



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ - CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - FAESA**

CARLA FABIANE LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES MATRIZES HÍDRICAS
DE CANAÃ DOS CARAJÁS (PA)**

**TUCURUÍ – PA
2026**

CARLA FABIANE LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES MATRIZES HÍDRICAS
DE CANAÃ DOS CARAJÁS (PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Dr. Raynner Menezes Lopes

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

S586a Silva, Carla Fabiane Lima da.
Avaliação da qualidade da água em diferentes matrizes
hídricas de Canaã dos Carajás (PA) / Carla Fabiane Lima da
Silva. — 2026.
81 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal
do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Sanitária e Ambiental, Tucuruí, 2026.

1. qualidade da água. 2. análise de componentes
principais. 3. matrizes hídricas. 4. monitoramento
ambiental. 5. Canaã dos Carajás. I. Título.

CDD 628.16

CARLA FABIANE LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES MATRIZES HÍDRICAS
DE CANAÃ DOS CARAJÁS (PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: 08 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
RAYNNER MENEZES LOPES
Data: 17/07/2026 16:31:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Raynner Menezes Lopes, Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
FAESA/CAMTUC/UFPa - (Orientador)



Documento assinado digitalmente
LUAN MAGALHÃES FRANCO
Data: 17/07/2026 17:03:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luan Magalhães Franco, Engenheiro Sanitarista e Ambiental.
Empresa: Águas do Pará – (Examinador Externo)



Documento assinado digitalmente
DAVI EDSON SALES E SOUZA
Data: 17/07/2026 16:54:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Davi Edson Sales e Souza, Dr. em Engenharia de Recursos Naturais da
Amazônia - FAESA/CAMTUC/UFPa – (Examinador Interno)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter cuidado de mim ao longo desta caminhada e por me conceder a oportunidade de fazer parte da minha família, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais, Alaídes e Orlando, expresso minha mais profunda gratidão por todo o esforço e dedicação empregados na criação de nossa família, mesmo diante de tantas dificuldades. Vocês sempre foram e continuarão sendo meu maior alicerce, exemplo e fonte de motivação.

Aos meus irmãos e às minhas sobrinhas, agradeço o carinho, apoio e presença constante durante toda essa trajetória. Aos meus gatinhos, pela companhia silenciosa nos momentos de estudo, pelo conforto nos dias difíceis e por tornarem essa jornada mais leve, sendo meu apoio emocional.

Aos meus amigos, meu sincero agradecimento pelo incentivo, pela compreensão e por nunca terem desistido de mim ao longo desses anos. Em especial, à Emanuelle Braga, Dacio Souza, Laudeci Costa, Levy Ranieri e Paulo Victor pela amizade, escuta, carinho e acolhimento, vocês foram um presente muito especial.

Agradeço também às pessoas que conheci quando cheguei a Canaã dos Carajás e que contribuíram significativamente para essa jornada, tornando-se minha segunda família. Em especial, à Camila Nunes, amiga e excelente gerente técnica; a Luís Soares, Mikeias Bueno, Dalliane Feller, Thayná Rodrigues e à minha querida amiga Milka Barros.

Um agradecimento muito especial ao Charles Sena, amigo, irmão e uma das pessoas mais importantes dessa trajetória. Sua amizade ultrapassou os limites do companheirismo, proporcionando-me acolhimento, apoio e um sentimento de pertencimento junto à sua família. Nos momentos mais difíceis, sua presença e seu incentivo foram fundamentais para que eu encontrasse forças para seguir em frente. Minha eterna gratidão por todo o cuidado e generosidade.

Por fim, agradeço aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica e contribuíram para a construção deste trabalho. Em especial, ao professor Dr. Davi Sales, ao professor Dr. Carlos Eduardo e ao meu orientador, professor Dr. Raynner Menezes, agradeço o apoio, confiança e por não terem desistido de mim ao longo dessa caminhada. A contribuição de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

A qualidade da água é influenciada pela interação entre fatores naturais e antrópicos, cujos efeitos variam conforme as características dos sistemas hídricos e as condições ambientais. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica temporal e estrutural da qualidade da água em diferentes matrizes hídricas do município de Canaã dos Carajás, Pará, utilizando técnicas estatísticas multivariadas. Foram analisadas as matrizes de água superficial, subterrânea, potável e de efluente, a partir de dados de monitoramento obtidos entre janeiro de 2024 e dezembro de 2025. Os dados foram organizados e submetidos à estatística descritiva, análises de correlação e Análise de Componentes Principais (PCA), considerando abordagens estrutural e temporal. Os resultados evidenciaram diferenças entre as matrizes avaliadas, com maior estabilidade da água potável, maior variabilidade do efluente e comportamento intermediário das águas superficiais e subterrâneas. As análises multivariadas demonstraram que a variabilidade da qualidade da água foi condicionada pela interação entre processos físicos, químicos e microbiológicos, associados à sazonalidade hidrológica e às condições operacionais dos sistemas de abastecimento e tratamento. A PCA permitiu sintetizar esses padrões e identificar os principais gradientes responsáveis pela diferenciação entre as matrizes e pelas variações observadas ao longo do período de monitoramento. Conclui-se que a abordagem integrada adotada possibilitou compreender a dinâmica da qualidade da água em diferentes matrizes hídricas, fornecendo subsídios para o monitoramento ambiental e para a gestão dos recursos hídricos em municípios amazônicos.

Palavras-chave: qualidade da água. análise de componentes principais. matrizes hídricas. monitoramento ambiental. recursos hídricos. Canaã dos Carajás.

RESUMO (INGLÊS)

Water quality is influenced by the interaction of natural and anthropogenic factors, whose effects vary according to the characteristics of water systems and environmental conditions. In this context, this study aimed to evaluate the temporal and structural dynamics of water quality in different water matrices in the municipality of Canaã dos Carajás, Pará State, Brazil, using multivariate statistical techniques. Surface water, groundwater, drinking water, and wastewater matrices were analyzed based on monitoring data collected between January 2024 and December 2025. The data were organized and analyzed using descriptive statistics, correlation analysis, and Principal Component Analysis (PCA), considering both structural and temporal approaches. The results revealed distinct patterns among the evaluated matrices, with drinking water showing the highest stability, wastewater presenting the greatest variability, and surface and groundwater exhibiting intermediate behavior. The multivariate analyses demonstrated that water quality variability was driven by the interaction of physical, chemical, and microbiological processes associated with hydrological seasonality and the operational conditions of water supply and wastewater treatment systems. PCA enabled the synthesis of these patterns and identified the main gradients responsible for differentiating the water matrices and explaining the temporal variability observed during the monitoring period. It is concluded that the integrated assessment of different water matrices using multivariate statistical techniques provided a comprehensive understanding of the environmental and operational factors controlling water quality, supporting environmental monitoring and water resources management in Amazonian municipalities.

