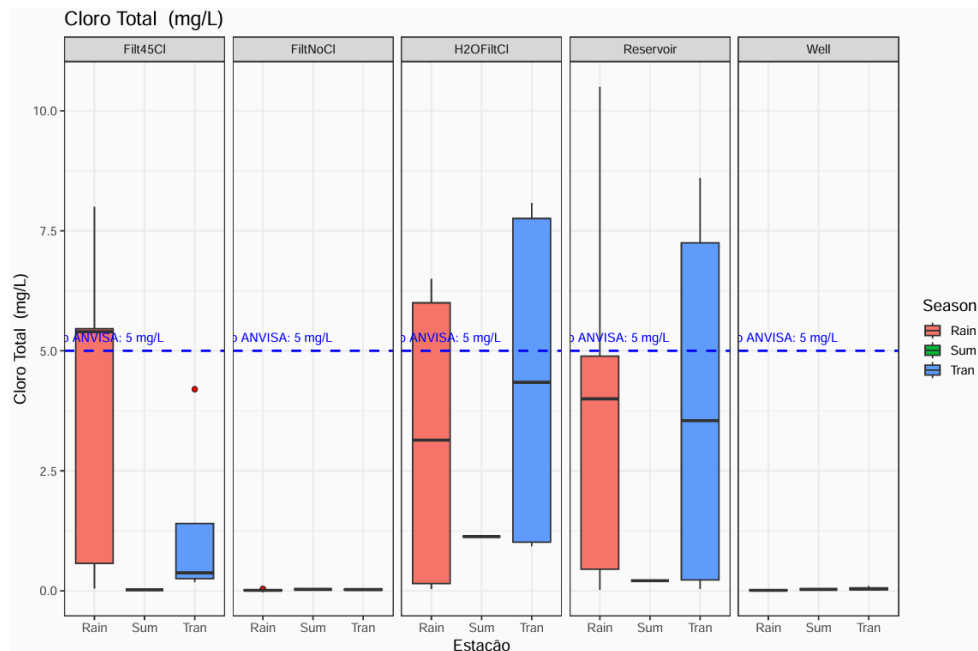
melhoria discreta, estimada em aproximadamente 20%, contudo, os valores permaneceram predominantemente fora dos limites estabelecidos pelos padrões. Ressalta-se que a não conformidade relacionada ao pH poderia ser tecnicamente corrigida por meio da simples adição de cal para ajuste da alcalinidade. Entretanto, essa intervenção não integrou o escopo da presente pesquisa.

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS, FÍSICOS E MICROBIOLÓGICOS

Os resultados experimentais foram comparados e os parâmetros correlacionados com base na conformidade legal (PORTARIA no 888/2021 do Ministério da Saúde e Resolução do CONAMA n° 357/2005). Os gráficos 1, 2, 3 e 4 resumem basicamente os resultados obtidos do tratamento (SAASI), considerando-se as etapas sazonais e os fatores ou fases de tratamento. A seguir, serão elencados somente os principais resultados, sendo todas as demais incluídas em documentos suplementares.

No Gráfico 1, observa-se que o limite máximo estabelecido pela ANVISA (2021) para o cloro total é de 5 mg/L, indicado por linha horizontal de referência, a fim de avaliar o intervalo de conformidade esperado para as amostras. Observa-se que os pontos Well (Poço) e FiltNoCl (Filtrada e não clorada) apresentam concentrações próximas de 0 mg/L, com mediana praticamente nula e intervalo interquartil muito reduzido, indicando ausência de cloração e baixa variabilidade. Esse resultado é esperado porque não houve adição de cloro nestes trechos (delineamento amostral).

No reservatório (Reservoir) as concentrações situam-se majoritariamente abaixo de 5,0 mg/L, mas somente no período chuvoso. Para Filt45Cl (Manobra de 45°), os valores apresentam maior dispersão, com mediana situada entre  $\approx 2$  e 3 mg/L e máximos de 5 mg/L, indicando maior intensidade de dosagem, mas maior variabilidade operacional. Já o H2OFiltCl (Filtrada e Clorada) apresenta as maiores concentrações e maior amplitude de variação, com máximos visualmente próximos ou superiores a 7,5 mg/L, ultrapassando o limite normativo de 5 mg/L. A mediana nesse ponto ficou entre  $\approx 2,5$  e 3 mg/L, porém, com presença de valores extremos acima do padrão permitido. Sazonalidade (Rain, Sum, Tran), observa-se maior dispersão no período chuvoso (Rain), com amplitudes maiores nos sistemas clorados, o que pode indicar ajuste operacional da dosagem em função do aumento da carga orgânica. Além do parâmetro cloro total, encontra-se nos Apêndices (Apêndice C, Gráficos 4.A ao 16.A) os demais parâmetros analisados conforme a tabela 1.

**Gráfico 1** - Variação sazonal de parâmetros da qualidade da água subterrânea por categoria e fase do tratamento

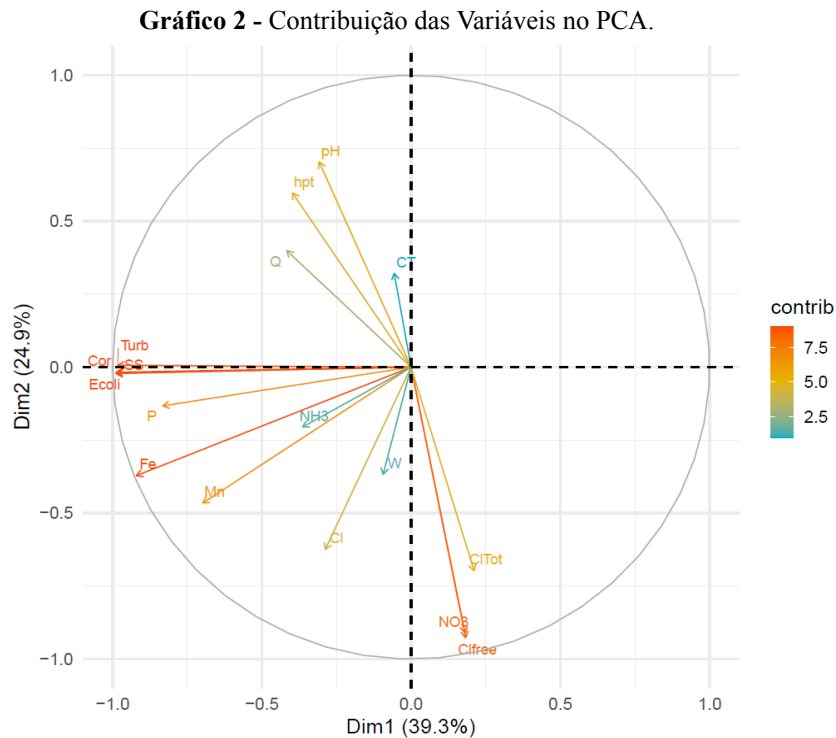
**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

A Análise de Componentes Principais (PCA) indicada pelo gráfico 2 demonstrou que as duas primeiras dimensões explicam 64,2% da variabilidade total das variáveis, sendo 39,3% atribuídos à Dimensão 1 (Dim1) e 24,9% à Dimensão 2 (Dim2). As setas projetadas nos eixos indicam a importância dos parâmetros da QA e Hidráulicos e sua correlação com os eixos (Dim1 e Dim2).

A Dimensão 1 (39,3%) evidencia um gradiente relacionado com matéria particulada e a contaminação microbiológica, posicionadas no lado negativo do eixo, e variáveis associadas à oxidação e desinfecção, no lado positivo. No quadrante negativo de Dim1 destacam-se cor, turbidez, sólidos suspensos (SS), *E. coli*, ferro (Fe), manganês (Mn) e fósforo (P), cujos vetores apresentam forte projeção horizontal à esquerda, indicando elevada contribuição nessa dimensão. Por outro lado, no lado positivo de Dim1 encontram-se nitrato ( $\text{NO}_3$ ), cloro livre ( $\text{Cl}_{\text{free}}$ ) e cloro total ( $\text{Cl}_{\text{Tot}}$ ), com vetores longos e próximos à borda do círculo, evidenciando forte representatividade estatística.

A Dimensão 2 (24,9%) apresenta comportamento distinto. No quadrante superior, destacam-se pH e  $h_{\text{pt}}$ , com vetores orientados para valores positivos do eixo vertical, sugerindo influência nas condições físico-químicas da água. Já no quadrante inferior observam-se  $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}_{\text{free}}$  e  $\text{Cl}_{\text{Tot}}$ , com forte projeção negativa em Dim2, indicando que esses parâmetros também influenciam em um segundo gradiente químico associado a transformações oxidativas. O comprimento dos vetores, particularmente para  $\text{Cl}_{\text{free}}$ ,  $\text{NO}_3$ , Fe,

Mn, cor e turbidez, indica que essas variáveis possuem maior contribuição relativa (cores mais intensas no gradiente), sendo determinantes na estrutura multivariada do conjunto de dados.

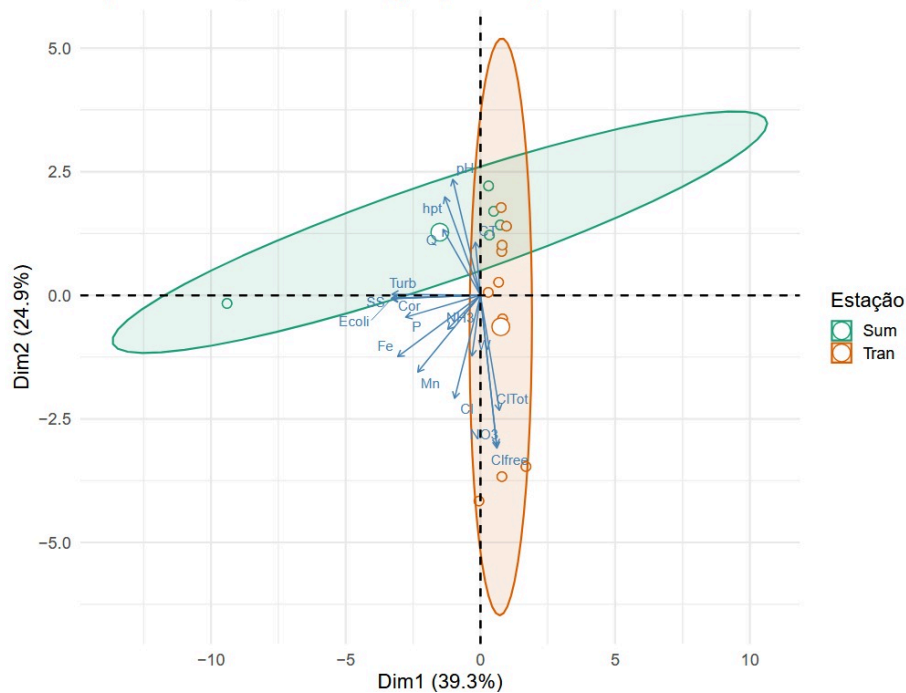


O gráfico 3 apresenta um gráfico biplot da PCA que combina informações de duas ou mais variáveis em um único gráfico, nesse caso, parâmetros de sazonalidade: Inverno e Verão. Devido a ausência de dados de período chuvoso para esta análise específica, não foi possível observar o comportamento da elipse deste período.

No gráfico é possível observar que a estação Sum (verão) apresenta maior dispersão ao longo da Dim1, inclusive com um ponto extremo no lado negativo, onde estão posicionadas turbidez, sólidos suspensos (SS), *E. coli*, ferro (Fe), manganês (Mn) e fósforo (P), enquanto no lado positivo destacam-se nitrato ( $\text{NO}_3$ ), cloro livre ( $\text{Cl}_{\text{free}}$ ) e cloro total ( $\text{Cl}_{\text{Tot}}$ ). Já a Dimensão 2 (24,9%) evidencia um gradiente vertical associado principalmente a variáveis físico-químicas e microbiológicas, como pH e CT, e hidráulicas, como  $h_{\text{pt}}$  e Q, posicionadas na parte superior do gráfico, enquanto  $\text{Cl}_{\text{free}}$ ,  $\text{Cl}_{\text{Tot}}$  e  $\text{NO}_3$  apresentam projeção mais negativa nesse eixo. O período sazonal Tran (transição) apresenta maior dispersão ao longo da Dim2, com amplitude aproximada entre  $-5$  e  $+5$ , indicando maior variabilidade química nesse período. Diferentemente do verão (Sum), sua distribuição horizontal é mais concentrada em torno de  $\text{Dim1} = 0$ . No Apêndice ([Apêndice C, Gráficos 3.A](#)) apresenta-se a

PCA de qualidade de água em função da operação.

**Gráfico 3** - Análise da Qualidade de Água por Estação por gráfico Biplot.

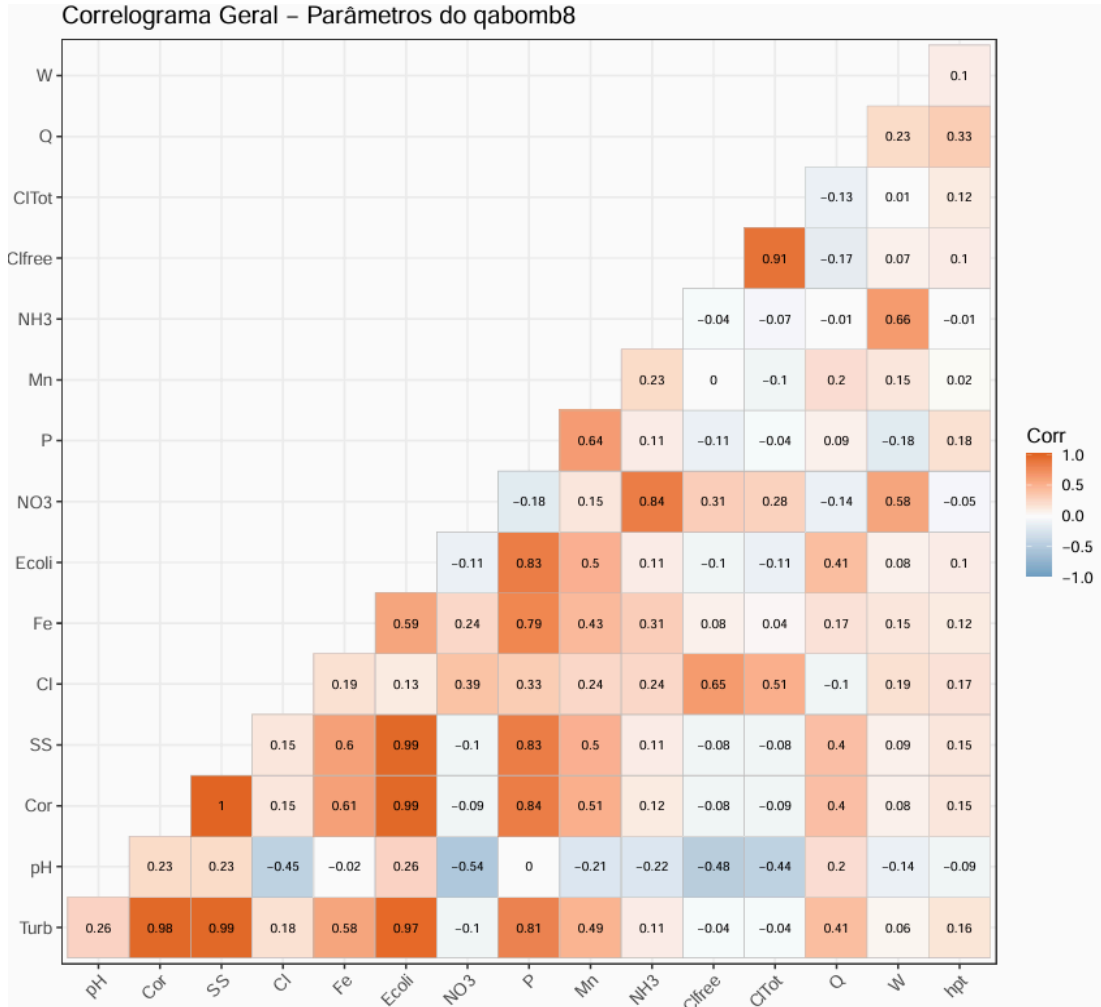


**Fonte:** elaborado pelos autores, 2026.

O gráfico 4 apresenta um correlograma geral dos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água com uma estrutura fortemente organizada, indicando diferentes níveis de associação entre as variáveis. O correlograma distingue a relação nas cores vermelho e azul, na qual a vermelha indica correlação positiva e a azul indica correlação negativa entre os parâmetros da qualidade da água.