Keywords: water quality; principal component analysis; water matrices; environmental monitoring; water resources management; Canaã dos Carajás.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização do município de Canaã dos Carajás, Pará, Brasil.....	24
Figura 2: Inserção hidrográfica do município de Canaã dos Carajás na bacia Tocantins-Araguaia e sub-bacia do rio Itacaiúnas.....	25
Figura 3: Pontos amostrais por matrizes.....	27
Figura 4: Etapas metodológicas do estudo.....	27
Figura 5: Coleta de amostras.....	28
Figura 6: Análises laboratoriais realizadas.....	29
Figura 7: Boxplot comparativo entre as matrizes no PAST e RStudio.....	39
Figura 8: Heatmap da matriz de correlação estrutural.....	44
Figura 9: Scree plot da PCA estrutural no PAST e RStudio.....	46
Figura 10: Biplot da PCA estrutural no PAST e RStudio.....	48
Figura 11: Heatmap da matriz de correlação temporal.....	51
Figura 12: Scree plot da PCA temporal no PAST e RStudio.....	53
Figura 13: Biplot da PCA temporal no PAST e RStudio.....	55
Figura 14: Gráfico de Eficiência da ETE.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais e fatores de influência das diferentes matrizes hídricas avaliadas.	23
Tabela 2 - Descrição dos pontos amostrais e matrizes avaliadas no estudo.	26
Tabela 3 - Parâmetros utilizados e respectivas matrizes hídricas avaliadas.	30
Tabela 4 - Parâmetros analisados e aplicação nas matrizes estudadas.	30
Tabela 5 - Variância explicada pela Análise de Componentes Principais.	45
Tabela 6 - Cargas fatoriais (loadings) das variáveis nos cinco primeiros componentes principais.	47
Tabela 7 - Variância explicada da PCA temporal.	52
Tabela 8 - Loadings da PCA temporal.	53

ABREVIATURAS E SIGLAS

IQA – ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA

PCA – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

OD – OXIGÊNIO DISSOLVIDO

ETE – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

ETA – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

STD – SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS

SIAGAS – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

SGB – SISTEMA GEOLÓGICO BRASILEIRO

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE

PC/CP – COMPONENTE PRINCIPAL

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo geral.....	12
2.2. Objetivos específicos	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1. Qualidade da água e parâmetros indicadores	13
3.2. Índices de qualidade da água e limitações.....	14
3.3. Contexto hidroclimático e hidrológico da área de estudo	15
3.4. Análise estatística multivariada aplicada à qualidade da água.....	17
3.5. Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada à qualidade da água .	18
3.6. Variabilidade temporal da qualidade da água	20
3.7. Avaliação integrada de diferentes matrizes de água	22
4. METODOLOGIA.....	24
4.1. Área de estudo e pontos amostrais.....	24
4.2. Base de dados e organização das informações	28
4.3. Tratamento, padronização e critérios de consistência dos dados	31
4.4. Análises Estatísticas e multivariadas	32
4.5. Avaliação da eficácia do sistema de tratamento de efluentes	34
4.6. Avaliação integrada entre matrizes	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. Consistência da base integrada	36
5.2. Estatística descritiva e comportamento geral das matrizes	37
5.3. Interpretação dos boxplots	38
5.4. Normalidade e correlação entre parâmetros	40
5.5. Heatmap de correlação estrutural	42
5.6. PCA estrutural	45

5.7.	Heatmap de correlação temporal	49
5.8.	PCA temporal	52
5.9.	Integração entre PCA estrutural e temporal	55
5.10.	Avaliação da eficiência da ETE.....	57
5.11.	Limitações metodológicas	60
5.12.	Considerações integradas dos resultados	62
6.	CONCLUSÃO.....	65
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
	APÊNDICES	73

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da água constitui um dos principais indicadores da integridade ambiental e da sustentabilidade dos recursos hídricos, desempenhando papel fundamental na manutenção dos ecossistemas aquáticos, no abastecimento público e na segurança hídrica. Entretanto, o crescimento das atividades antrópicas, associado à expansão urbana, às atividades agropecuárias e ao lançamento de efluentes, tem intensificado processos de degradação dos sistemas hídricos em diferentes contextos ambientais (Jung *et al.*, 2023).

Na região amazônica, a dinâmica da qualidade da água apresenta elevada complexidade devido à forte influência da sazonalidade hidrológica, marcada por períodos distintos de cheia e estiagem. Essas variações interferem diretamente nos processos de transporte de sedimentos, diluição de compostos dissolvidos e disponibilidade de matéria orgânica, refletindo nos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água (Prado *et al.*, 2021).

Historicamente, a avaliação da qualidade da água tem sido realizada por meio de índices sintéticos, como os Índices de Qualidade da Água (IQA), que integram diferentes parâmetros em um único valor numérico. Embora amplamente utilizados, esses índices apresentam limitações relacionadas à rigidez de ponderação e à simplificação da variabilidade ambiental, podendo dificultar a interpretação de processos hidroambientais complexos (Wehbe; Baroud, 2024; Branchi, 2022; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, s.d.).

Embora existam diversos estudos sobre a qualidade da água em matrizes hídricas isoladas, ainda são escassas abordagens que integrem, simultaneamente, águas superficiais, subterrâneas, tratadas e efluentes em municípios amazônicos, considerando a influência da sazonalidade e das características hidroambientais. Diante dessa lacuna, esta pesquisa buscou responder à seguinte questão: como diferentes matrizes hídricas se comportam ao longo do tempo em um município amazônico e quais fatores ambientais e operacionais explicam essas diferenças?

Para responder a essa questão, técnicas estatísticas multivariadas têm sido empregadas como ferramentas capazes de avaliar simultaneamente múltiplas variáveis e identificar padrões não evidentes em abordagens convencionais. Entre

essas técnicas, destaca-se a Análise de Componentes Principais (PCA), utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e interpretar relações entre variáveis ambientais complexas (Chidiac *et al.*, 2023).

A avaliação integrada de diferentes matrizes hídricas representa uma estratégia importante para compreender a dinâmica em ambientes aquáticos de sistemas ambientais mais elaborados. Apesar dos avanços metodológicos observados nos últimos anos, ainda são limitados os estudos que integram simultaneamente diferentes matrizes, análise temporal e técnicas multivariadas em regiões amazônicas, marcadas por forte sazonalidade hidrológica e heterogeneidade de dados ambientais (Cecconello; Centeno; Guedes, 2018).

Em Canaã dos Carajás, município caracterizado por intensa atividade minerária, expansão urbana acelerada e elevada dependência de águas subterrâneas para abastecimento (Canaã dos Carajás, 2012), compreender a dinâmica integrada da qualidade da água torna-se particularmente relevante. Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma abordagem integrada baseada em análise estatística multivariada para avaliar a dinâmica temporal da qualidade da água em diferentes matrizes hídricas, visando identificar padrões de variabilidade, correlações entre parâmetros e processos associados às alterações observadas.

A relevância deste estudo está associada à limitada disponibilidade de investigações que avaliem simultaneamente diferentes matrizes hídricas sob uma perspectiva integrada de variabilidade temporal em ambientes amazônicos. A forte influência da sazonalidade hidrológica sobre os processos físicos, químicos e microbiológicos da água exige abordagens capazes de caracterizar comportamentos que não são facilmente observados por análises singulares. Nesse contexto, a aplicação conjunta de técnicas estatísticas multivariadas permite ampliar a compreensão dos fatores associados às alterações da qualidade da água, contribuindo para o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos locais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a qualidade da água em diferentes matrizes hídricas de Canaã dos Carajás - PA por meio de análise estatística multivariada, identificando padrões de variabilidade e fatores hidroambientais e operacionais associados.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar os parâmetros físico-químicos e microbiológicos das matrizes avaliadas.
- Analisar a variabilidade temporal dos parâmetros indicadores.
- Investigar correlações entre os parâmetros de qualidade da água.
- Aplicar Análise de Componentes Principais (PCA) para identificação de padrões e agrupamentos.
- Comparar o comportamento integrado das diferentes matrizes hídricas.
- Avaliar o desempenho do sistema de tratamento de efluentes.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Qualidade da água e parâmetros indicadores

A qualidade da água resulta da interação entre processos físicos, químicos e biológicos que controlam a composição dos sistemas hídricos, sendo influenciada tanto por condições naturais quanto por pressões antrópicas. A integridade dos sistemas hídricos depende da interação entre processos hidrológicos, geológicos e ecológicos, bem como das atividades humanas, como lançamento de efluentes, uso agrícola e expansão urbana (Tundisi; Tundisi, 2011).

A avaliação da qualidade da água é tradicionalmente realizada por meio da análise de parâmetros indicadores, os quais refletem diferentes características ambientais associadas à composição físico-química e microbiológica dos sistemas hídricos. Parâmetros como pH, turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e indicadores microbiológicos são amplamente utilizados para identificar alterações relacionadas à presença de matéria orgânica, sólidos suspensos, sais dissolvidos e contaminação microbiológica (Tripathi; Singal, 2019).

Assim a interpretação conjunta desses parâmetros permite compreender o comportamento ambiental das diferentes matrizes isoladas. Estudos recentes destacam que a análise conjunta de múltiplos parâmetros é essencial para compreender a dinâmica da qualidade da água em sistemas sujeitos a diferentes pressões ambientais (Begum *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023).

No contexto brasileiro, a avaliação da qualidade da água é orientada por normativas que estabelecem padrões para diferentes usos, como abastecimento humano e lançamento de efluentes. Essas diretrizes reforçam a importância do monitoramento contínuo e da interpretação adequada dos parâmetros indicadores, visando garantir a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública (ANA, 2020; Brasil, 2005; Brasil 2021).

Entre os fatores antrópicos que influenciam a qualidade da água, destaca-se a mineração, cuja expansão em regiões amazônicas tem promovido alterações no uso e cobertura do solo. Essas mudanças podem intensificar processos erosivos, aumentar o carreamento de sedimentos e modificar a dinâmica hidrológica das bacias, refletindo em parâmetros físicos e químicos da qualidade da água. Em Canaã dos

Carajás, esse cenário é particularmente relevante devido à intensa atividade mineral e às transformações territoriais observadas nas últimas décadas (Furtado *et al.*, 2023; Silva; Carneiro Junior; Costa, 2020). No entanto, a magnitude desses impactos varia conforme as características hidroambientais e os parâmetros monitorados, evidenciando a necessidade de avaliações integradas.

Dessa forma, a interpretação conjunta de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos possibilita uma avaliação mais consistente da qualidade da água, sobretudo em regiões influenciadas pela sazonalidade e pelas diferentes formas de uso e ocupação do solo, conforme observado por Santos e Henrique (2025) e Silva *et al.* (2024). Assim, abordagens integradas contribuem para um monitoramento mais representativo e fornecem subsídios mais robustos para a gestão dos recursos hídricos.

3.2. Índices de qualidade da água e limitações

A avaliação da qualidade da água por meio de índices sintéticos tem sido amplamente adotada como ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos devido à capacidade de integrar múltiplos parâmetros em um único valor representativo. Entre esses índices, destacam-se os Índices de Qualidade da Água (IQA), que combinam variáveis físico-químicas e microbiológicas a partir de pesos previamente definidos, facilitando a comunicação dos resultados e a tomada de decisão (Chidiac *et al.*, 2023; ANA, s.d.).

Os índices de qualidade da água desempenham papel relevante na gestão ambiental, sendo amplamente utilizados por órgãos reguladores para classificação, monitoramento e comunicação das condições dos corpos hídricos. Sua principal vantagem está na simplificação de dados complexos, permitindo interpretações rápidas e acessíveis, especialmente em contextos de tomada de decisão e divulgação para públicos leigos (Fortes *et al.*, 2023; Klamt *et al.*, 2021).

Embora amplamente utilizados para comunicação e classificação da qualidade da água, os índices sintéticos apresentam limitações relacionadas à utilização de pesos fixos, à seleção pré-definida de parâmetros e à agregação de múltiplas variáveis em um único valor numérico. Essas características podem reduzir a sensibilidade do índice a alterações específicas, mascarar condições críticas por

efeitos compensatórios entre variáveis e limitar a identificação dos processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pelas alterações observadas nos sistemas hídricos. Além disso, a simplificação das informações pode dificultar a interpretação da variabilidade espacial e temporal e a identificação de fontes de degradação ambiental (Kachroud *et al.*, 2019; EMBRAPA, 2020; Nunes; Queiroz, 2023; Fortes *et al.*, 2023).

Nesse contexto, diversos autores destacam que técnicas estatísticas multivariadas, como análise de correlação e Análise de Componentes Principais (PCA), não substituem os índices de qualidade da água, mas atuam como ferramentas complementares capazes de preservar as relações entre variáveis, identificar parâmetros dominantes e revelar padrões de variabilidade frequentemente ocultos por abordagens sintéticas. Essas técnicas têm sido cada vez mais empregadas em estudos que envolvem elevada heterogeneidade ambiental, múltiplas matrizes hídricas e forte influência da sazonalidade, proporcionando uma interpretação mais integrada dos fatores que controlam a qualidade da água (Chidiac *et al.*, 2023; Rocha *et al.*, 2016).

3.3. Contexto hidroclimático e hidrológico da área de estudo

A dinâmica da qualidade da água em regiões tropicais, especialmente na Amazônia, está fortemente associada ao regime hidrológico, caracterizado por períodos bem definidos de cheia e estiagem. Essas variações sazonais influenciam diretamente os processos de transporte de sedimentos, diluição de poluentes e disponibilidade de matéria orgânica, refletindo-se nos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água (Botelho; Morales; Pontes, 2025; Sales *et al.*, 2020).

Na região amazônica, o período chuvoso está associado ao aumento do escoamento superficial e ao carreamento de materiais particulados e substâncias dissolvidas, podendo resultar em elevação de parâmetros como turbidez e cor. Por outro lado, durante o período de estiagem, a redução da vazão pode favorecer a concentração de solutos e intensificar processos biogeoquímicos, influenciando parâmetros como condutividade elétrica e oxigênio dissolvido (Botelho; Morales; Pontes, 2025).

Além disso, estudos indicam que a variabilidade climática e as mudanças no uso e ocupação da terra podem potencializar essas alterações, tornando os sistemas hídricos mais suscetíveis a variações de qualidade ao longo do tempo (Vasconcelos; Lima; Filho, 2024). Em áreas com forte influência antrópica, como regiões de expansão urbana e atividades mineradoras, essas variações podem ser ainda mais acentuadas (Paula; Fontoura; Paiva, 2025).