O gráfico apresenta correlações positivas muito elevadas entre turbidez, cor e sólidos suspensos (SS), com  $r = 0,98$  (turbidez x Cor) e  $r = 0,99$  (Turbidez x SS; cor x Ecoli). Esses valores próximos de 1 indicam correlação quase ideal. Também se destaca a forte correlação entre cloro livre ( $Cl_{free}$ ) e cloro total ( $Cl_{Tot}$ ) ( $r = 0,91$ ), o que era esperado, visto que o cloro total engloba a fração livre. No que se refere às correlações negativas, destaca-se a relação inversa entre pH e  $NO_3$  ( $r = -0,54$ ), bem como entre pH e Cloreto (Cl)  $r = -0,45$ . As variáveis hidráulicas, como Q (vazão) e taxa relativa de dissolução do cloro (W), apresentam correlações predominantemente medianas ( $r \leq 0,30$ ), sugerindo que o regime hidráulico exerce média influência direta, mas significativa, sobre a maioria dos parâmetros químicos e microbiológicos avaliados. Observa-se que este correlograma representa uma síntese de 8 correlogramas nos apêndices (Apêndice C, Gráficos 1.A-2.A e 17.A ao 24.A)

**Gráfico 4 -** Correlograma de todos os parâmetros físico-químicos, microbiológicos, hidráulicos e cinéticos analisados.



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

## 5. DISCUSSÃO

As condições operacionais e a eficiência do protótipo variaram de acordo com o tipo de parâmetro, sendo influenciado tanto pelas etapas de tratamento quanto pelo período sazonal (qualidade da água bruta, vazão e perda de carga na linha de tratamento). Esse fato sugere boa resposta às hipóteses a este tipo de delineamento experimental (TSUTIYA, 2006; GIAMPÁ & GONÇALES, 2013; VON SPERLING, VERBYLA, OLIVEIRA, 2020; SNIS, 2020; GROTT *et al.*, 2018; SILVA, A. *et al.*, 2025). Os apêndices apresentam os apêndices B e C com as demais análises estatísticas geradas, tanto para os correlogramas, PCA quanto boxplot.

O Gráfico das Variáveis (Loadings, Gráfico 3) indicou quais parâmetros mais influenciam cada componente principal, destacando-se o fator sazonal. Os parâmetros com maiores *loadings* nos primeiros componentes são aqueles que mais explicam a variabilidade da qualidade da água, corroborando esta abordagem em análises multivariadas similares aplicadas a dados ambientais (VON SPERLING; VERBYLA; OLIVEIRA, 2020). A Turbidez e *E. coli* apresentam altos coeficientes no PC1, entendendo-se que são os principais responsáveis pela diferenciação entre as amostras, especialmente sob influência de processos de aporte particulado e contaminação microbiológica associados à dinâmica hidrológica sazonal (TUNDISI, 2011; GROTT *et al.*, 2018).

É notório compreender que os parâmetros hidráulicos, tais como os estudados na presente pesquisa, são extremamente raros na literatura. Assim, os parâmetros Q, W,  $h_{pt}$  neste contexto são inovadores. Além disso, sugerem que a influência hidráulico-operacional é significativa no SAASI, indicando que variações na vazão, na potência hidráulica e na altura piezométrica total podem alterar o regime de captação, a mistura e a até a turbulência que ressuspende partículas no poço tubular “raso”, corroborando com estudos clássicos sobre comportamento desses e dinâmica de bombeamento (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013; TSUTIYA, 2006; SENA DOS SANTOS *et al.*, 2021). Esses resultados reforçam que a qualidade da água não depende apenas das suas características físico-químicas intrínsecas, mas também das condições operacionais do sistema de captação e tratamento.

O Gráfico Biplot PCA (Gráfico 2) demonstrou predominância da Dimensão 1 (39,3%) sugerindo que o principal fator estruturante da variabilidade da qualidade da água é o contraste entre condições associadas à carga particulada/microbiológica e aquelas relacionadas à desinfecção química. A oposição vetorial entre cloro (livre e total) e *E. coli* reforça a coerência estatística do modelo, indicando efeito esperado do processo de

desinfecção (TSUTIYA, 2006; GIAMPÁ & GONÇALES, 2013; VON SPERLING, VERBYLA, OLIVEIRA, 2020; SNIS, 2020; GROTT et. al, 2018). Mas a maior dispersão das variáveis do período seco, ao longo da Dim1, pode estar associada ao aumento do carreamento superficial, maior aporte de material particulado ou variações operacionais no sistema durante esse período (rebaixamento do nível d'água no poço) (TUNDISI, 2011; CARLSON *et al.*, 2011; HAQUE; ONODERA; SHIMIZU, 2013; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). O ponto extremo observado sugere episódio pontual de elevada carga sólida ou microbiológica deste período. A Dimensão 2 (24,9%) indicou influência complementar de variáveis físico-químicas, e possivelmente hidráulicas, sugerindo que, além da carga particulada e do controle por cloração, processos químicos e condições operacionais também modulam a qualidade da água (como na filtração) (RICHTER, 2009; TSUTIYA, 2006; VON SPERLING; VERBYLA; OLIVEIRA, 2020). Mas a sobreposição parcial entre os períodos sazonais indica que, embora exista influência sazonal, o sistema mantém um padrão estrutural relativamente estável, com variações associadas aos mais ao tratamento do que às mudanças da qualidade da água (GROTT *et al.*, 2018; ABREU; CUNHA, 2021).

O correlograma geral (Gráfico 4) confirma a existência de pelo menos dois grupos principais de variáveis: (i) aquelas associadas à carga particulada e características físico-químicas, fortemente interrelacionadas, e (ii) aquelas relacionadas a processos de oxidação e desinfecção, que apresentam correlação positiva entre si e relação inversa com indicadores microbiológicos (VON SPERLING; VERBYLA; OLIVEIRA, 2020; RICHTER, 2009). Essa estrutura reforça a presença de um gradiente dominante de qualidade da água, no qual processos químicos e particulados desempenham papel central na dinâmica observada. Assim como observado por Borba *et al.*, (2021), os parâmetros microbiológicos foram aqueles que mais se correlacionaram com os demais parâmetros de qualidade da água.

## 5.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE TRATAMENTO E SAZONALIDADE

Com base nos dados apresentados na Tabela 4, durante o período chuvoso verificou-se maior comprometimento da qualidade da água bruta, especialmente nos parâmetros turbidez (76,92% de não conformidade), cor (50%), amônia (80%) e E. coli (46,15%). Esse comportamento é coerente com o aumento do escoamento superficial, da infiltração de matéria orgânica no solo (diluição) e do possível aporte de contaminação difusa ao aquífero, fenômenos intensificados em períodos de maior precipitação (TUNDISI, 2011; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013; CARLSON et al., 2011; HAQUE; ONODERA; SHIMIZU, 2013).

No período seco, embora alguns parâmetros apresentem redução do impacto

microbiológico na água bruta (0% de não conformidade para *E. coli* e coliformes totais), observa-se a persistência de não conformidades físico-químicas. Esse resultado indica que a vulnerabilidade da água subterrânea não se restringe à sazonalidade climática, estando também associada às condições estruturais dos poços e à proteção sanitária adotada (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Essa análise converge com pesquisas anteriores. Grott et al. (2018) concluíram que a qualidade da água subterrânea utilizada para consumo humano em diferentes bairros de Macapá é sensível às variações espaço-sazonais. Contudo, até onde se tem conhecimento, são escassos estudos na Amazônia que avaliem a variação da qualidade da água considerando diferentes etapas de tratamento, especialmente sob a influência de parâmetros hidráulicos operacionais.

Esta é, provavelmente, a principal contribuição desta pesquisa, na qual o nível de conhecimento sobre os poços amazonas ou tubulares na Amazônia é diminuto. E, até este momento, nenhum estudo similar está disponível com demonstrações efetivas sobre como tais variações sazonais, e por etapas de tratamento, são tão relevantes no processo de tratamento. Isso sugere atenção redobrada quanto à vulnerabilidade e riscos operacionais representados pelos SAAs no processo de universalização dos serviços sanitários frente aos imensos problemas de saúde pública nas zonas rurais ou em zonas urbanas desassistidas de água de abastecimento.

## 6. CONCLUSÃO

As hipóteses do presente estudo foram parcialmente confirmadas. A implementação de um Sistema Alternativo de Abastecimento Isolado (SAASI), baseado em captação subterrânea, filtração, desinfecção por simples cloração e bombeamento fotovoltaico com vazão variável, apresenta desempenho técnico-operacional capaz de assegurar padrões mínimos de potabilidade e operação hidráulica estável. Isto representa potencial como tecnologia social de baixo custo, fácil operação e passível de ajustes, flexibilidade e replicabilidade em regiões sem rede de distribuição ou áreas rurais remotas. Entretanto, a confirmação parcial foi em função da alta variabilidade da qualidade da água bruta ao longo dos períodos sazonais (24 meses), além da influência sazonal dos parâmetros hidráulicos e cinéticos envolvidos no processo de tratamento da água neste tipo de sistema alternativo.

As correlações significativas ocorreram principalmente entre turbidez, coliformes totais e sólidos suspensos, indicando associação entre aumento de matéria particulada e concentração microbiológica. Relações entre parâmetros hidráulicos e físico-químicos mostram que variações operacionais, como maior vazão ou perda de carga, impactam a eficiência do tratamento e na qualidade final.

A PCA identificou os parâmetros que mais diferenciam as amostras, destacando a influência da sazonalidade e das etapas de tratamento, com distinção evidente entre períodos sazonais e etapas de cloração. Os maiores *loadings* decorreram dos parâmetros turbidez, coliformes, cloro dissolvido e  $h_{pt}$ .

A análise geral da qualidade da água mostrou maior risco de não conformidade no período chuvoso devido à turvação da água e carga microbiológica elevadas. A cloração foi eficiente, mas exigiu ajustes quando a carga orgânica aumentou. Assim, o monitoramento contínuo dos pontos críticos é essencial para atender à Portaria da ANVISA e garantir segurança sanitária.

Os parâmetros hidráulicos e cinéticos ( $Q$ ,  $h_{pt}$  e  $W$ ) foram determinantes para a qualidade da água.  $Q$  influenciou o processo de diluição;  $h_{pt}$  indicou restrições operacionais (filtro e clorador); e  $W$  exigiu ajustes sazonais.

Diante dos resultados obtidos, evidencia-se que o aprimoramento do sistema requer a consolidação de estratégias estruturadas de monitoramento contínuo, com enfoque preventivo e integrado. A variabilidade sazonal observada nos parâmetros de qualidade da água e nos indicadores hidráulicos demonstra que avaliações pontuais são insuficientes para garantir estabilidade operacional e conformidade sanitária ao longo do tempo. Assim, recomenda-se a

ampliação da frequência de acompanhamento de turbidez, pH, nitrogênio amoniacal, coliformes totais, *E. coli*, vazão e perda de carga, de modo a permitir a identificação precoce de tendências de não conformidade e a adoção de medidas corretivas em tempo oportuno.

Adicionalmente, a incorporação progressiva de tecnologias de monitoramento automatizado configura-se como medida estratégica para aumentar a confiabilidade dos dados e reduzir a dependência exclusiva de medições manuais. A utilização de sensores para vazão, pressão, turbidez e cloro residual possibilita a geração de séries históricas consistentes, favorecendo análises estatísticas mais robustas e a construção de modelos voltados à prevenção de falhas operacionais.

Sob a perspectiva futura da sustentabilidade do sistema, destaca-se a importância da avaliação técnico-econômica das intervenções propostas, considerando custos de implantação, manutenção e operação, bem como os benefícios indiretos relacionados à mitigação de riscos sanitários. Tal análise pode subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à qualificação de sistemas simplificados de abastecimento em áreas vulneráveis.

Por fim, ressalta-se a relevância do fortalecimento da participação comunitária como elemento estruturante da gestão da água. A capacitação de agentes locais para acompanhamento básico de parâmetros operacionais e sanitários contribui para a ampliação da governança hídrica, reforçando a sustentabilidade e a resiliência do sistema frente às variações sazonais. Nesse sentido, a integração entre monitoramento contínuo, automação tecnológica, avaliação econômica e engajamento comunitário constitui diretrizes estratégicas para a promoção da segurança hídrica e da conformidade sanitária em sistemas descentralizados de abastecimento.

## REFERÊNCIAS

ABREU, L. G. B.; CUNHA, A. C. Variação dos Parâmetros Qualitativos de água subterrânea e teste de tempo de escoamento em poço tubular. *In: X CONGRESSO AMAPAENSE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 2021, Macapá, Resumos (DPq/PROPESPg/UNIFAP).

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000)**. Volume V - Cidade Piloto: Macapá - AP. Tomo I - Texto Brasília: ANA, SIP, 2015.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. BRASIL, 2023. Disponível em: <https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/smww.2882>.

ANVISA. Portaria MS Ministério da Saúde N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021, **que altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017**, dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

APOITIA, L. F. M. **Caracterização preliminar do quimismo das águas subterrâneas em Cuiabá - MT**. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ARAÚJO, E. P.; ABREU, C. H. M.; CUNHA, H. F. A.; *et al.* Vulnerability of biological resources to potential oil spills in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil. **Environ Sci Pollut Res** **30**, 35430–35449 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24592-3>.

ARAÚJO, E. P.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. C.; *et al.* Indicadores de abastecimento de água e doenças de transmissão hídrica em municípios da Amazônia Oriental. **Engenharia Sanitária E Ambiental**, v. 26, p. 1059-1068, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200179>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5626:2020 - Sistemas prediais de água fria - Projeto, execução, operação e manutenção**. Rio de Janeiro, 1998.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BENASSI, F.; DE FALCO, A. Residential Segregation and Accessibility: Exploring Inequalities in Urban Resources Access Among Social Groups. **Land**, v.14, 2025. <https://doi.org/10.3390/land14020429>.

BORBA, W. F. *et al.* Análise da Qualidade da Água de Poços de Monitoramento em Área de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos no Sul do Brasil. **Rev. Geociênc.** Nordeste, Caicó, v.7, n.2, (Jul-Dez) p.306-316, 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução n° 357 de 17 de março de 2005**. Publicada no DOU n° 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=450](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 396 de 03 de abril de 2009.**

CARLSON, M. A.; LOHSE, K. A.; MCINTOSH, J. C.; MCLAIN, J. E. T. (2011). Impacts of urbanization on groundwater quality and recharge in a semi-arid alluvial basin. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 1-2, p. 196-211. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.020>.

CRAWLEY, M. J. (2007). **The R Book**. Classical Tests. In *The R Book*. Crawley, M. J. (Ed.). London, Imperial College, London at Silwood Park, UK, pp 344-387.

CUNHA, H. F. A.; LIMA, D. C. I.; BRITO, P. N. F.; CUNHA, A. C.; SILVEIRA JUNIOR, A. M.; BRITO, D. C. Qualidade físico-química e microbiológica de água mineral e padrões da legislação. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 3, p. 155-165, 2012. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>.

DE SOUSA, B. R. A., ARAÚJO, E. P., SOUSA, T. S. *et al.* Pre-dimensioning and technical, economic and environmental feasibility analysis of sub-river outfalls in Macapá and Santana cities, Amapá State, Brazil. **J Coast Conserv** 28, 50, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11852-024-01049-y>.

DIAS, D. S.; MENEZES, R. A. O.; SOUZA, M. J. C.; BARBOSA, F. H. F.; ANDRADE, R. F.; SOUTO, R. N. P. (2013) Fatores de riscos que contribuem para as parasitoses intestinais em crianças de 0 a 5 anos em Macapá/Amapá/Brasil. **Ciência Equatorial**, v. 3, n. 1, p. 57-68, 2013.

FERRAZ, R. R. N.; BARNABÉ, A. S.; PORCY, C.; D'EÇA JÚNIOR, A.; FEITOSA, T.; FIGUEIREDO, P. M. (2014) Parasitoses intestinais e baixos índices de Gini em Macapá (AP) e Timon (MA)- Brasil. **Caderno Saúde Coletiva**, p. 173-176. <http://dx.doi.org/10.1590/1414-462X201400020010>.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FUNASA. Manual Prático de Análise de Água, 4ª ed., Distrito Federal - DF, 2013.