Estudos realizados na Amazônia Oriental evidenciam a influência da sazonalidade sobre a qualidade da água. Em nascentes de Paragominas (PA), Nascimento *et al.* (2023) verificaram que o período chuvoso alterou parâmetros físico-químicos em decorrência do aumento do escoamento superficial e das mudanças no uso e ocupação da terra. Esses resultados corroboram a necessidade de considerar a sazonalidade na interpretação dos parâmetros monitorados em Canaã dos Carajás.

No contexto do estado do Pará, onde se insere o município de Canaã dos Carajás, a dependência de águas subterrâneas para diferentes formas de abastecimento reforça a necessidade de compreender a interação entre águas superficiais e aquíferos (Brito *et al.*, 2020; Nogueira; Gonçalves, 2021). Em Canaã dos Carajás, além da rede geral de distribuição, parte da população utiliza poços profundos/artesianos e poços rasos, freáticos ou cacimbas como formas de acesso à água, evidenciando a relevância dos mananciais subterrâneos no município (PARÁ, 2017).

Além das características hidroclimáticas, Canaã dos Carajás destaca-se pela intensa atividade mineradora, que tem impulsionado mudanças no uso e cobertura do solo, no crescimento urbano e na infraestrutura, alterando a dinâmica territorial do município (Furtado *et al.*, 2023). Segundo Silva, Carneiro Junior e Costa (2020), essas transformações influenciam processos hidrológicos e a ocupação das áreas de drenagem, constituindo importantes condicionantes para a gestão dos recursos hídricos. Embora este estudo não avalie diretamente os impactos da mineração sobre a qualidade da água, esse contexto contribui para a interpretação dos resultados obtidos.

Ademais as pressões antrópicas, os processos naturais de recarga desses sistemas aquíferos estão diretamente associada ao regime de precipitação e à dinâmica hidrológica regional. Assim, períodos chuvosos podem intensificar a

infiltração e o transporte de materiais dissolvidos ou particulados, enquanto períodos de estiagem tendem a reduzir a disponibilidade hídrica e favorecer a concentração de determinados constituintes na água. Dessa forma, a análise temporal dos parâmetros de qualidade torna-se fundamental para interpretar variações sazonais e possíveis alterações associadas à recarga, ao uso do solo e à vulnerabilidade dos aquíferos (Prado *et al.*, 2021; Santos; Henrique, 2025).

Além das características climáticas, Canaã dos Carajás apresenta intensa expansão urbana e atividade mineradora, responsáveis por alterações no uso e cobertura do solo. Furtado *et al.* (2023) apontam que esse processo modificou a paisagem do município, enquanto Silva, Carneiro Junior e Costa (2020) destacam seus efeitos sobre a ocupação do território e a gestão dos recursos hídricos. Embora este estudo não avalie diretamente os impactos da mineração, esse contexto é importante para interpretar a dinâmica hidroambiental da área de estudo.

Dessa forma, a interpretação da qualidade da água em regiões amazônicas requer a consideração conjunta das condições hidroclimáticas, da sazonalidade e das interações entre águas superficiais e subterrâneas.

3.4. Análise estatística multivariada aplicada à qualidade da água

A avaliação da qualidade da água envolve a análise simultânea de múltiplos parâmetros físico-químicos e microbiológicos, os quais apresentam interações complexas e variabilidade ao longo do tempo e do espaço. Portanto, técnicas estatísticas multivariadas têm sido amplamente empregadas como ferramentas eficazes para interpretação integrada de dados ambientais, favorecendo a compreensão da dinâmica, associações e estruturas internas nos sistemas hídricos (Muniz; Oliveira-Filho, 2023; Wang *et al.*, 2023).

A análise multivariada baseia-se na avaliação simultânea de múltiplas variáveis, permitindo investigar relações entre parâmetros, identificar agrupamentos e reconhecer padrões de comportamento dificilmente observados em análises univariadas. Em estudos de qualidade da água, essas abordagens possibilitam interpretar sistemas ambientais complexos caracterizados por elevada variabilidade espacial e temporal (Maia; Silva; Libânio, 2019; Rocha; Pereira, 2016).

Diferentemente das análises convencionais, que avaliam cada variável isoladamente, os métodos multivariados permitem explorar relações conjuntas entre os parâmetros, reduzindo redundâncias e ampliando a capacidade de interpretação ambiental. Essa característica torna-se especialmente relevante em estudos com grande volume de dados, nos quais a elevada complexidade pode dificultar a interpretação direta dos resultados (Chaves *et al.*, 2020).

Entre os principais benefícios dessas abordagens destacam-se a redução da dimensionalidade dos dados, a identificação de grupos de variáveis com comportamentos semelhantes e a distinção entre influências naturais e antrópicas. Dessa forma, torna-se possível não apenas descrever o estado do sistema, mas também inferir processos físicos, químicos e biológicos associados às variações observadas (Arantes; Hoffmann, 2021).

Além disso, técnicas multivariadas têm sido amplamente aplicadas na investigação de fontes de poluição, na análise de variabilidade temporal e na interpretação integrada de diferentes matrizes ambientais, incluindo águas superficiais, subterrâneas, potáveis e efluentes (Júnior *et al.*, 2021).

A aplicação de técnicas estatísticas multivariadas na avaliação da qualidade da água tem se ampliado por possibilitar a análise simultânea de múltiplos parâmetros ambientais. Na Região Metropolitana de Belém, Silva *et al.* (2024) demonstraram que essas técnicas favorecem a interpretação integrada da variabilidade espacial e temporal da qualidade da água. De forma convergente, Maia, Silva e Libânio (2019) destacam que as análises multivariadas auxiliam na otimização dos programas de monitoramento ao identificar as variáveis de maior influência sobre a qualidade da água.

3.5. Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada à qualidade da água

Além de sua fundamentação estatística, a Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis – PCA), tem sido amplamente empregada em estudos de qualidade da água. Em Belém (PA), Silva *et al.* (2024) demonstraram que a técnica foi eficiente para diferenciar águas superficiais e tratadas a partir dos parâmetros de maior influência. De forma semelhante, Carvalho *et al.* (2015) verificaram que a PCA

permitiu identificar agrupamentos hidroquímicos em águas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém, reforçando seu potencial para a interpretação integrada de sistemas hídricos.

A aplicação da PCA em estudos ambientais permite identificar variáveis que exercem maior influência na variabilidade do sistema, além de possibilitar o agrupamento de parâmetros com comportamentos semelhantes. Esses agrupamentos podem estar associados a processos físicos, químicos ou biológicos específicos, contribuindo para interpretação integrada da dinâmica da qualidade da água (Finkler *et al.*, 2016).

A PCA consiste em uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada para reduzir a dimensionalidade de conjuntos de dados complexos e identificar padrões de variabilidade entre variáveis ambientais. A técnica transforma um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em novas variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais, responsáveis por representar a maior parte da variabilidade total dos dados (Arantes; Hoffmann, 2021).

Os componentes principais são obtidos a partir da matriz de correlação das variáveis analisadas, sendo organizados em função da quantidade de variância explicada. Os autovalores representam a proporção da variabilidade total associada a cada componente principal, sendo utilizados como critério para seleção dos componentes mais representativos da estrutura dos dados (Arantes; Hoffmann, 2021).

A variância explicada corresponde à quantidade de informação representada pelos componentes selecionados, permitindo avaliar o grau de representação da estrutura original dos dados após a redução de dimensionalidade (Finkler *et al.*, 2016).

As cargas fatoriais indicam o grau de contribuição de cada variável para os componentes principais, possibilitando identificar os parâmetros mais influentes na variabilidade observada. Valores elevados de cargas fatoriais indicam forte associação entre a variável e o componente principal correspondente (Júnior *et al.*, 2021).

Júnior *et al.* (2021) retrata outro aspecto relevante da PCA que consiste na capacidade de evidenciar relações não aparentes entre variáveis ambientais, permitindo identificar agrupamentos de parâmetros associados a processos físicos,

químicos ou biológicos específicos. Em estudos de qualidade da água, essa abordagem tem sido amplamente utilizada na investigação de fontes de poluição, distinção entre influências naturais e antrópicas e interpretação integrada de diferentes matrizes ambientais.

Do ponto de vista metodológico, a aplicação da PCA requer padronização prévia dos dados, especialmente quando as variáveis apresentam diferentes escalas e unidades de medida. Sendo assim, a padronização por z-score transforma as variáveis para média zero e desvio padrão unitário, minimizando o efeito das diferentes magnitudes numéricas entre os parâmetros analisados (Arantes; Hoffmann, 2021).

A seleção dos componentes principais pode ser auxiliada por ferramentas gráficas como o scree plot, que representa os autovalores em ordem decrescente e permite identificar os componentes responsáveis pela maior parte da variabilidade dos dados (Arantes; Hoffmann, 2021; Hair *et al.*, 2009).

Os resultados da PCA são frequentemente representados graficamente por meio de biplots, que permitem visualizar simultaneamente a distribuição das amostras e a contribuição das variáveis nos componentes principais, facilitando a interpretação das associações observadas (Finkler *et al.*, 2016; Júnior *et al.*, 2021).

Dessa forma, a PCA se destaca como uma ferramenta robusta para interpretação integrada da qualidade da água, permitindo simplificar conjuntos de dados complexos e compreender os processos que influenciam a dinâmica dos sistemas hídricos (Júnior *et al.*, 2021).

Apesar de sua utilidade, a PCA deve ser interpretada considerando suas limitações. A técnica é sensível à escala das variáveis, à presença de valores extremos e ao tamanho amostral utilizado. Por essa razão, a padronização dos dados é etapa fundamental em estudos com parâmetros de unidades distintas. Além disso, quando aplicada a bases com número reduzido de observações, seus resultados devem ser entendidos como síntese exploratória dos padrões de variabilidade, e não como modelo estatístico de prognósticos ou generalização ampla (Hair *et al.*, 2009).

3.6. Variabilidade temporal da qualidade da água

A qualidade da água apresenta elevada variabilidade temporal em função da interação entre processos naturais e antrópicos que atuam continuamente nos sistemas hídricos. Fatores como precipitação, sazonalidade climática, uso e ocupação do solo e lançamento de efluentes influenciam diretamente o comportamento dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos ao longo do tempo (Souza; Milani; Júnior, 2025; Filgueiras *et al.*, 2025; Ma *et al.*, 2020).

A análise temporal dos dados de qualidade da água permite detectar similaridades sazonais, tendências de longo prazo e eventos pontuais associados a alterações ambientais ou operacionais. Em regiões tropicais caracterizadas por forte sazonalidade hidrológica, parâmetros como turbidez, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido podem apresentar variações significativas entre períodos secos e chuvosos, refletindo processos como escoamento superficial, diluição e transporte de material particulado (Prado *et al.*, 2021).

Além disso, a avaliação da variabilidade temporal contribui para a compreensão da estabilidade dos sistemas hídricos, permitindo identificar comportamentos recorrentes e possíveis anomalias ambientais. Essa abordagem torna-se particularmente relevante em estudos baseados em monitoramento contínuo, nos quais análises pontuais podem não representar adequadamente a dinâmica do sistema (Finkler *et al.*, 2016).

A integração da análise temporal com técnicas estatísticas multivariadas amplia a capacidade de interpretação dos dados, possibilitando relacionar variações observadas a processos específicos e identificar fatores dominantes associados à dinâmica da qualidade da água (Arantes; Hoffmann, 2021).

Para contemplar diferentes condições do regime hidroclimático regional, foram considerados períodos representativos da sazonalidade local, para representar as condições hidrológicas da região. Em Canaã observa-se a dinâmica em que o mês de junho representa o início da estiagem, agosto corresponde ao período de transição entre a estiagem e o período chuvoso, enquanto outubro caracteriza o início da estação chuvosa na região (Serviço Geológico do Brasil – SGB, 2023).

Estudos em ambientes amazônicos demonstram que a variabilidade da qualidade da água está fortemente relacionada ao regime pluviométrico. Em Paragominas (PA), Nascimento *et al.* (2023) observaram diferenças significativas

entre os períodos seco e chuvoso, especialmente na turbidez e em parâmetros físico-químicos. Esses achados corroboram a abordagem temporal adotada neste estudo para avaliar a dinâmica das diferentes matrizes hídricas.

3.7. Avaliação integrada de diferentes matrizes de água

Embora sejam frequentes estudos sobre águas superficiais, subterrâneas ou tratadas de forma isolada, ainda são escassas pesquisas que integrem diferentes matrizes hídricas, especialmente em municípios amazônicos. Nesse sentido, Silva *et al.* (2024) destacam que a avaliação conjunta desses sistemas amplia a compreensão dos fatores que influenciam a qualidade da água e fornece subsídios mais consistentes para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

A avaliação da qualidade da água em diferentes matrizes, como águas superficiais, subterrâneas, potáveis e efluentes, representa um desafio metodológico devido às diferenças físicas, químicas e operacionais associadas a cada sistema. Essas matrizes apresentam características distintas relacionadas às fontes de influência, aos processos de transformação e às condições de controle operacional (Ma *et al.*, 2020).

As águas superficiais estão diretamente expostas às condições ambientais e às atividades antrópicas, apresentando elevada variabilidade temporal e espacial. Em contraste, a água destinada ao abastecimento humano tende a apresentar maior estabilidade após os processos de tratamento e distribuição. Já os efluentes refletem diretamente a composição das cargas afluentes e o desempenho operacional dos sistemas de tratamento (Von Sperling, 2014).

Diante dessas diferenças, a análise comparativa entre matrizes não deve se basear exclusivamente em valores absolutos dos parâmetros, mas também na avaliação de seus comportamentos, relações e variabilidade ao longo do tempo. Diante disso, abordagens estatísticas multivariadas possibilitam avaliar simultaneamente múltiplos parâmetros e identificar padrões independentes das características específicas de cada matriz, como apresentado na Tabela 1 (Finkler *et al.*, 2016).

Tabela 1 - Características gerais e fatores de influência das diferentes matrizes hídricas avaliadas.