GIAMPÁ, C. E. Q; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**, 2ª ed. 2013.

GROTT, S. L.; FURTADO, R. N.; FACANHA, E. B.; CUNHA, H. F. A.; CUNHA, A. C. Variação espaço-sazonal de parâmetros da qualidade da água subterrânea usada em consumo humano em Macapá-AP, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, p. 645-654, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018162018>.

HAQUE, S. J.; ONODERA, S.; SHIMIZU, Y. (2013) An overview of the effects of urbanization on the quantity and quality of groundwater in South Asian megacities. **Limnology**, v. 14, n. 2, p. 135-145. <https://doi.org/10.1007/s10201-012-0392-6>.

HELLER, L.; PADUA, V. L. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte, UFMG. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

KATZ, B. G.; EBERTS, S. M.; KAUFFMAN, L. J. (2011) Using Cl/Br ratios and others indicators to assess potential impacts on groundwater quality from septic systems: a review

and examples from principal aquifers in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3-4, p.151-156. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.017>.

KERRY J. HOWE, et al. (2012). **Principles of Water Treatment**. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, EUA. Printed in USA. 654 p.

LENZI, E. et al. (2009). **Química da água: ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro. LTC Editora. 604 p.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIMA, D. C., REIS, A. DOS S., MOREIRA, P. H. O., DE SOUZA, E. B., & CUNHA, A. C. da. (2025). Mudanças ambientais e climáticas na área de concentração urbana de Macapá e Santana/AP na Amazônia Oriental/Brasil. **Revista Brasileira De Geografia Física**, 18(05), 4151–4171.

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.05.p4151-4171>.

MEU FILTRO. **Pastilhas de Cloro**. 2026. Disponível em <https://www.lojameufiltro.com.br/pastilhadecloro30unidades>. Acesso em 13 de fevereiro de 2026.

MIHELICIC, J. R., ZIMMERMAN, J. B., Engenharia Ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto. **LTC Editora**, Rio de Janeiro. 617 p, 2012.

NEIRA, M.; MOLINERO, C.; MARSHALL, S. *et al.* Urban segregation on multilayered transport networks: a random walk approach. **Sci Rep**, v.14, 2024.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-58932-9>.

NERI, S.H.A. (2004) **A utilização das ferramentas de geoprocessamento para identificação de comunidades expostas a hepatite A nas áreas de ressacas dos municípios de Macapá e Santana/AP**. Dissertação (mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PENA, B. P. L., CUNHA, A. C. DA, & CUNHA, H. F. A. (2025). FATORES DE SEGREGAÇÃO URBANA NA AMAZÔNIA ORIENTAL: MOBILIDADE, AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E EDUCAÇÃO. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, 14(10), e2865. <https://doi.org/10.23900/2359-1552v14n10-9-2025>.

PORCY, C.; FERRO, T. A. F.; MONTEIRO, S. G.; MENEZES, R. A. O.; BARBOSA, F. H. F.; MONTEIRO NETO, V. (2013) Epidemiologia dandoença diarreica associada às *Escherichia Coli* diarreiogênicas em crianças residentes em uma área alagada de Macapá- Amapá- Brasil. **Ciência Equatorial**, v. 3, n. 1, p. 57-68.

[https://www.semanticscholar.org/paper/EPIDEMIOLOGIA-DA-DOEN%C3%87A-DIARREICA-ASSOCIADA-%C3%80S-coli-Porcy-Ferro/1d626d6639e24d80d9e8fabbcede72ed0ca2ba215#citing-papers?utm\\_source=direct\\_link](https://www.semanticscholar.org/paper/EPIDEMIOLOGIA-DA-DOEN%C3%87A-DIARREICA-ASSOCIADA-%C3%80S-coli-Porcy-Ferro/1d626d6639e24d80d9e8fabbcede72ed0ca2ba215#citing-papers?utm_source=direct_link).

R Development Core Team (2025) R: a language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Ed. Blucher, 2009.

SENA DOS SANTOS, W.; FERREIRA TORRES, P.; UBAIARA BRITO, A.; ARRIFANO MANITO, A. R.; FIGUEIREDO PINTO FILHO, G.; LEÃO MONTEIRO, W.; NEGRÃO MACÊDO, W. **A novel method to determine the optimal operating point for centrifugal pumps applied in photovoltaic pumping systems.** *Solar Energy*, v. 221, p. 46-59, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.005>

SILVA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; OLIVEIRA, A. C.; ARAÚJO, E. P.; BENTES, J. L.; CUNHA, A. C. Monitoring and Treatment of Water in an Intensive Treatment Unit Dialysis Service in the Municipality of Macapá/Brazil. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 13, p. 1-28, 2025. Doi: [10.4236/gep.2025.137001](https://doi.org/10.4236/gep.2025.137001).

SILVA, D. D.; MIGLIORINI, R. B.; SILVA, E. C.; LIMA, Z. M.; MOURA, I. B. (2014) Falta de saneamento básico e as águas subterrâneas em aquífero freático: região do Bairro Pedra Noventa, Cuiabá (MT). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n.1, p. 43-52. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014000100005>.

SNIS. Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico - SNIS. **Saneamento Básico e Eleições: o que você precisa saber para desenvolver o seu estado?** Amapá. Trata Brasil, 2020.

SOUZA, A. T.; FAUTINO, S. M. M.; RODRIGUES, A. S. N. (2011). Determinação da anemia por deficiência de ferro em crianças de 03 a 04 anos associada a enteroparasitoses- Macapá-Amapá. **Ciência Equatorial**, v. 1, n. 1.

TEDPLAN. **Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB)**. Org. Cunha *et al.* (TEDPLAN, 2023). Disponível em: [www.saneamento.unifap.br/municipios](http://www.saneamento.unifap.br/municipios).

TSUTIYA, M. T. 2006. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 643p. 4ª. Edição.

TUNDISI, J. G. (2011) **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VIEGAS, C. J. T.; ARAUJO, E. P.; SOUSA, T. S.; CUNHA, A. C. Variação geoespacial de indicadores de saneamento básico e de saúde dos ex-territórios federais na Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, p. 1038-1059, 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1038-1059>.

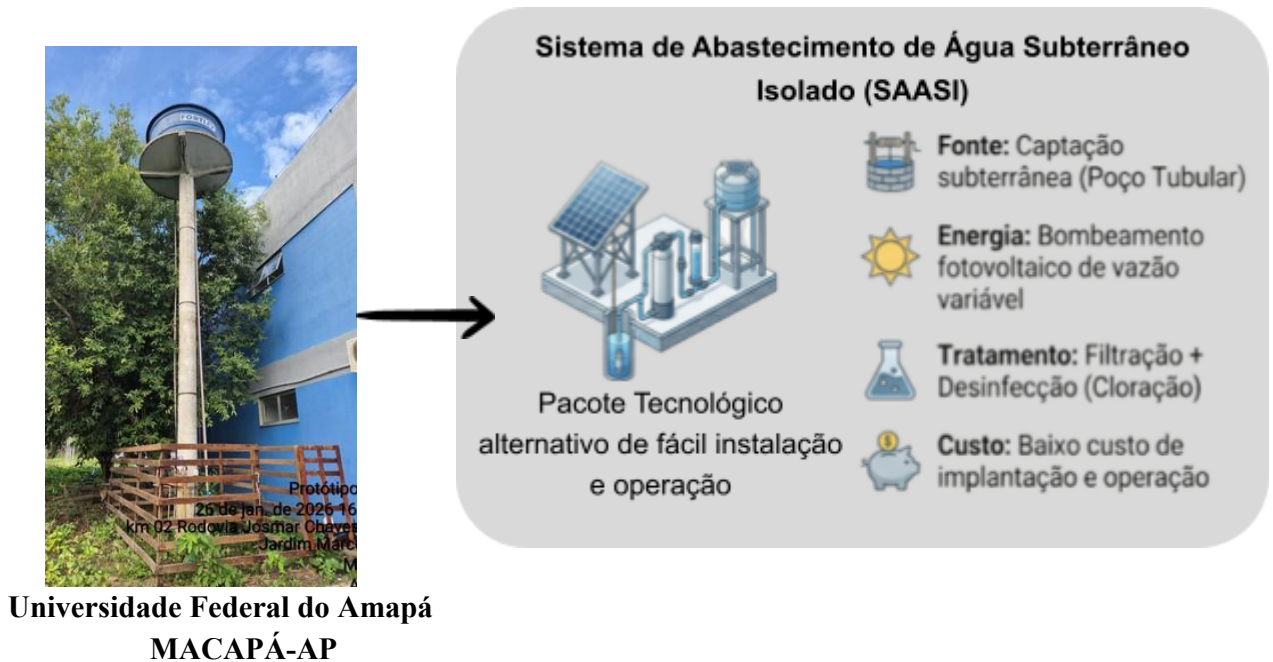
VON SPERLING, M, VERBYLA, M. E. e OLIVEIRA, S. M. A. C. (2020). Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners. **IWA Publishing**. Alliance House 12 Caxton Street. London SW1H 0QS, UK. <https://doi.org/10.2166/9781780409320>.

ZHANG, Q., H., R. M., DeCicco, L. A. *et al.* Advancing an adaptable and practical framework to address water quality challenges in a changing world. **Nat Rev Earth Environ** 7, 1–3 (2026). <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00753-z>.

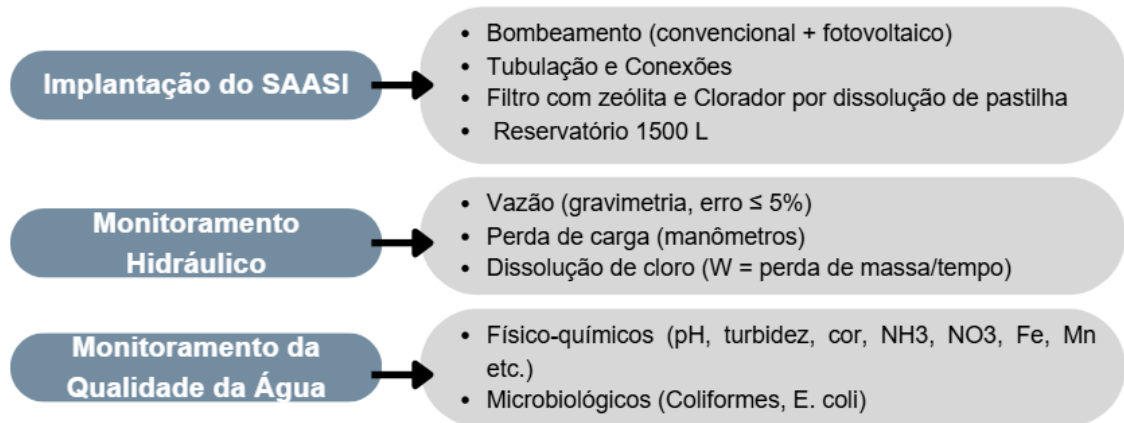
## APÊNDICES

### APÊNDICES A- MODELO CONCEITUAL DA PESQUISA

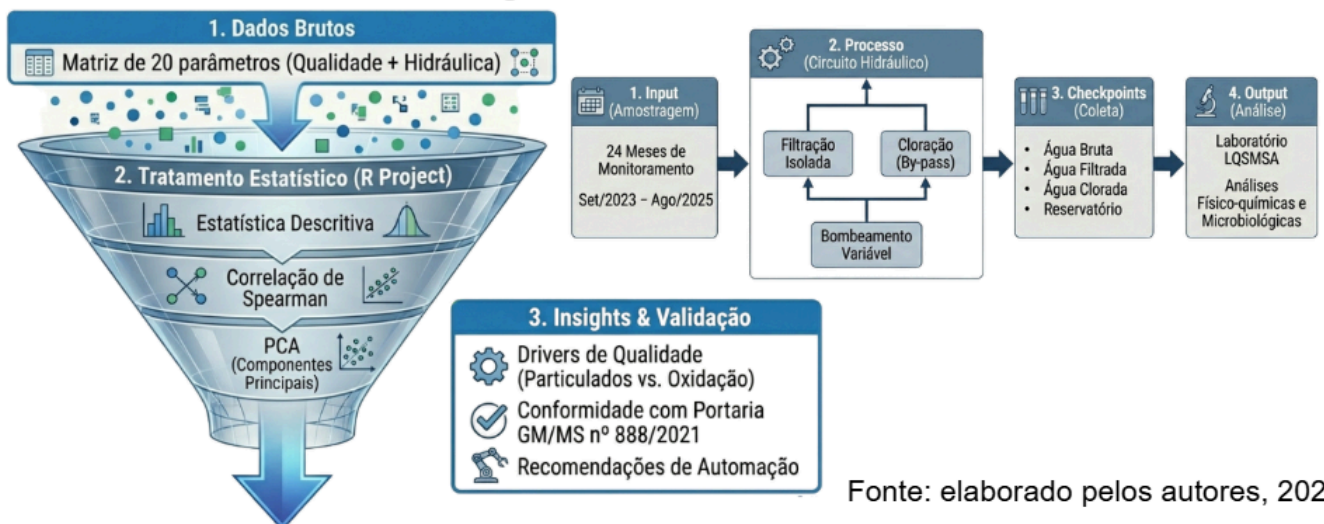
Figura 1.A - Modelo conceitual da pesquisa e fluxograma metodológico



### Fluxograma Metodológico



### Fluxograma da Análise dos Resultados



APÊNDICE B- TABELAS COM OS DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS HIPÓTESES

Tabela 1.A - Dataframe “qabomb8.txt” utilizado para as Análises Estatística da Pesquisa.