Matriz	Principais Influências	Variabilidade	Características
Superficial	Clima, uso do solo	Alta	Exposição direta
Subterrânea	Recarga, geologia	Moderada	Maior estabilidade
Potável	Tratamento/distribuição	Baixa	Controle operacional
Efluente	carga afluenta	Alta	Influência operacional

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Nesse sentido, a análise integrada dessas matrizes, associada à avaliação temporal dos parâmetros indicadores, contribui para uma compreensão mais abrangente dos processos que influenciam a qualidade da água em diferentes contextos (Maia; Silva; Libânio, 2019; Rocha; Pereira, 2016).

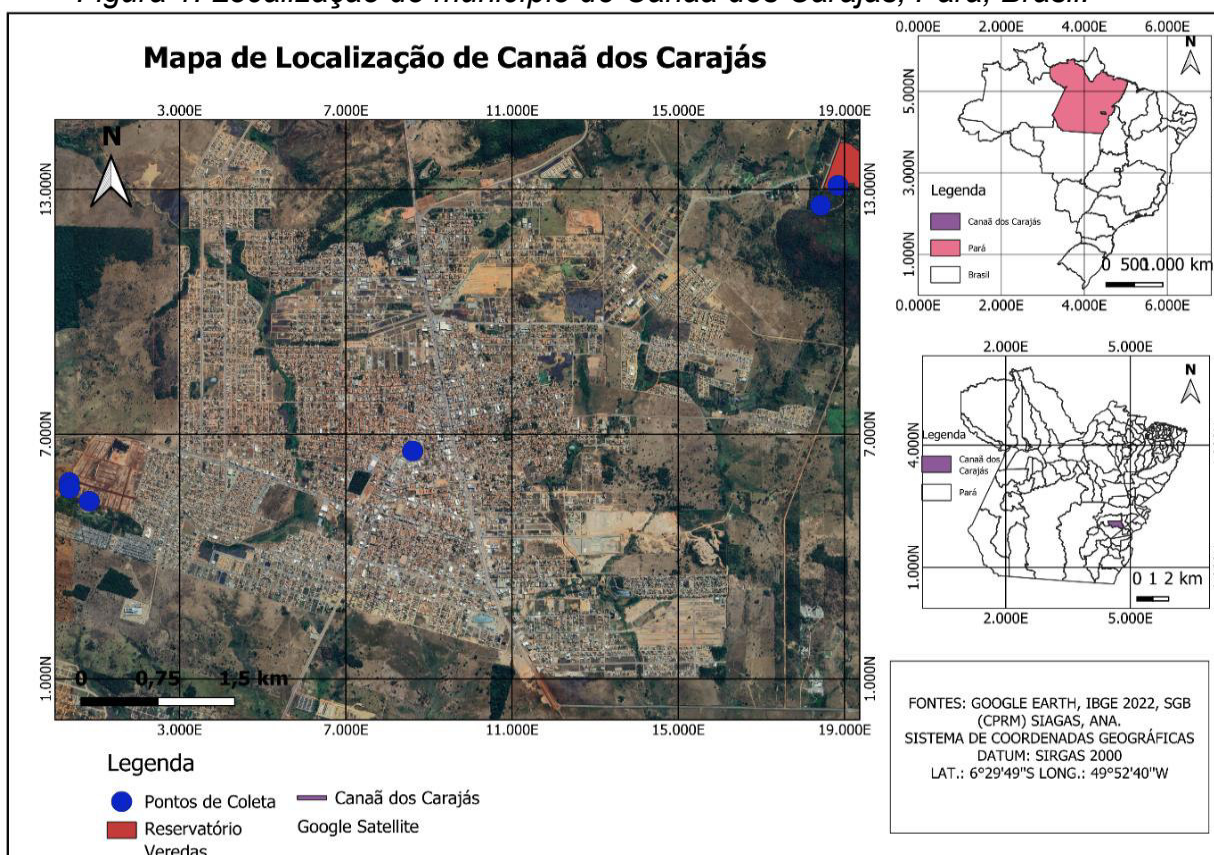
Além disso, a integração de diferentes matrizes em um mesmo estudo proporciona uma compreensão mais abrangente dos sistemas hídricos, permitindo identificar inter-relações entre fontes de água, processos de tratamento e impactos ambientais. Essa abordagem torna-se especialmente relevante em contextos de gestão de recursos hídricos e segurança hídrica (ANA, 2019).

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo e pontos amostrais

A área de estudo compreende o município de Canaã dos Carajás, localizado na região sudeste do estado do Pará, Brasil, aproximadamente nas coordenadas geográficas de 6°29'51" S e 49°52'42" W (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022) como demonstrado na Figura 1. A região apresenta clima tropical, com regime pluviométrico caracterizado por períodos bem definidos de estiagem e precipitação, exercendo influência direta sobre a dinâmica hidrológica e a variabilidade da qualidade da água na região (Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB – CPRM; ANA, s.d).

Figura 1: Localização do município de Canaã dos Carajás, Pará, Brasil.

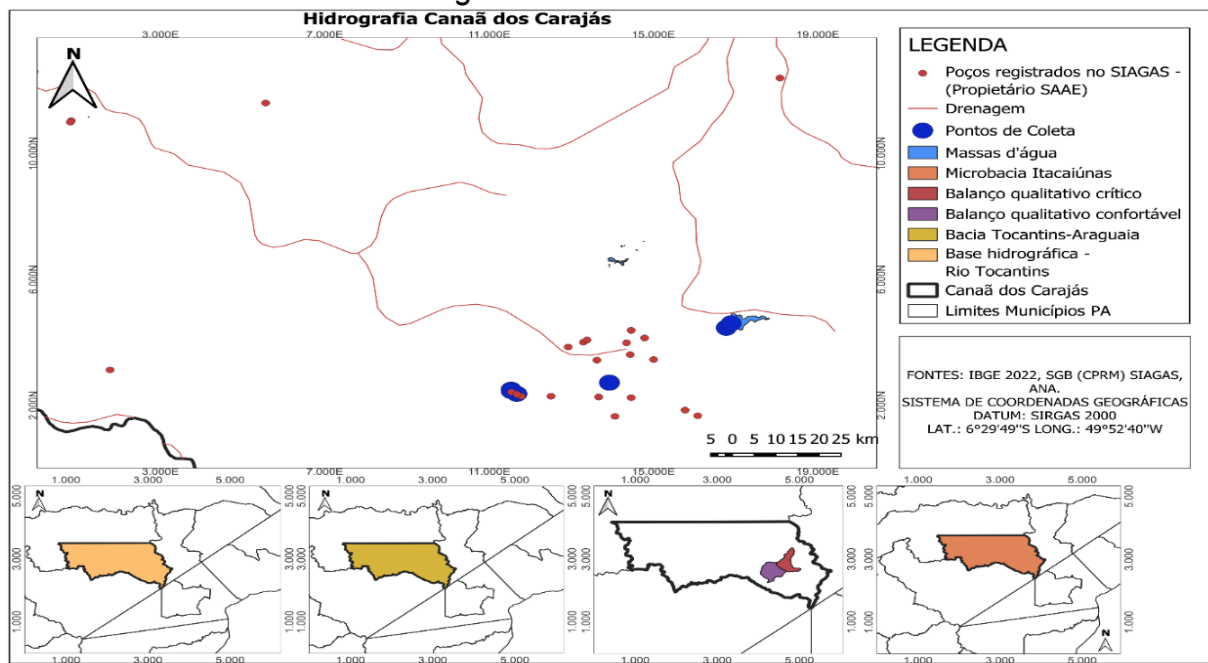


Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Do ponto de vista hidrográfico, o município está inserido na bacia do rio Tocantins, com contribuição para a sub-bacia do rio Itacaiúnas, conforme dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS (SGB-CPRM, 2024 - Figura 2). Essa configuração evidencia a inserção da área de estudo em um sistema

hidrográfico regional caracterizado por forte interação entre águas superficiais e subterrâneas, no qual as interações desempenham papel fundamental na dinâmica da qualidade da água.