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Sum	27/09/2023	Well	37,9	5,5	262	31	15,4	0,29	9,7	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Sum	07/11/2023	Well	262	5,68	3845	498	50	17,9	>2419,6	3,1	NA	0,06	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Sum	23/11/2024	Well	26,6	5,24	176	22	10,7	0,19	>2419,6	10,7	1,5	NA	0,050	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	21/12/2023	Reservoir	28,6	6,39	148	17	11,5	0,25	>2419,6	0	2,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	21/12/2023	Reservoir	22,2	6,32	123	16	19,9	0,22	>2419,6	0	2,2	NA	0,100	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	16/01/2024	Reservoir	25,8	5,05	133	21	22,8	0,2	>2419,6	4,1	1,7	0,07	0,042	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	16/01/2024	Filt45Cl	7,61	6,02	82	21	12,6	0,07	< 1	< 1	0,8	4,23	0,101	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	29/01/2024	Reservoir	65,7	5,67	516	60	19,8	2,08	61,3	5,2	0,3	0,02	0,138	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	29/01/2024	FiltNoCl	29,5	6,21	275	46	10,2	0,37	727	727	1,0	2,85	0,232	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	29/01/2024	H2OFiltCl	17,4	6,04	106	17	4,7	0,12	260,3	260,3	1,3	2,34	0,092	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tran	29/01/2024	Filt45Cl	14,1	6,18	93	14	5,9	0,16	195,6	98,7	0,9	2,26	0,076	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	08/02/2024	Well	23,1	6,17	117	16	6	0,31	< 1	< 1	1,6	0,09	0,033	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	08/02/2024	Reservoir	2,65	6,54	3	2	5,2	0,1	161,3	< 1	1,8	0,06	0,010	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	29/02/2024	Well	16,9	5,6	81	11	6	0,08	10,9	3,1	1,2	0,02	0,044	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	29/02/2024	Reservoir	22,8	5,49	108	14	12	0,15	140	1	1,6	0,02	0,034	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	29/02/2024	FiltNoCl	12	4,19	60	10	15,3	0,07	< 1	< 1	15,2	0,03	0,036	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	26/03/2024	Well	2,13	6	26	3	4,5	0,08	>2419,6	>2419,6	1,7	0,09	0,003	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	26/03/2024	Reservoir	0,18	6,2	37	5	12,3	0,08	2	1	1,7	1,29	0,112	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	26/03/2024	FiltNoCl	2,01	5,62	13	1	4,5	0,03	579,4	191,8	1,3	1,84	0,033	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	26/03/2024	H2OFiltCl	0	5,58	11	1	17,8	0,04	5,2	< 1	0,8	1,64	0,031	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	26/03/2024	Filt45Cl	0,14	4,08	27	3	13,5	0,08	2	1	0,7	2,41	0,039	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	03/04/2024	Well	3,28	5,98	13	4	4,5	0,06	1203,3	28,8	2,5	0,08	0,023	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	03/04/2024	Reservoir	1,28	5,65	6	2	7,9	0,09	< 1	< 1	2,0	0,28	0,049	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	03/04/2024	FiltNoCl	1,11	5,88	0	0	4,7	0,09	686,7	21,8	2,7	4,89	0,017	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	03/04/2024	H2OFiltCl	0	5,66	0	0	9,1	0,04	< 1	< 1	2,6	0,21	0,043	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	03/04/2024	Filt45Cl	0,96	5,56	1	0	6,6	0,07	< 1	< 1	1,8	5,11	0,004	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rain	23/04/2024	Well	2,06	5,21	7	1	2,8	0,03	184,7	8,4	2,2	0,05	0,001	1,43	0,02	0,02	NA	NA	NA
Rain	23/04/2024	Reservoir	0,97	4,34	0	0	10,7	0,04	< 1	< 1	1,6	0,54	0,017	1,76	0,00	0,03	NA	NA	NA
Rain	23/04/2024	FiltNoCl	0	5,33	0	0	3,9	0,02	8,5	< 1	2,2	0,48	0,002	1,56	0,00	0,05	NA	NA	NA
Rain	23/04/2024	H2OFiltCl	0	5,01	0	0	11,4	0	< 1	< 1	1,6	0,34	0,000	1,16	0,02	0,02	NA	NA	NA
Rain	23/04/2024	Filt45Cl	0,48	4,51	3	0	5,4	0,04	2	< 1	1,1	0,67	0,006	1,42	0,01	0,02	NA	NA	NA
Rain	08/05/2024	Well	4,41	5	3	0	4,7	0,03	4,1	< 1	1,2	0,00	0,045	1,45	0,03	0,05	NA	NA	NA
Rain	08/05/2024	Reservoir	1,23	5,23	8	2	3,6	0,01	< 1	< 1	1,8	0,10	0,040	1,71	0,02	0,03	NA	NA	NA
Rain	08/05/2024	FiltNoCl	0,98	5,22	0	0	4,4	0,02	< 1	< 1	1,9	0,08	0,046	1,64	0,05	0,05	NA	NA	NA
Rain	08/05/2024	H2OFiltCl	1,19	5,13	4	0	5,7	0,03	< 1	< 1	1,7	0,02	0,055	1,60	0,02	0,03	NA	NA	NA
Rain	08/05/2024	Filt45Cl	3	5,11	0	0	4,7	0,06	3,0	< 1	1,8	0,06	0,056	1,80	0,04	0,04	NA	NA	NA
Rain	21/05/2024	Well	2,57	5,06	0	0	4,5	0,03	31,7	< 1	2,0	0,28	0,070	1,20	0,00	0,01	NA	NA	NA
Rain	21/05/2024	Reservoir	1,75	4,76	0	0	2,5	0,04	< 1	< 1	2,4	0,08	0,008	0,92	0,01	0,03	NA	NA	NA
Rain	21/05/2024	FiltNoCl	1,56	5,13	0	0	3,5	0,04	1	< 1	2,2	0,46	0,019	1,41	0,02	0,02	NA	NA	NA
Rain	21/05/2024	H2OFiltCl	1,52	5,06	0	0	4,2	0,03	< 1	< 1	1,6	0,07	0,003	1,29	0,00	0,03	NA	NA	NA
Rain	21/05/2024	Filt45Cl	1,14	5,12	0	0	4	0,04	< 1	< 1	1,7	0,08	0,003	1,42	0,03	0,03	NA	NA	NA
Rain	17/06/2024	Well	2,46	4,85	6	1	3,5	0,03	12,5	< 1	1,1	66,0	0,001	0,61	0,02	0,02	NA	NA	NA
Rain	17/06/2024	Reservoir	1,85	3,98	12	2	3,6	0,04	436,6	201,4	1,2	0,11	0,001	0,16	0,01	0,01	NA	NA	NA
Rain	17/06/2024	FiltNoCl	2,58	4,9	13	2	2,4	0,01	29,5	2	2,0	0,25	0,003	0,76	0,02	0,02	NA	NA	NA
Rain	17/06/2024	H2OFiltCl	0,61	4,94	11	1	3,2	0,04	30,5	17,3	1,1	0,09	0,004	0,77	0,03	0,04	NA	NA	NA

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	17/06/2024	Filt45Cl	1,04	4,79	25	4	2,8	0,04	>2419,6	62,7	1,9	0,08	0,012	0,79	0,01	0,02	NA	NA	NA
Rain	27/06/2024	Well	1,93	4,78	0	0	3,4	0,05	30,7	3,1	1,8	0,04	0,002	0,00	0,01	0,03	NA	NA	NA
Rain	27/06/2024	Reservoir	1,69	4,34	0	0	2,5	0,03	251,3	251,3	2,1	0,20	0,001	0,42	0,01	0,02	NA	NA	NA
Rain	27/06/2024	FiltNoCl	2,12	4,93	0	0	3,2	0,05	105,8	43,9	1,6	0,05	0,011	0,96	0,02	0,03	NA	NA	NA
Rain	27/06/2024	H2OFiltCl	0,82	5	0	0	2,3	0,04	77,1	6,3	1,4	0,05	0,009	0,79	0,02	0,03	NA	NA	NA
Rain	27/06/2024	Filt45Cl	1,9	4,94	0	0	3,4	0,04	74,6	33,6	1,3	0,07	0,000	0,80	0,01	0,03	NA	NA	NA
Tran	11/07/2024	Well	5,92	4,79	3	5	2,3	0,24	109,8	2	1,0	0,02	0,000	0,66	0,02	0,02	NA	NA	NA
Tran	11/07/2024	Reservoir	3,45	4,36	0	0	3,8	0,34	920,8	25,1	1,2	0,10	0,000	0,04	0,02	0,02	NA	NA	NA
Tran	11/07/2024	FiltNoCl	0,9	4,88	0	0	2,7	0,09	191,8	2	0,7	0,05	0,000	0,66	0,02	0,04	NA	NA	NA
Tran	11/07/2024	H2OFiltCl	1,34	4,97	0	0	3,4	0	290,9	11	1,0	0,04	0,000	0,60	0,03	0,04	NA	NA	NA
Tran	11/07/2024	Filt45Cl	11,9	4,89	41	8	1,9	0,08	>2419,6	59,3	1,9	0,02	0,000	0,78	0,03	0,04	NA	NA	NA
Tran	26/07/2024	Well	5,07	5,03	0	0	3,7	0,04	NA	NA	1,1	0,18	0,000	0,58	0,00	0,02	NA	NA	NA
Tran	26/07/2024	Reservoir	5,66	5,7	0	0	2,2	0,02	NA	NA	1,0	0,09	0,000	0,55	0,01	0,01	NA	NA	NA
Tran	26/07/2024	FiltNoCl	4,14	4,93	0	1	2,7	0,02	NA	NA	0,9	0,05	0,000	0,75	0,02	0,02	NA	NA	NA
Tran	26/07/2024	H2OFiltCl	3,52	4,97	0	0	3,6	0,01	NA	NA	0,9	0,04	0,000	0,68	0,06	0,03	NA	NA	NA
Tran	26/07/2024	Filt45Cl	6,4	4,96	0	1	3,7	0	NA	NA	1,1	0,09	0,000	0,70	0,02	0,02	NA	NA	NA
Tran	13/08/2024	Well	4,89	4,99	1	1	1,9	0,17	13,4	1	1,2	0,06	0,034	1,04	0,01	0,02	NA	NA	NA
Tran	13/08/2024	Reservoir	3,37	4,32	0	0	2,6	0,02	38,4	59,4	1,4	0,21	0,029	0,00	0,01	0,03	NA	NA	NA
Tran	13/08/2024	FiltNoCl	3,5	5,21	0	0	2,6	0,09	>2419,6	16	1,0	0,07	0,014	1,22	0,01	0,01	NA	NA	NA
Tran	13/08/2024	H2OFiltCl	3,8	5,05	0	0	2,5	0,11	131,4	3,1	0,8	0,06	0,020	1,15	0,03	0,02	NA	NA	NA
Tran	13/08/2024	Filt45Cl	3,73	5,12	0	0	2,2	0,07	235,9	1	1,0	0,04	0,107	1,31	0,02	0,02	NA	NA	NA
Sum	27/09/2024	Well	6,25	5,98	285	53	7,8	2,3	>2419,6	59,4	0,8	0,73	0,171	1,43	0,02	0,02	NA	NA	NA
Sum	27/09/2024	Reservoir	5,92	5,65	7	0	2,1	0,1	251,3	251,3	1,7	0,12	0,092	1,16	0,01	0,02	NA	NA	NA
Sum	27/09/2024	FiltNoCl	6,20	5,88	0	0	4,3	0,1	105,8	43,9	0,9	0,07	0,007	1,76	0,00	0,03	NA	NA	NA

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Sum	27/09/2024	H2OFiltCl	6,40	5,66	0	0	3,6	0,1	61,3	5,2	0,9	0,06	0,010	1,56	0,00	0,05	NA	NA	NA
Sum	27/09/2024	Filt45Cl	6,14	5,56	0	0	3,1	0,2	184,7	8,4	1,1	0,05	0,056	1,42	0,02	0,02	NA	NA	NA
Sum	29/10/2024	Well	115	5,04	1568	138	13,6	4,5	>2419,6	251,3	0,3	1,39	0,307	2,22	0,07	0,03	0,00 1697 0	0,2 987	38,85
Sum	29/10/2024	Reservoir	3,19	3,85	0	0	1,6	0,24	< 1	< 1	2,0	0,02	0,155	0,01	0,00	0,21	0,00 1697 0	0,2 987	38,85
Sum	29/10/2024	FiltNoCl	1,59	4,96	0	0	5,9	0,06	62,4	1	0,8	0,06	0,000	1,16	0,01	0,03	0,00 1697 0	0,2 987	38,85
Sum	29/10/2024	H2OFiltCl	1,17	3,90	0	0	4,7	0,1	< 1	< 1	1,0	0,06	0,000	0,00	0,04	1,13	0,00 1697 0	0,2 987	38,85
Sum	29/10/2024	Filt45Cl	4,2	4,35	0	0	3,9	0,26	< 1	< 1	1,1	0,05	0,005	0,44	0,05	0,02	0,00 1697 0	0,2 987	38,85
Tran	17/12/2024	Well	13,3	4,99	51	4	1,6	0,07	517,2	< 1	1,3	0,07	0,002	1,20	0,04	0,05	0,00 0787 6	0,0 467	31,70
Tran	17/12/2024	Reservoir	1,28	3,54	39	0	8,2	0,16	< 1	< 1	1,6	0,71	0,161	0,09	0,17	0,29	0,00 0787 6	0,0 467	31,70

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Tran	17/12/2024	FiltNoCl	1,04	4,73	0	0	4,3	0,04	4,1	< 1	1,3	0,06	0,000	1,75	0,02	0,01	0,00 0787 6	0,0 467	31,70
Tran	17/12/2024	H2OFiltCl	0,7	3,35	0	0	18,9	0,62	< 1	< 1	1,8	0,22	0,036	0,05	0,75	1,04	0,00 0787 6	0,0 467	31,70
Tran	17/12/2024	Filt45Cl	1,12	3,36	61	3	9,1	0,43	< 1	< 1	0,7	0,58	0,014	0,05	0,51	0,47	0,00 0787 6	0,0 467	31,70
Tran	31/01/2025	Well	1,68	5,07	11	1	7	0,06	7,5	< 1	1,7	0,05	0,000	2,02	0,02	0,02	0,00 0878 6	0,3 900	27,61
Tran	31/01/2025	Reservoir	4,96	3,22	11	2	8,4	1,07	< 1	< 1	9,8	0,39	0,096	1,48	6,96	8,60	0,00 0878 6	0,3 900	27,61
Tran	31/01/2025	FiltNoCl	0,01	5,28	0	0	5,5	0,04	62	1	1,3	0,07	0,000	2,14	0,01	0,02	0,00 0878 6	0,3 900	27,61
Tran	31/01/2025	H2OFiltCl	0	3,1	0	0	7,2	0,81	< 1	< 1	10,3	0,04	0,034	0,24	8,60	7,65	0,00 0878 6	0,3 900	27,61
Tran	31/01/2025	Filt45Cl	0	3,15	6	0	22,6	1,47	3,1	< 1	15,7	0,10	0,257	2,64	6,28	0,18	0,00 0878 6	0,3 900	27,61

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	26/02/2025	Well	2,99	4,77	23	3	3	0,02	127,4	0	1,2	NA	0,002	0,28	0,03	0,02	0,00 0928 4	0,5 533	27,61
Rain	26/02/2025	Reservoir	1,24	3,19	12	2	11,4	1,5	0	0	28,2	NA	0,025	2,50	1,80	0,45	0,00 0928 4	0,5 533	27,61
Rain	26/02/2025	FiltNoCl	0,82	4,04	27	4	8,5	0,04	488,4	4	1,4	NA	0,000	0,49	0,00	0,00	0,00 0928 4	0,5 533	27,61
Rain	26/02/2025	H2OFiltCl	0,6	3,14	4	0	6,4	1,17	0	0	31,0	NA	0,140	2,32	0,02	3,14	0,00 0928 4	0,5 533	27,61
Rain	26/02/2025	Filt45Cl	0,07	3,51	19	0	13,2	1,56	0	0	31,4	NA	0,046	1,86	0,01	0,57	0,00 0928 4	0,5 533	27,61
Rain	31/03/2025	Well	6,9	4,71	22	1	4	0,21	143,9	9,7	1,0	NA	0,000	0,51	0,03	0,02	0,00 0885 8	0,2 167	37,83
Rain	31/03/2025	Reservoir	18,7	3,51	53	7	25	0,92	0	0	10,6	NA	0,043	0,96	10,00	10,50	0,00 0885 8	0,2 167	37,83
Rain	31/03/2025	FiltNoCl	0	3,92	0	0	6,5	0,09	1	0	0,9	NA	0,000	0,56	0,05	0,04	0,00 0885 8	0,2 167	37,83

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	31/03/2025	H2OFiltCl	0,28	3,56	5	0	24,9	0,48	0	0	9,6	NA	0,007	1,57	8,00	6,50	0,00 0885 8	0,2 167	37,83
Rain	31/03/2025	Filt45Cl	0,9	3,83	7	0	17,4	0,27	0	0	5,0	NA	0,013	0,00	5,91	8,00	0,00 0885 8	0,2 167	37,83
Rain	30/04/2025	Well	6,61	4,75	27	3	3,2	0,13	195,6	0	1,4	NA	0,021	0,39	0,03	0,01	0,00 1007 9	0,0 933	30,67
Rain	30/04/2025	Reservoir	5,2	3,9	16	4	11,4	0,12	0	0	2,4	NA	0,055	0,01	4,00	4,89	0,00 1007 9	0,0 933	30,67
Rain	30/04/2025	FiltNoCl	1,98	4,05	8	2	8,7	0,09	172,3	0	3,1	NA	0,021	0,30	0,01	0,02	0,00 1007 9	0,0 933	30,67
Rain	30/04/2025	H2OFiltCl	3,26	4	11	1	7,4	0,15	0	0	4,8	NA	0,011	0,00	4,44	6,00	0,00 1007 9	0,0 933	30,67
Rain	30/04/2025	Filt45Cl	1,96	4,04	8	1	6,1	0,13	0	0	3,5	NA	0,012	0,06	2,80	5,40	0,00 1007 9	0,0 933	30,67
Rain	29/05/2025	Well	1,21	4,65	21	1	0,2	4	920,8	1	0,7	NA	0,000	0,15	0,02	0,00	0,00 0921 7	0,0 700	30,67

Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	29/05/2025	Reservoir	0	3,6	3	0	2,1	0	0	0	5,2	NA	0,000	0,01	3,98	4,00	0,00 0921 7	0,0 700	30,67
Rain	29/05/2025	FiltNoCl	0	3,84	0	0	1,2	0	1	0	1,4	NA	0,014	0,17	0,03	0,01	0,00 0921 7	0,0 700	30,67
Rain	29/05/2025	H2OFiltCl	0	3,92	0	0	5,4	0	0	0	6,7	NA	0,009	0,00	0,03	0,15	0,00 0921 7	0,0 700	30,67
Rain	29/05/2025	Filt45Cl	0	3,92	0	0	7,2	3	0	0	5,2	NA	0,019	0,02	3,90	5,46	0,00 0921 7	0,0 700	30,67
Rain	27/06/2025	Well	1,93	4,66	0	0	2,5	0,05	1046,2	27,5	1,3	NA	0,000	0,03	0,03	0,01	0,00 0857 6	0,0 900	6,13
Rain	27/06/2025	Reservoir	1,92	4,34	0	0	2,8	0,07	4,1	0	1,1	NA	0,004	0,15	0,01	0,02	0,00 0857 6	0,0 900	6,13
Rain	27/06/2025	FiltNoCl	0,94	4,1	0	0	3,4	0,05	76,8	0	1,3	NA	0,001	0,11	0,02	0,01	0,00 0857 6	0,0 900	6,13
Rain	27/06/2025	H2OFiltCl	0,91	4,02	0	0	5,3	0,19	0	0	1,5	NA	0,012	0,07	0,07	0,04	0,00 0857 6	0,0 900	6,13

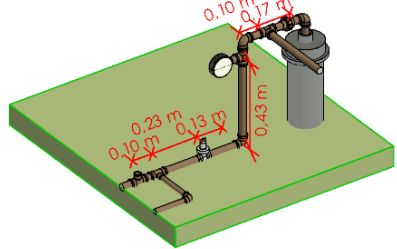
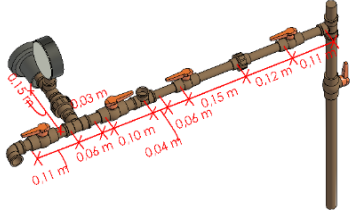
Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Rain	27/06/2025	Filt45Cl	0	4,53	0	0	4,5	0,49	71,2	0	1,3	NA	0,252	0,09	0,00	0,05	0,00 0857 6	0,0 900	6,13
Tran	30/07/2025	Well	6,19	4,84	0	0	7,8	0,49	65	1	1,7	NA	0	0,5	0,14	0,1	0,00 0917 1	0,1 600	30,67
Tran	30/07/2025	Reservoir	1,09	4,01	0	1	8,3	0,19	0	0	8,7	NA	0	0	5,79	6,8	0,00 0917 1	0,1 600	30,67
Tran	30/07/2025	FiltNoCl	1,34	4,55	0	0	3,2	0,12	28,8	0	1,7	NA	0	0	0,06	0,04	0,00 0917 1	0,1 600	30,67
Tran	30/07/2025	H2OFiltCl	1,59	3,81	0	0	15,3	0,26	0	0	8,7	NA	0	0	6,56	8,08	0,00 0917 1	0,1 600	30,67
Tran	30/07/2025	Filt45Cl	0,53	4,03	0	0	10,7	0,15	0	0	4,3	NA	0	0	3,78	4,2	0,00 0917 1	0,1 600	30,67
Tran	27/08/2025	Well	2,9	4,4	22	3	2,7	0,58	5,2	0	1,5	NA	0,012	0,21	0,08	0,03	0,00 0900 0	0,1 600	41,92
Tran	27/08/2025	Reservoir	4,42	3,4	26	3	9,1	0,67	461,1	6,1	1	NA	0,223	0,89	0,05	0,04	0,00 0900 0	0,1 600	41,92

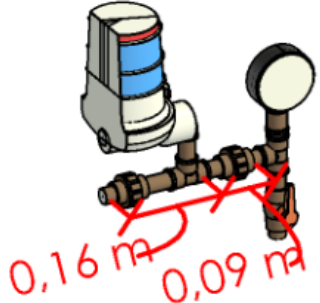
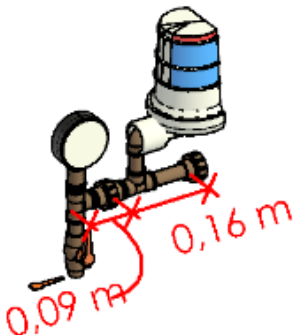
Parâmetros																			
Season	Date	Operation	Turb	Ph	Cor	SS	Cl	Fe	CT	Ecoli	NO3	P	Mn	NH3	Cl <sub>free</sub>	Cl <sub>Tot</sub>	Q	W	hpt
Tran	27/08/2025	FiltNoCl	0	4,8	9	2	1,6	0,87	7,5	0	1,6	NA	0,032	0,2	0,03	0,03	0,00 0900 0	0,1 600	41,92
Tran	27/08/2025	H2OFiltCl	0,73	3,6	20	3	3,2	0,14	0	0	2,1	NA	0,05	0	0,17	0,93	0,00 0900 0	0,1 600	41,92
Tran	27/08/2025	Filt45Cl	0	3,6	23	4	4,8	0,38	8,6	0	1,3	NA	0,051	0,17	0,17	0,28	0,00 0900 0	0,1 600	41,92

\*NA = Não avaliado.

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 2.A - Cálculo de Perda de Carga Localizada.

Peças e conexões - Cálculo do comprimento equivalente								
Local	Trecho	DN (mm)	Peça	Quant.	Perda de Carga		Ilustração dos Trechos	
					Unitária	Total		
Protótipo SAASI	Trecho 1-2 (Bomba + Sucção)	32	Joelho 90°	4	2	8		
			Tê de Passagem Direto	1	1,5	1,5		
			Tê de Saída Bilateral	3	4,6	13,8		
			Válvula Esfera Reduzida	1	1,83	1,83		
			União	1	1,53	1,53		
	<b>TOTAL</b>						<b>26,66</b>	
	Trecho 2-3 (Antes do Filtrador)	25	Registro Ângulo Aberto	2	8,4	16,8		
		20	Registro Ângulo Aberto	2	6,1	12,2		
		25	Joelho 90°	1	1,5	1,5		
		25	Válvula de Retenção	1	3,8	3,8		
		25	Tê de passagem direto	1	0,9	0,9		
		25	Tê de Saída Bilateral	3	3,1	9,3		
		20	União	1	0,91	0,91		

	25	União	1	1,16	1,16	
<b>TOTAL</b>					<b>46,57</b>	
Trecho 2- Cl (Antes do Clorador)	25	Registro Ângulo Aberto	1	8,4	8,4	
	25	Tê de Saída Bilateral	1	3,1	3,1	
	25	Tê de Saída de lado	1	3,1	3,1	
	25	União	2	1,6	3,2	
	25	Válvula de Retenção	1	3,8	3,8	
<b>TOTAL</b>					<b>21,6</b>	
Trecho Cl - 3 (Depois do Clorador)	25	Registro Ângulo Aberto	1	8,4	8,4	
	25	Tê de Saída Bilateral	1	3,1	3,1	
	25	Tê de Saída de lado	1	3,1	3,1	
	25	União	1	1,6	1,6	
	25	Válvula de Retenção	1	3,8	3,8	
<b>TOTAL</b>					<b>20</b>	

	Trecho Filt - 4 (Depois do Filtrador)	25	Registro Ângulo Aberto	1	8,4	8,4	
		32	Tê de Saída Bilateral	1	4,6	4,6	
		25	Tê de Saída Bilateral	1	3,1	3,1	
		25	Tê de Passagem Direto	1	0,9	0,9	
		32	Válvula de Retenção	1	4,9	4,9	
		25	Joelho 90°	2	1,5	3	
		25	União	1	1,6	1,6	
		32	Joelho 90°	1	2	2	
	<b>TOTAL</b>					<b>28,5</b>	
	Trecho 4 - 5 (Alimentação Caixa D'água)	32	JOELHO 90	2	2	4	
		32	Registro Ângulo Aberto	2	10,5	21	
32		Tê de Saída Bilateral	1	4,6	4,6		
<b>TOTAL</b>					<b>29,6</b>		

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

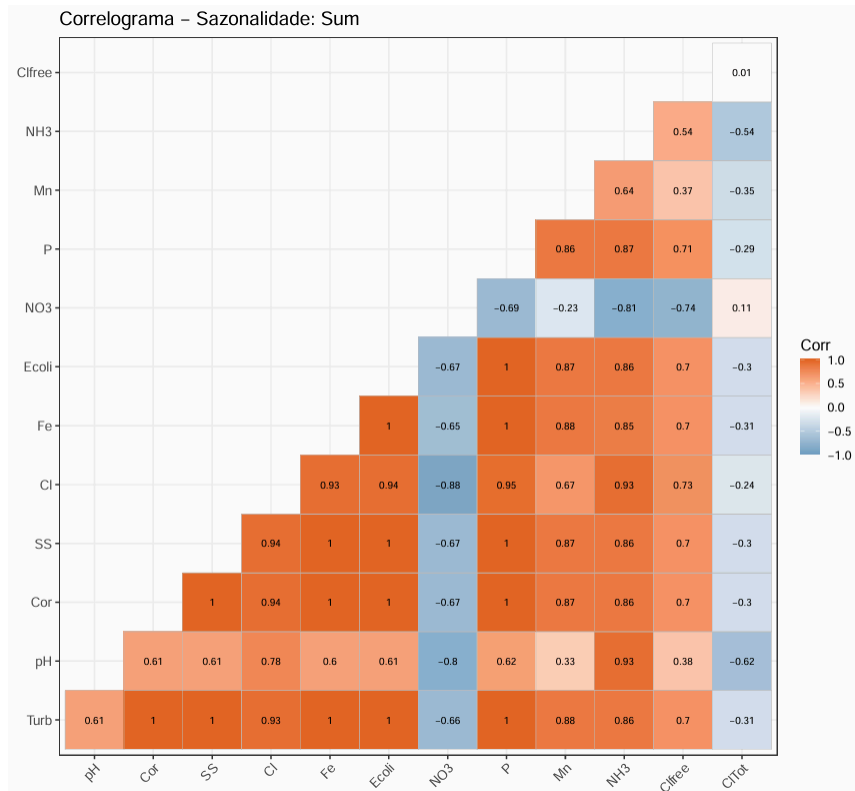
Tabela 3.A - Cálculo de Perda de Carga por Hazen-Williams.

PLANILHA DE CÁLCULO DE PERDA DE CARGA POR HAZEN-WILLIAMS														
Local	Trecho	Peso	Vazão		Diâmetro		Áreas (m <sup>2</sup> )	Velocidade (m/s)	Comprimento			Perda de Carga		
			(l/s)	(m <sup>3</sup> /s)	DN (mm)	DI (mm)			Real (m)	Equiv. (m)	Total	Unitária (m/m)	Especial (m)	Total (m)
Protótipo SAASI	TRECHO 1-2 (BOMBA + SUCÇÃO)	2,1	0,4	0,0004	32	35,2	0,00097	0,45	1,16	26,66	27,82	0,0091	0	0,25
	Trecho 2-3 (Antes do Filtrador)	1,6	0,4	0,0004	20	21,6	0,00037	1,04	1,76	46,57	48,33	0,0731	0	3,53
	Trecho 2- Cl (Antes do Clorador)	1,5	0,4	0,0004	25	27,8	0,00061	0,61	0,35	21,6	21,95	0,0208	0	0,46
	Trecho Cl - 3 (Depois do Clorador)	1	0,3	0,0003	25	27,8	0,00061	0,49	0,35	20	20,35	0,0146	0	0,30
	Trecho Filt - 4 (Depois do Filtrador)	1	0,3	0,0003	25	27,8	0,00061	0,49	1,58	28,5	30,08	0,0146	0	0,44
	Trecho 4 - 5 (Alimentação Caixa D'água)	2,1	0,4	0,0004	32	35,2	0,00097	0,45	8,67	29,6	38,27	0,0091	0	0,35

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

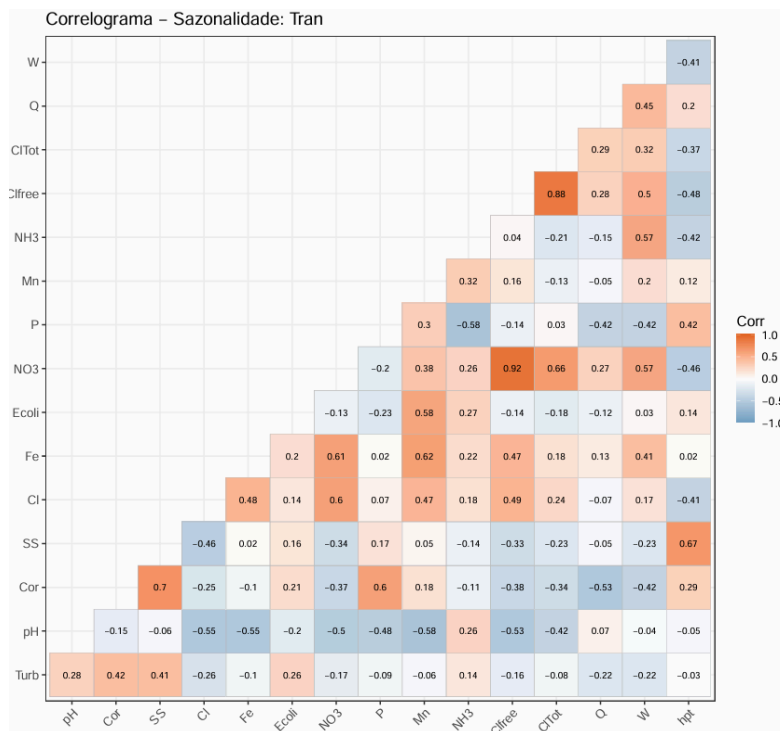
APÊNDICE C- GRÁFICO COM OS DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS HIPÓTESES

**Gráfico 1.A - Correlograma em função da Estação Verão.**



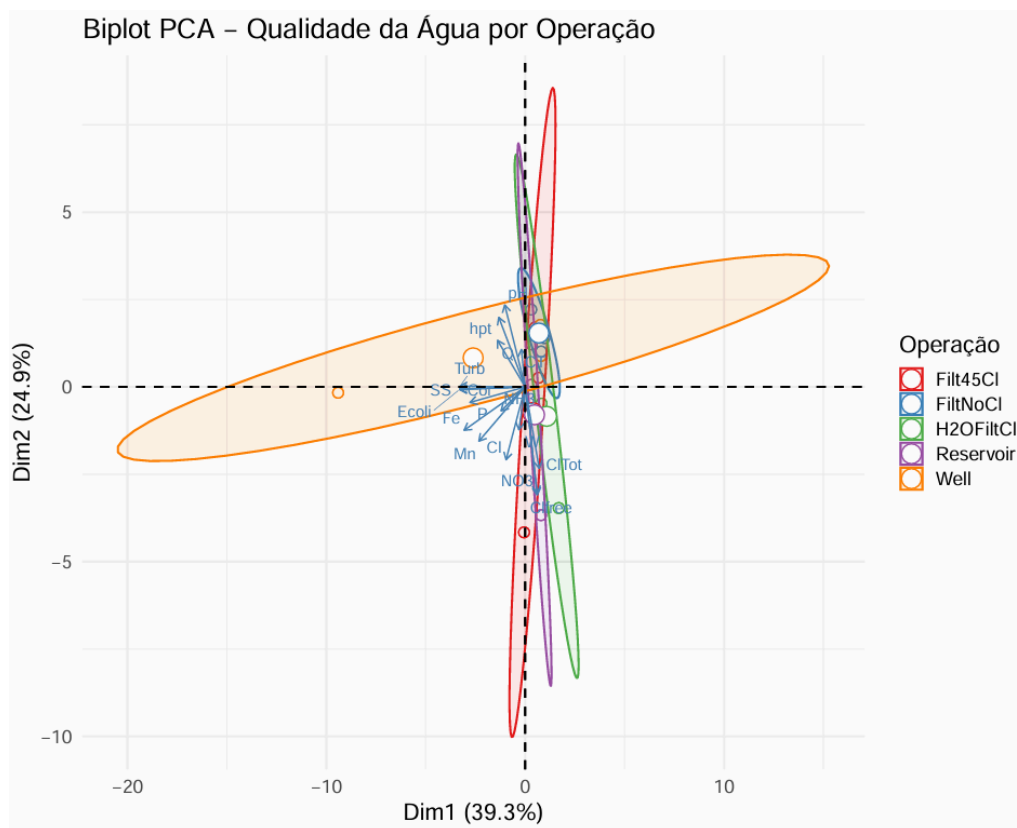
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