Figura 2: Inserção hidrográfica do município de Canaã dos Carajás na bacia Tocantins-Araguaia e sub-bacia do rio Itacaiúnas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Além do sistema de abastecimento por água superficial, Canaã dos Carajás utiliza amplamente águas subterrâneas para o abastecimento público. Registros do SIAGAS indicam a existência de 26 poços cadastrados sob responsabilidade do SAAE, evidenciando a relevância dessa matriz no município. Nesse contexto, a inclusão da água subterrânea neste estudo amplia a representatividade da avaliação ao contemplar uma das principais fontes de abastecimento local.

Embora o SIAGAS registre diversos poços no município, foi selecionado apenas um ponto subterrâneo devido à disponibilidade contínua de dados laboratoriais e à compatibilidade entre os registros espaciais e operacionais. Assim, os resultados representam a matriz subterrânea monitorada pelo sistema público de abastecimento, sem a pretensão de representar todos os poços existentes em Canaã dos Carajás. A seleção da área considerou a relevância dos sistemas hídricos locais para o abastecimento, o uso urbano e a disposição/tratamento de efluentes.

Foram analisadas diferentes matrizes hídricas: água superficial, água potável, água subterrânea utilizada no sistema de abastecimento e efluente, conforme apresentado na Tabela 2. A matriz superficial foi representada pela Represa do Parque Veredas; a matriz potável foi representada por ponto na Estação de Tratamento de Água (ETA), poço e ponta de rede; e a matriz de efluente foi representada pelos pontos de entrada e saída da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), para a matriz de efluente, embora o município contasse com quatro ETEs, foi selecionada a unidade que apresentava série histórica compatível com os critérios metodológicos adotados.

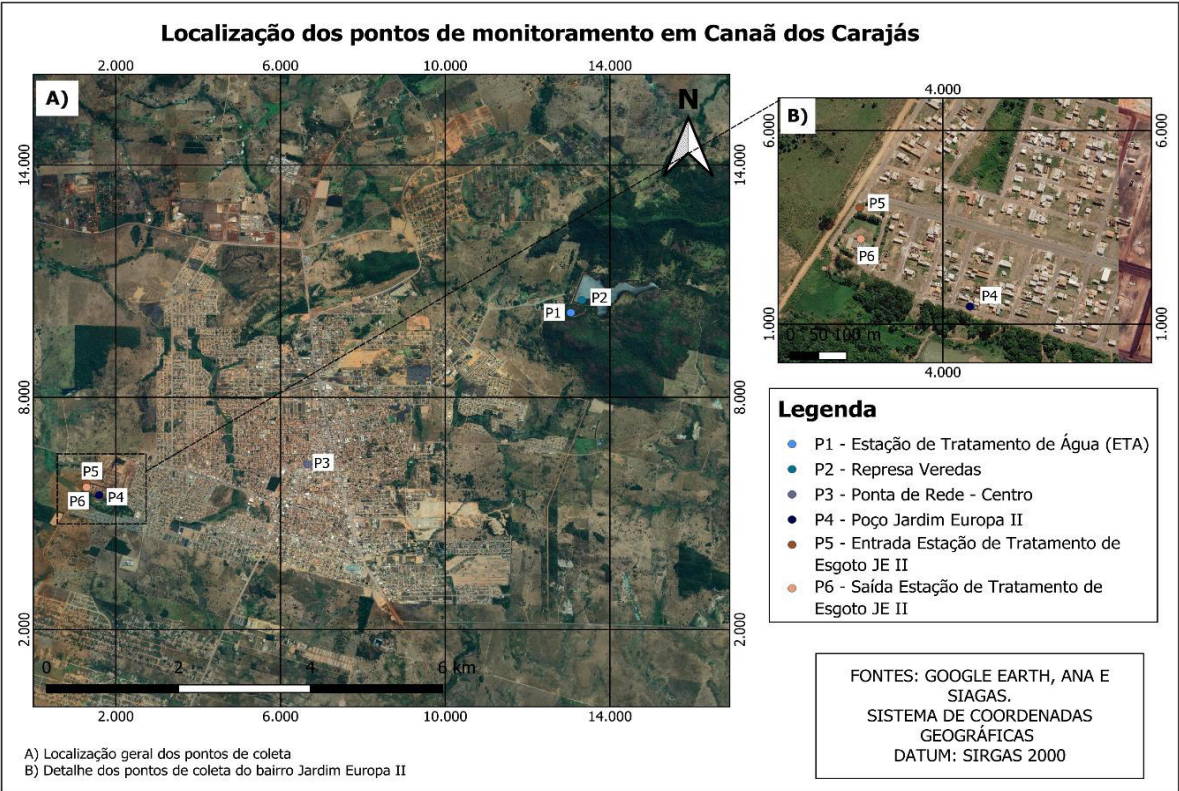
Tabela 2 - Descrição dos pontos amostrais e matrizes avaliadas no estudo.

Matriz	Ponto	Coordenadas
Superficial	Represa Veredas	Lat.: 6°30'35,5" S Long.: 49°49'03,8" O
Potável	ETA	Lat.: 6°30'47,2" S Long.: 49°49'06,3" O
Potável	Poço	Lat.: 6°32'22,9" S Long.: 49°52'59,3" O
Potável	Rede	Lat.: 6°32'06,8" S Long.: 49°51'15,7" O
Efluente	Entrada	Lat.: 6°32'17,3" S Long.: 49°53'05,5" O
Efluente	Saída	Lat.: 6°32'18,3" S Long.: 49°53'04,9" O

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A seleção dos pontos considerou três critérios principais: disponibilidade temporal dos dados, representatividade das matrizes analisadas e consistência das informações laboratoriais. No caso do ponto subterrâneo, foi realizada compatibilização com informações disponíveis no SIAGAS, devido à presença de diferentes registros de poços no município e à heterogeneidade de nomenclaturas nas bases consultadas. Assim, o ponto utilizado na análise não foi escolhido apenas pela existência de registro no banco de dados, mas pela maior coerência entre localização, disponibilidade de dados laboratoriais e correspondência espacial com o sistema avaliado, essa decisão metodológica foi adotada para reduzir o risco de associação indevida entre registros distintos e aumentar a rastreabilidade da seleção do ponto subterrâneo. A Figura 3 abaixo, demonstra os pontos selecionados no mapa.