**Gráfico 2.A - Correlograma em função da Estação Transitória.**



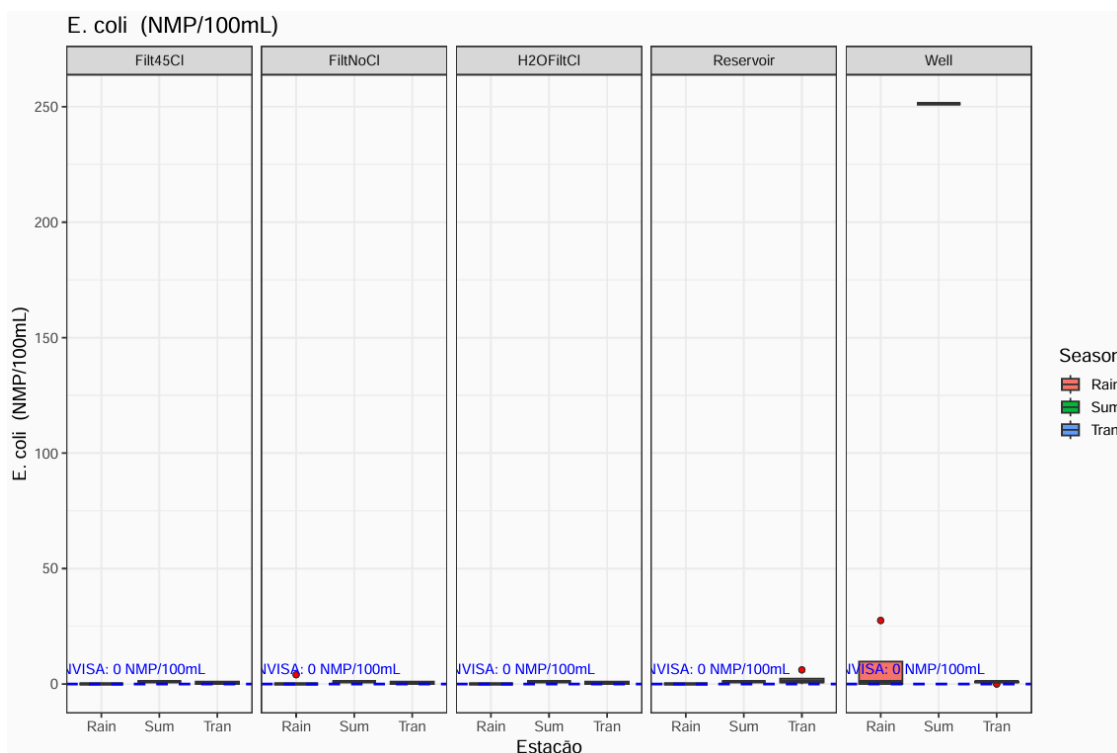
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 3.A - BiPlot PCA.



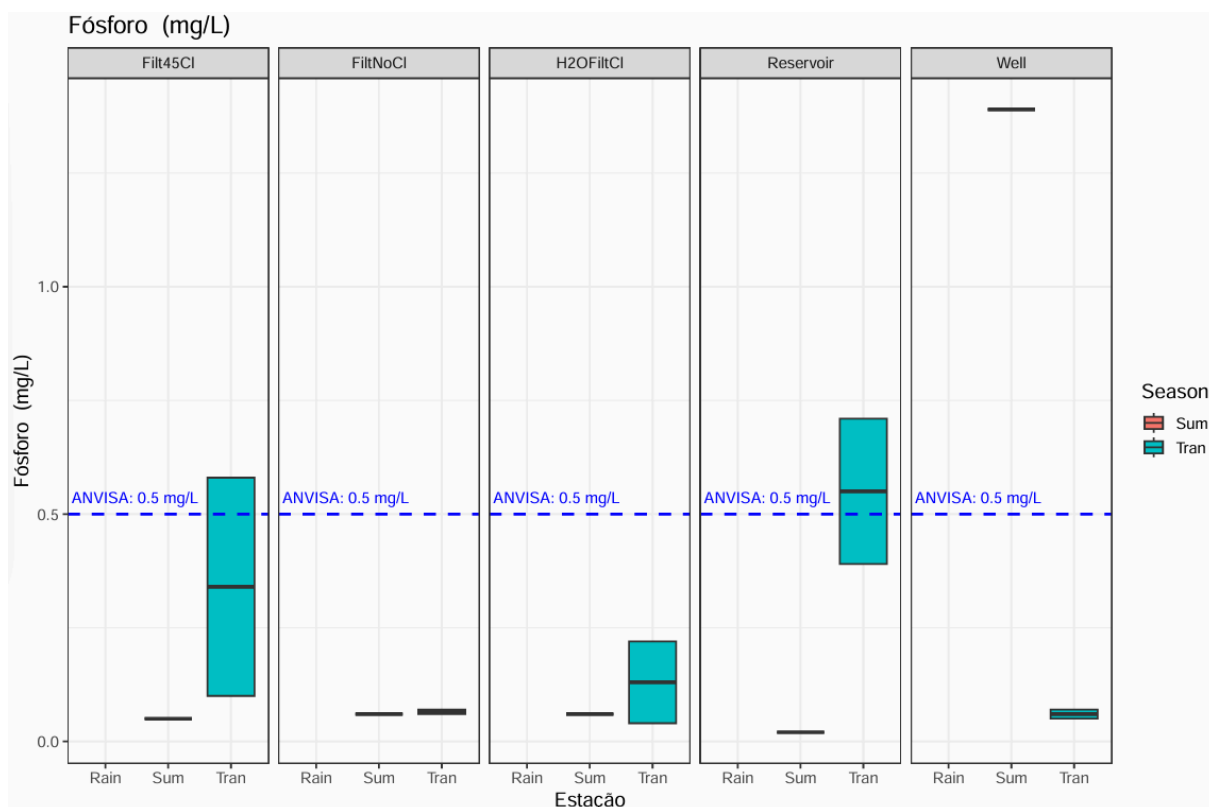
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 4.A - BoxPlot para o parâmetro E.coli.



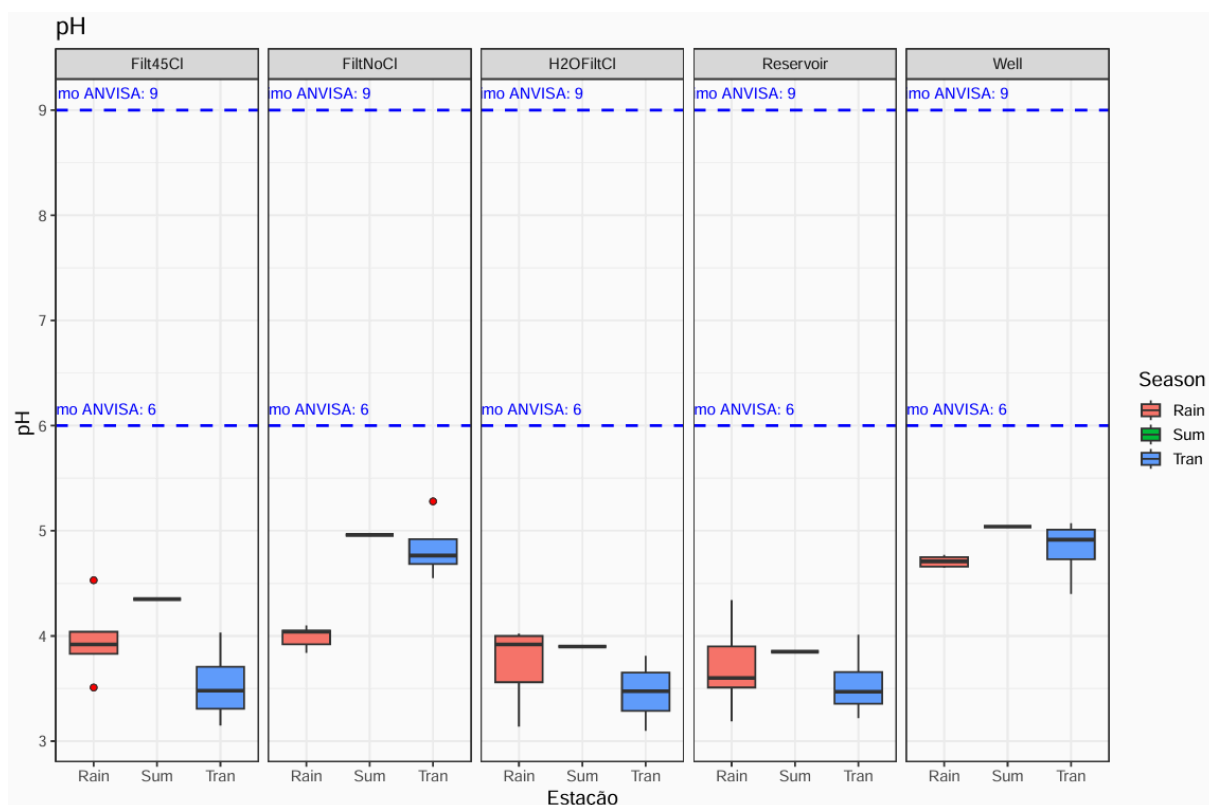
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 5.A - BoxPlot para o parâmetro Fósforo.



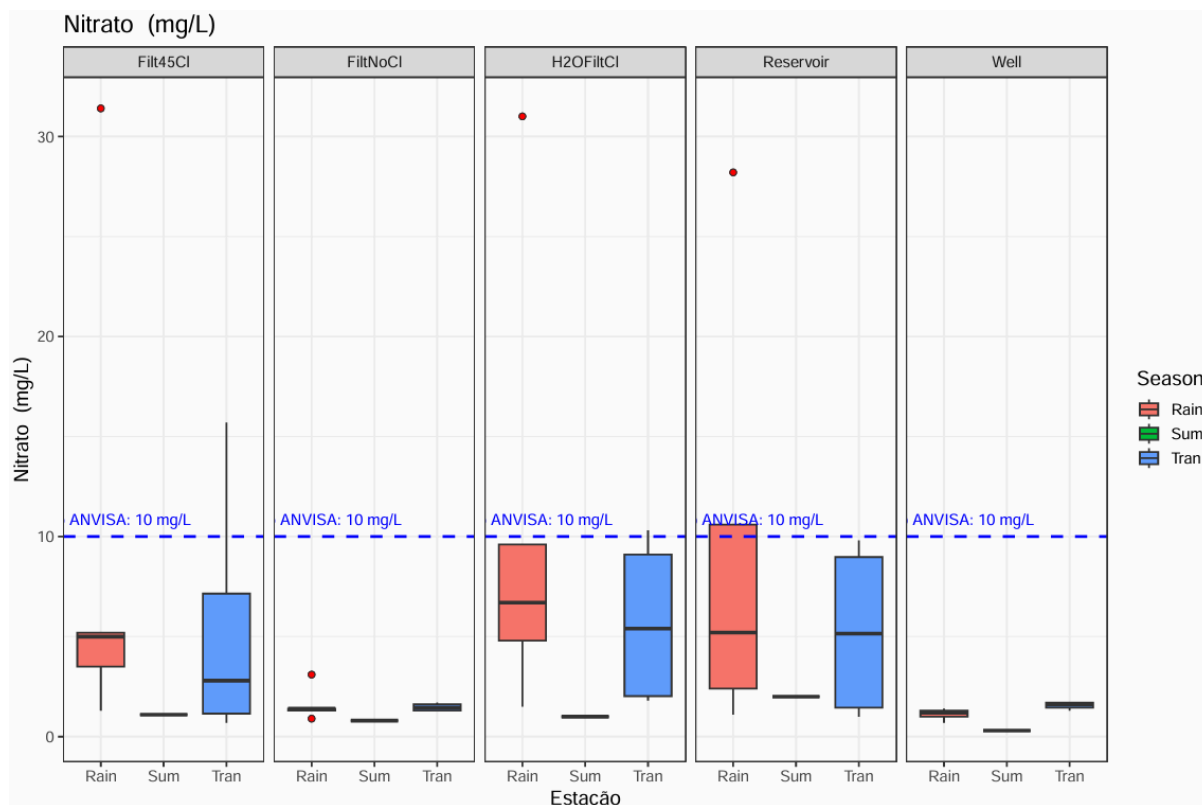
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 6.A - BoxPlot para o parâmetro pH.



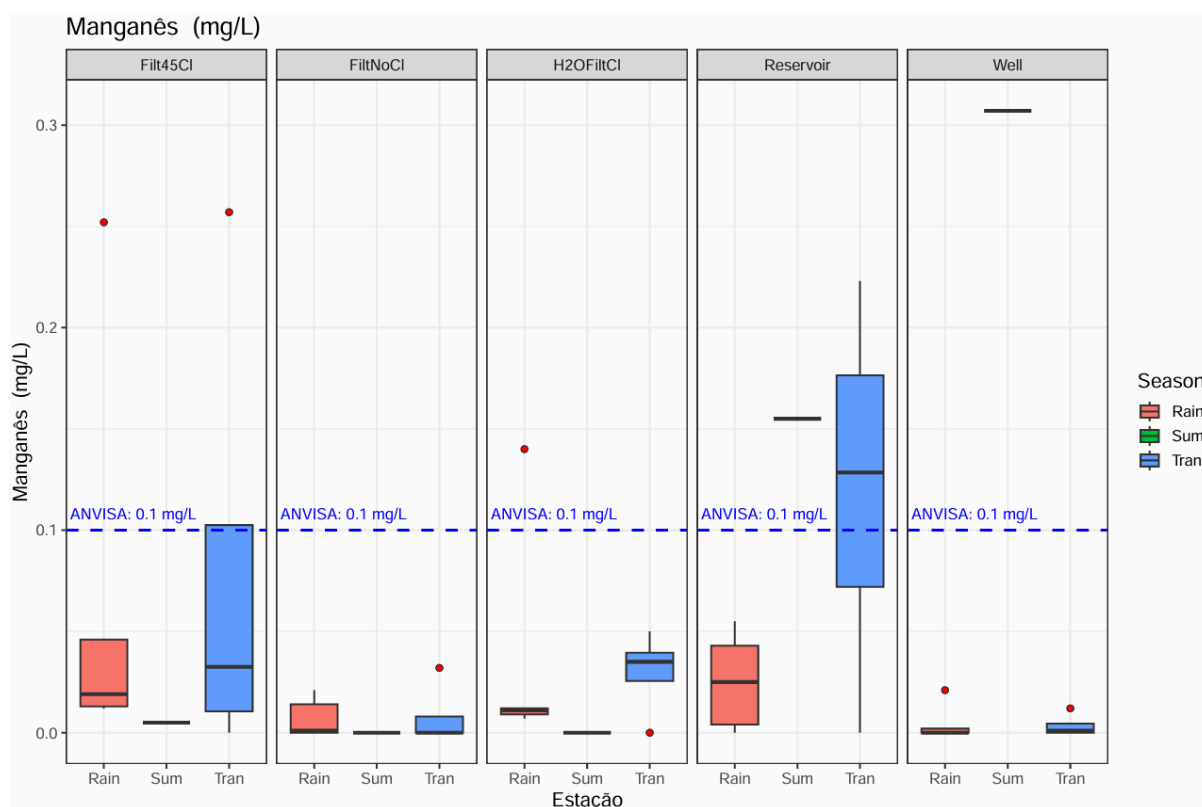
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 7.A - BoxPlot para o parâmetro Nitrato.



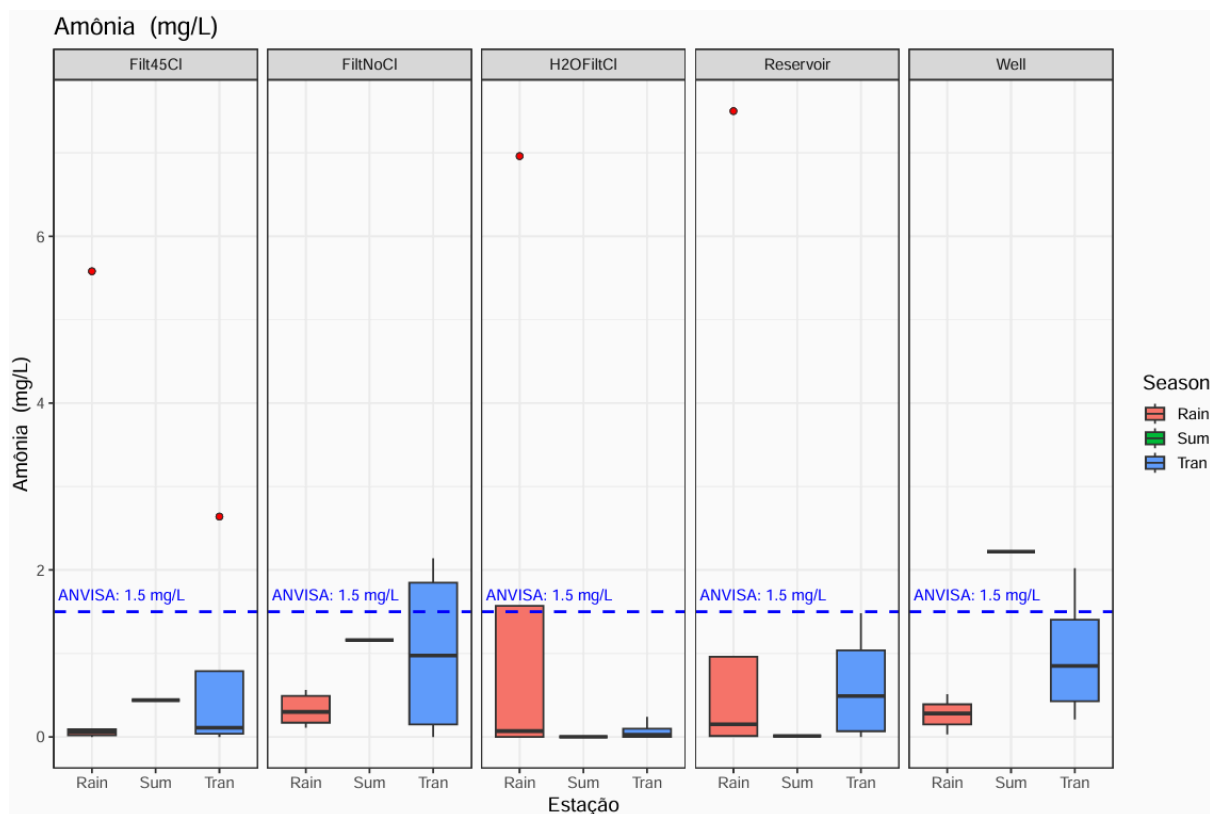
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 8.A - BoxPlot para o parâmetro Manganês.



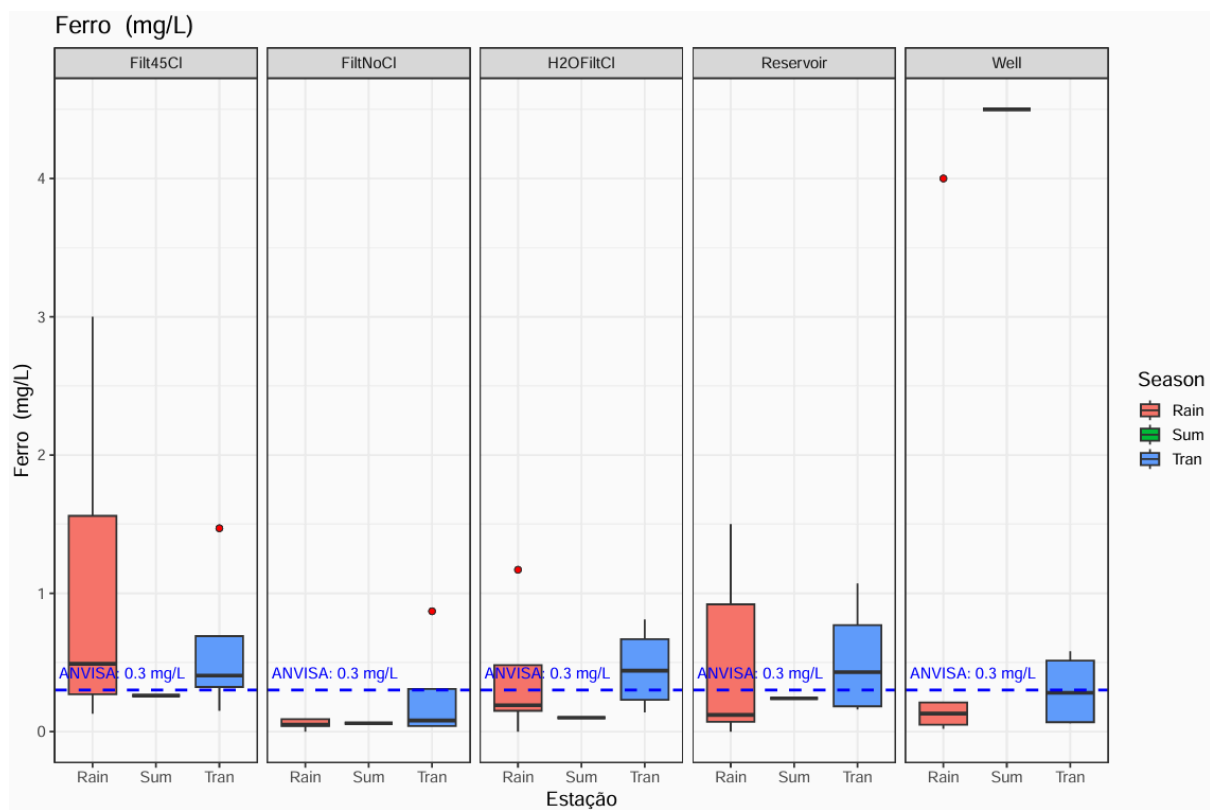
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 9.A - BoxPlot para o parâmetro Amônia.



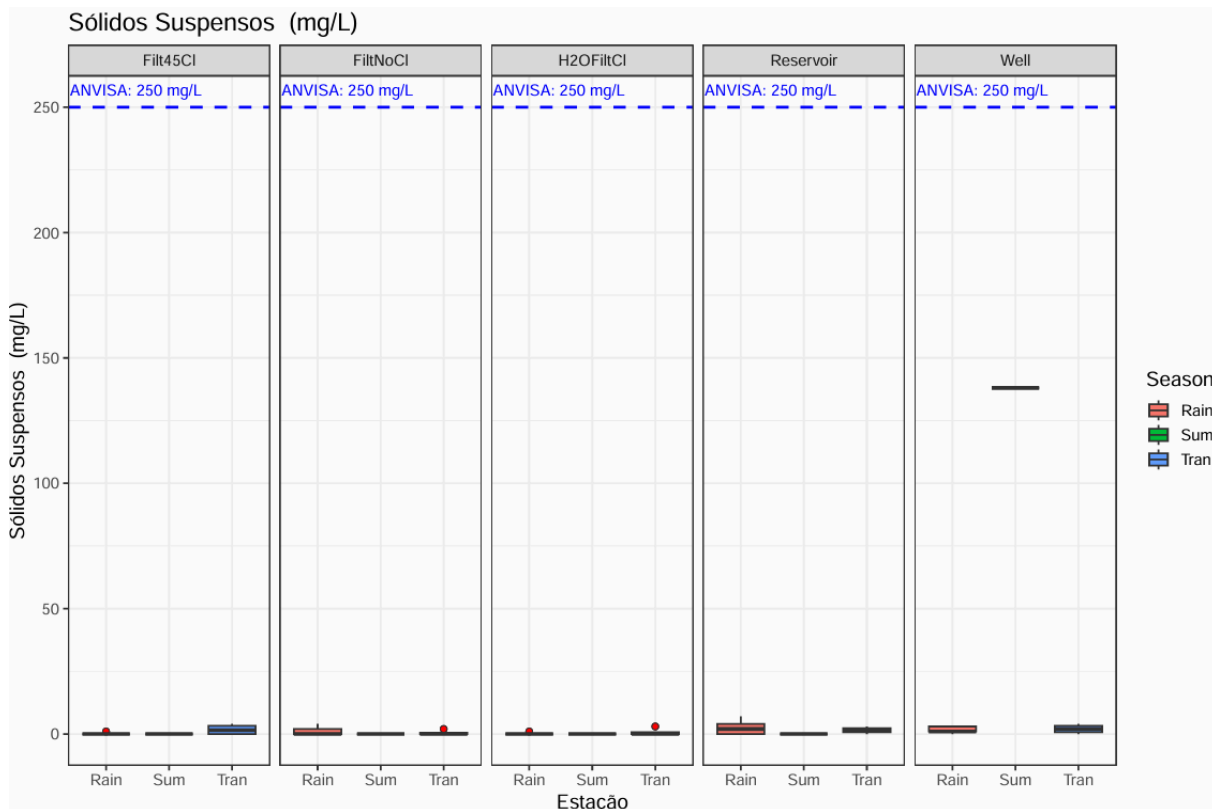
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 10.A - BoxPlot para o parâmetro Ferro.



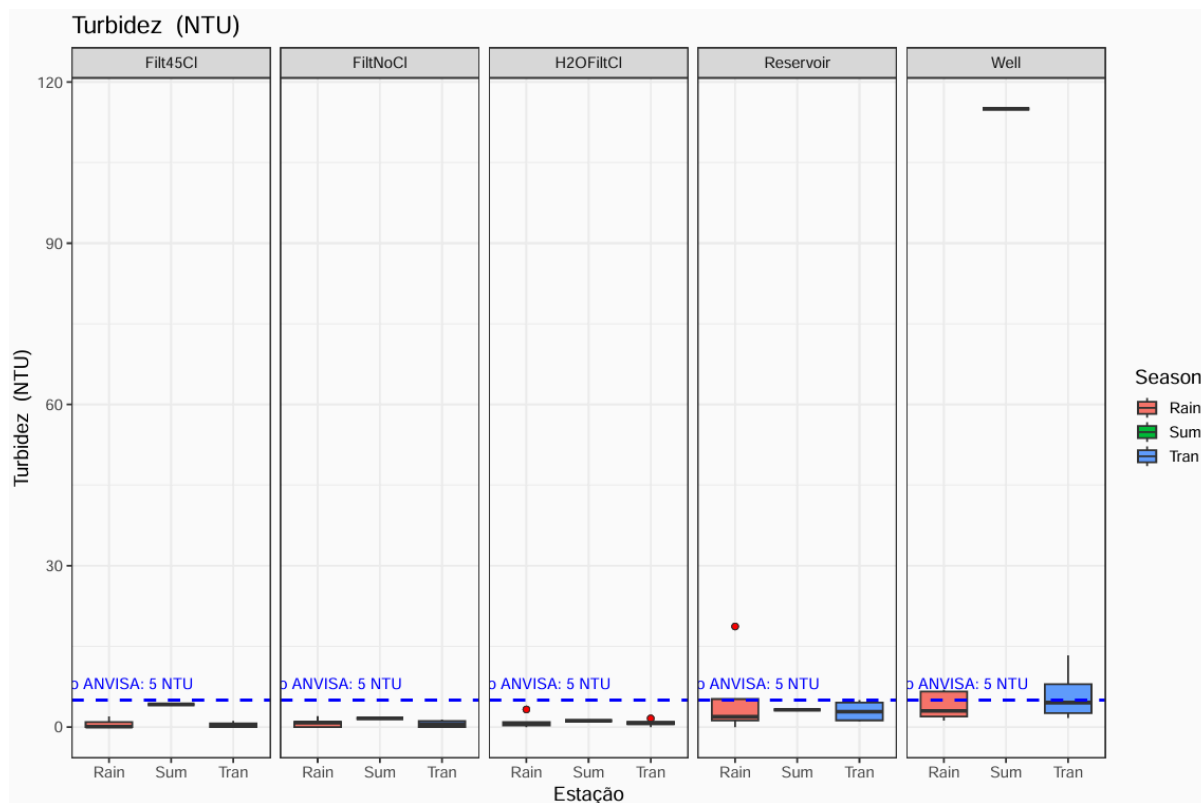
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

**Gráfico 11.A - BoxPlot para o parâmetro Sólidos Suspensos.**



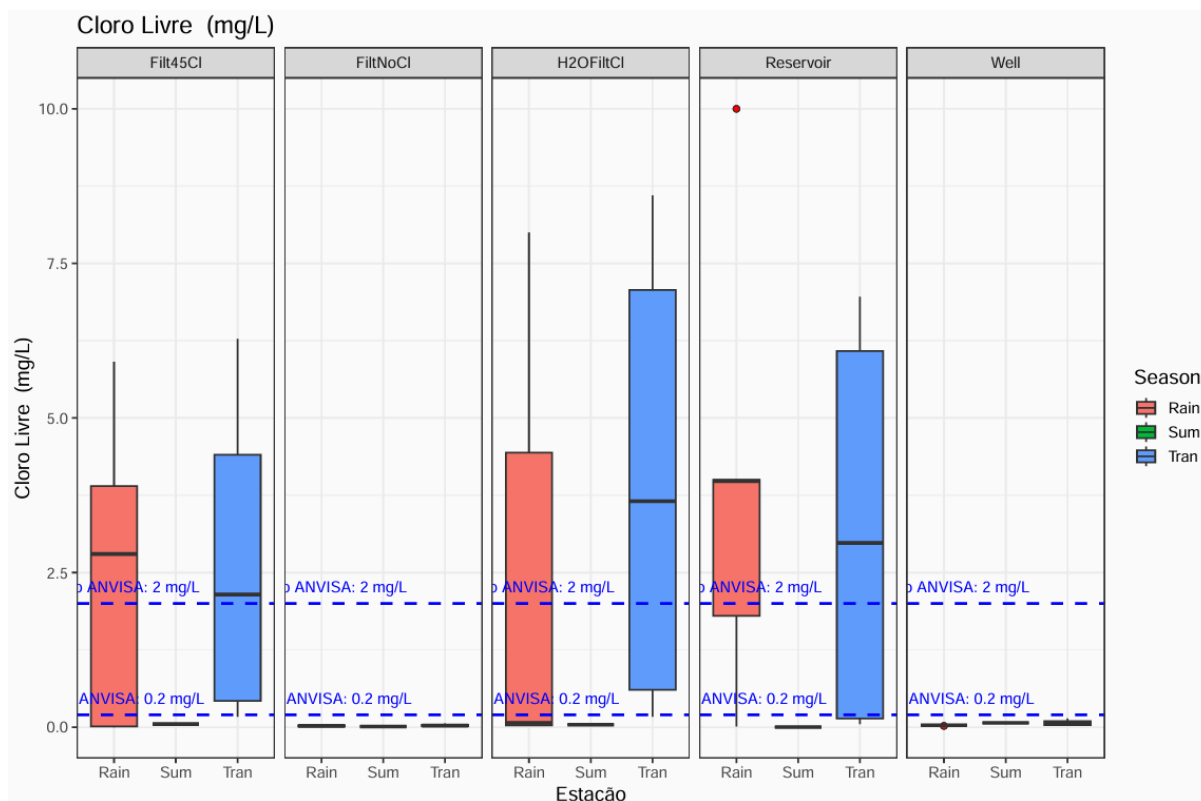
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

**Gráfico 12.A - BoxPlot para o parâmetro Turbidez.**



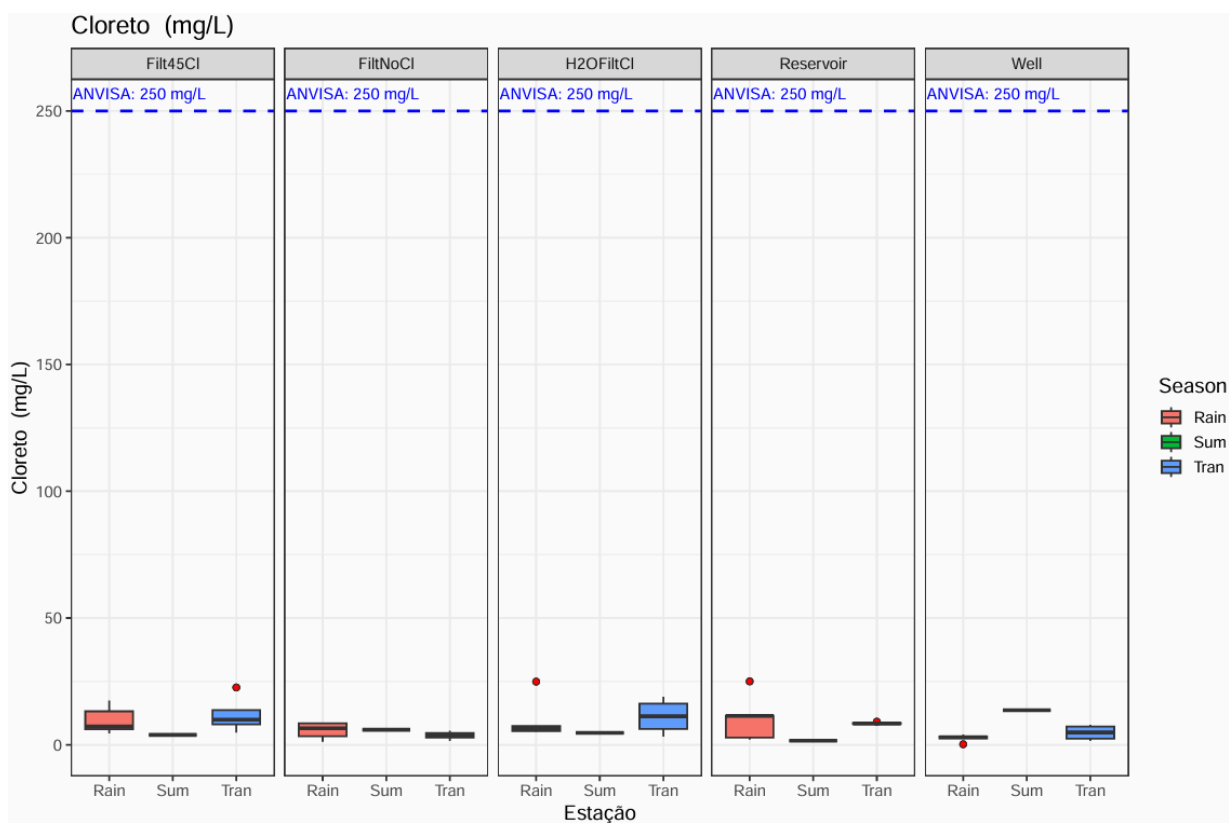
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 13.A - BoxPlot para o parâmetro Cloro Livre.



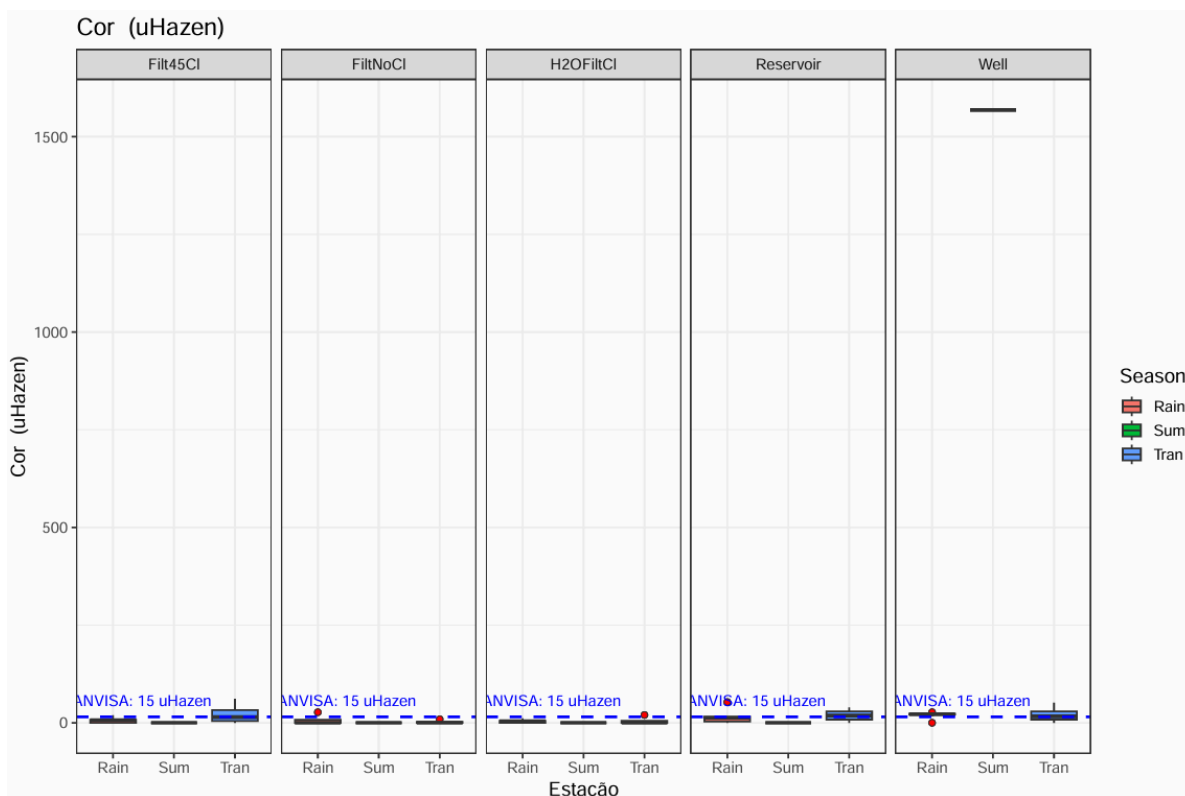
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 14.A - BoxPlot para o parâmetro Cloreto.



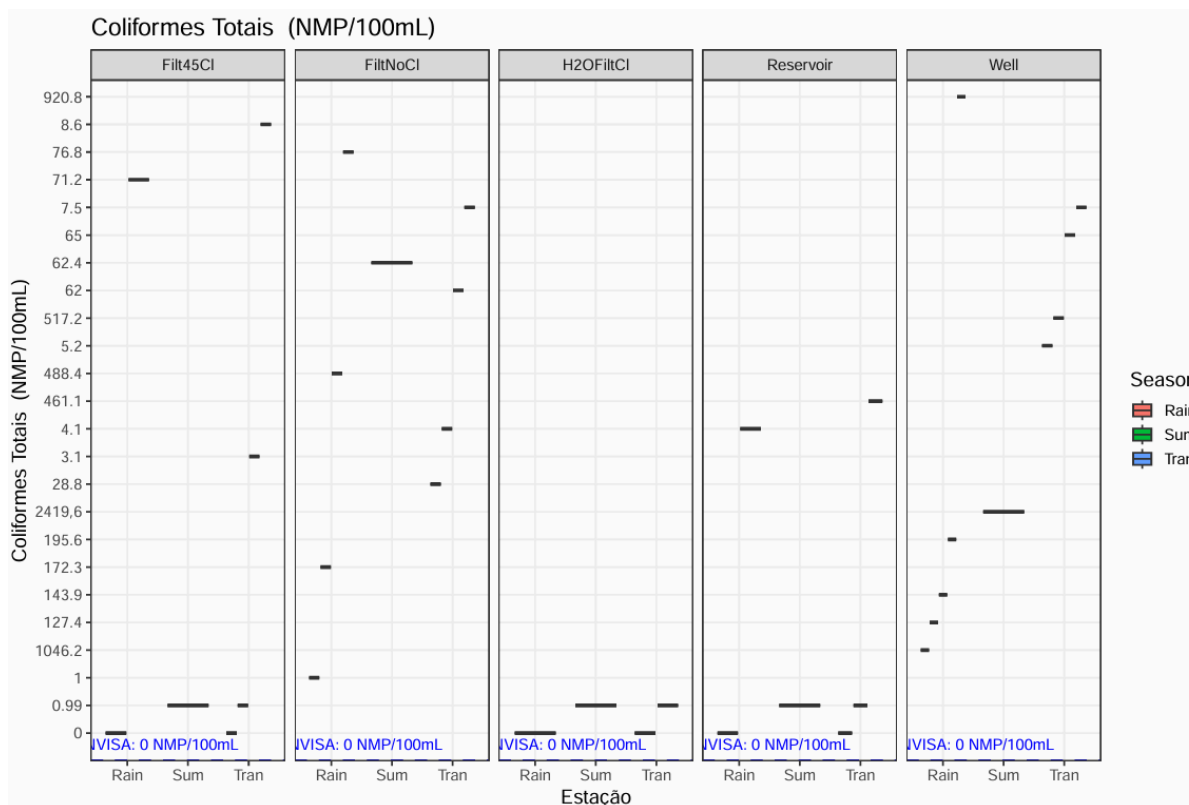
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 15.A - BoxPlot para o parâmetro Cor.



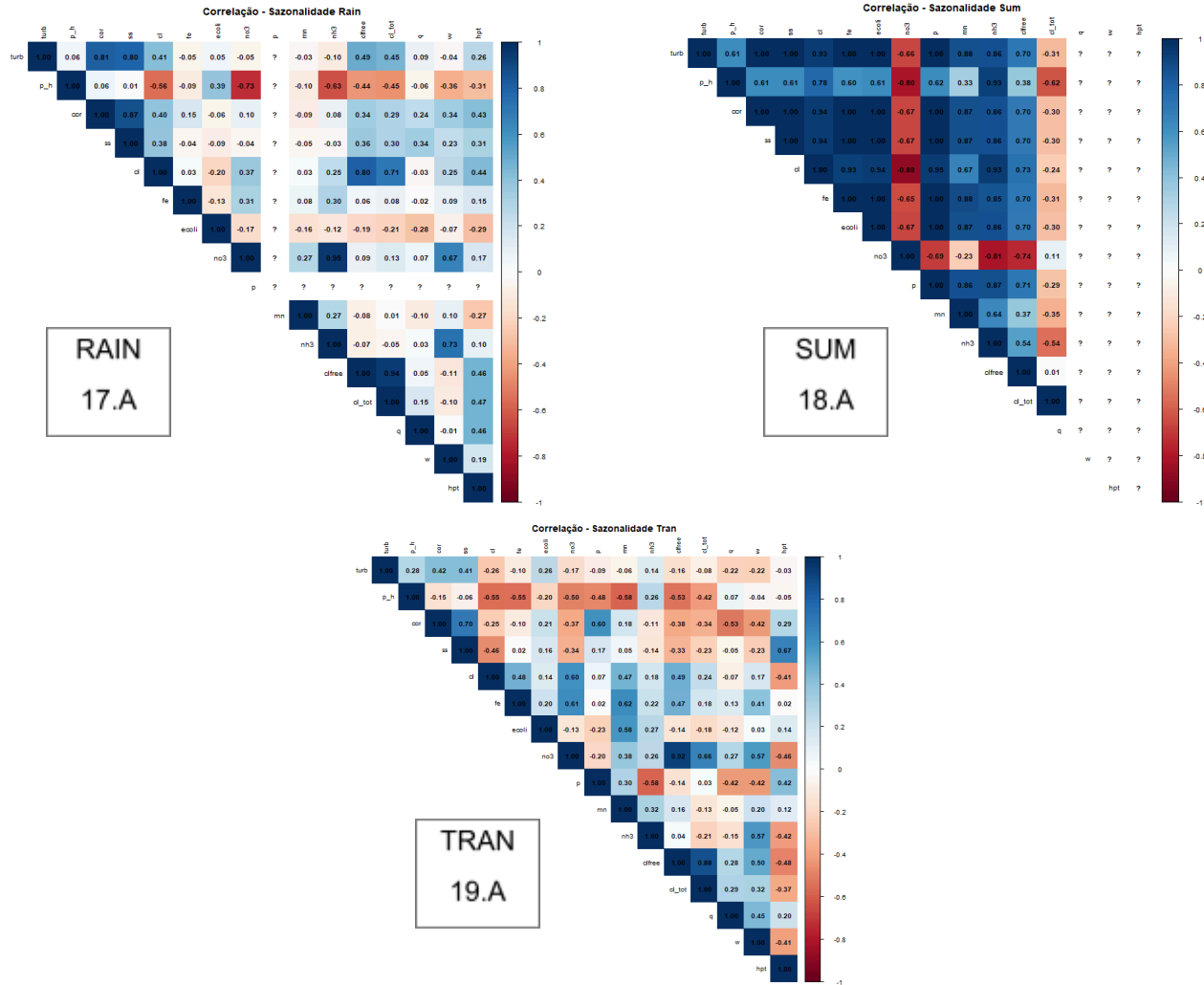
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 16.A - BoxPlot para o parâmetro Coliformes Totais.



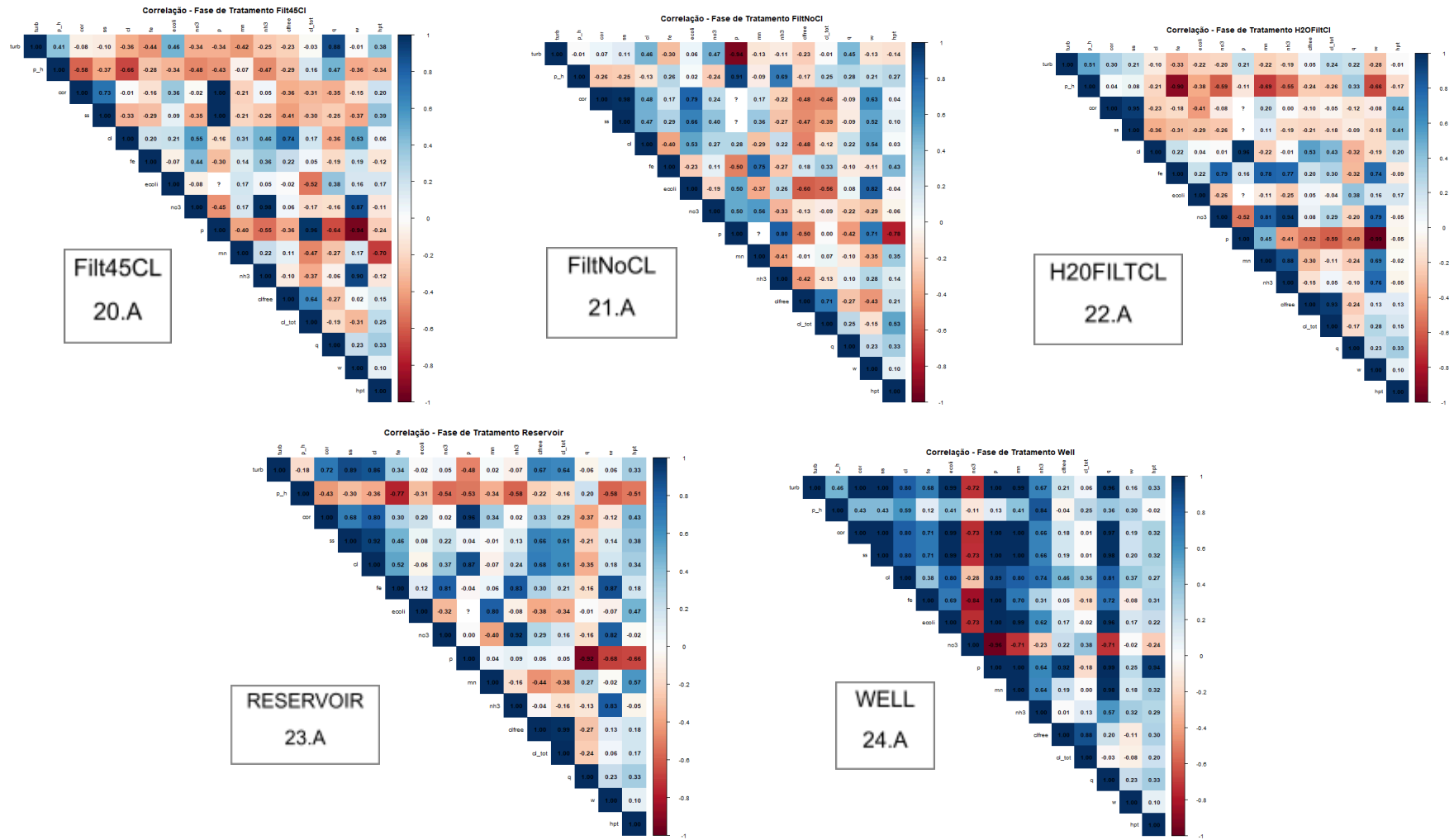
Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 17.A, 18.A e 19.A - Correlogramas em função da Sazonalidade: Inverno, Verão e Transição.



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Gráfico 20.A, 21.A, 22.A, 23.A e 24.A - Correlograma para cada fase de tratamento estudada.



Fonte: elaborado pelos autores, 2026