Figura 3: Pontos amostrais por matrizes.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada, por subsidiar a compreensão da qualidade da água e a gestão ambiental. Quanto aos objetivos, caracteriza-se como descritiva e exploratória. Em relação aos procedimentos técnicos, trata-se de um estudo de caso, com abordagem predominantemente quantitativa, desenvolvido em Canaã dos Carajás (PA).

A Figura 4, representa a etapa metodológica desenvolvida neste estudo.

Figura 4: Etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Elaborado pela autora e aprimorada por inteligência artificial, 2026.

4.2. Base de dados e organização das informações

A base de dados foi composta por registros mensais dos anos de 2024 e 2025, de qualidade da água, organizados por matriz hídrica, ponto amostral, data de coleta e parâmetro analisado. Os dados analisados foram provenientes de monitoramentos realizados por um laboratório especializado e disponibilizados para fins acadêmicos. A autora participou de parte das atividades de amostragem e das análises laboratoriais vinculadas ao período informado (Figuras 5 e 6), possibilitando conhecimento direto dos procedimentos adotados para obtenção e controle da qualidade dos dados.

Figura 5: Coleta de amostras.



Fonte: Acervo da autora, 2026.

Legenda: A: Coleta de água superficial – Parque Veredas; B: Coleta de água potável – Poço Jardim Europa 2; C: Coleta de água potável – ETA; D: Coleta de água potável – Ponta de rede Centro; E: Coleta da entrada ETE – Jardim Europa 2 e F: Coleta da saída ETE – Jardim Europa 2.

Figura 6: Análises laboratoriais realizadas.



Fonte: Acervo da autora, 2026.

Legenda: A: Realização dos parâmetros em campo; B: Multiparâmetro utilizado em campo; C: Análises de Cor e Turbidez; D: Recepção das amostras – checagem de temperatura; E: Adição de substrato nas amostras microbiológicas; F: Amostras após incubação; G: Leitura das amostras microbiológicas em Câmara UV; H: Cápsula com peso inicial e I: Cápsula com peso final.

A organização inicial foi realizada por meio de planilhas, com posterior conferência dos resultados em programa estatístico PAST e integrado ao software RStudio para produção dos gráficos, visando garantir consistência entre os cálculos e as saídas gráficas/estatísticas. A base analítica consolidada compreendeu 1200 registros, distribuídos entre janeiro de 2024 e dezembro de 2025, contemplando os pontos de monitoramento e matrizes hídricas. A estrutura da base permitiu análises por matriz, por ponto amostral e por período, possibilitando tanto a avaliação estrutural, baseada em médias agregadas por ponto, quanto a avaliação temporal, baseada nos registros mensais ao longo do período monitorado.

Foram considerados parâmetros físico-químicos e microbiológicos com maior continuidade temporal, incluindo pH, turbidez, condutividade elétrica, cor, temperatura, oxigênio dissolvido, coliformes totais e *Escherichia coli*. Para a matriz de efluente, também foram considerados sólidos totais dissolvidos, devido à sua importância na avaliação da carga dissolvida e do desempenho do tratamento (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros utilizados e respectivas matrizes hídricas avaliadas.

Parâmetro	Unidade	Matriz	Frequência de monitoramento
pH	-	Todas	Mensal
Turbidez	UNT	Todas	Mensal
Condutividade elétrica	µS/cm	Todas	Mensal
OD	mg/L	Todas (exceto pontas de rede)	Mensal
Coliformes	NMP/100 mL	Todas	Mensal
Cor	UC	Todas	Mensal
Temperatura	°C	Todas	Mensal
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	Efluente	Mensal

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A Tabela 4 demonstra a aplicação para interpretação dos parâmetros neste estudo das matrizes selecionadas.

Tabela 4 - Parâmetros analisados e aplicação nas matrizes estudadas.

Grupo	Parâmetro	Superficial	Ponta de Rede (Potável)	ETA (Potável)	Subterrânea (Potável)	Efluente	Interpretação no estudo
Físico-químicos	pH	✓	✓	✓	✓	✓	Equilíbrio ácido-base
	Turbidez	✓	✓	✓	✓	✓	Presença de sólidos suspensos
	Condutividade elétrica	✓	✓	✓	✓	✓	Mineralização e íons dissolvidos
	Temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	Influência sobre processos físico-químicos e biológicos
	Cor	✓	✓	✓	✓	✓	Matéria orgânica e substâncias dissolvidas
	Oxigênio dissolvido (OD)	✓	—	✓	✓	✓	Dinâmica de oxigenação e degradação biológica
Microbiológicos	Coliformes totais	✓	✓	✓	✓	✓	Indicação de contaminação fecal
Complementar (efluente)	Sólidos totais dissolvidos (STD)	—	—	—	—	✓	Carga de substâncias dissolvidas

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4.3. Tratamento, padronização e critérios de consistência dos dados

Antes das análises estatísticas, os dados foram submetidos a procedimentos de verificação e tratamento. Foram avaliados registros ausentes, inconsistências de digitação, valores incompatíveis com a faixa esperada para cada parâmetro e diferenças de padronização entre as bases utilizadas.

Os parâmetros microbiológicos originalmente registrados de forma qualitativa, como ausência/presença, foram convertidos para escala binária, sendo adotado 0 para ausência e 1 para presença. Esse procedimento permitiu incorporar essas variáveis às análises estatísticas sem descaracterizar sua natureza indicativa. A não conversão desses dados impediria sua utilização em matrizes de correlação, boxplots padronizados e PCA, ou poderia gerar erros de leitura e distorções nos cálculos.

Essa conversão preserva a informação de ocorrência dos indicadores microbiológicos, permitindo sua incorporação às análises estatísticas. Entretanto, deve-se reconhecer que a escala binária não representa diferenças de magnitude da contaminação, pois registros positivos com intensidades distintas passam a receber o mesmo valor. Assim, os resultados associados a coliformes totais e *Escherichia coli* foram interpretados como ocorrência ou não ocorrência microbiológica, e não como quantificação absoluta da carga microbiana.

Para valores abaixo do limite de detecção analítica, adotou-se a substituição por LD/2 (metade do limite de detecção), procedimento frequentemente utilizado em estudos ambientais para minimizar perdas de informação e manter a comparabilidade estatística das séries de dados. Embora métodos mais robustos para tratamento de dados censurados sejam descritos na literatura, a substituição por LD/2 apresenta aplicação prática em conjuntos de dados com baixa proporção de valores não detectados e em análises exploratórias de caráter ambiental (Helsel, 2012).

Em razão das diferentes unidades de medida e escalas numéricas dos parâmetros, os dados foram padronizados por z-score, transformando as variáveis para média zero e desvio padrão unitário, procedimento recomendado para análises multivariadas envolvendo variáveis com diferentes escalas e unidades (Hair *et al.*, 2009). Esse procedimento foi necessário para evitar que variáveis com maior magnitude numérica, como condutividade elétrica e/ou turbidez, dominassem os

resultados da PCA em detrimento de parâmetros com menor escala, como pH ou indicadores microbiológicos binários.

4.4. Análises Estatísticas e multivariadas

4.4.1. Estatística descritiva e representação por boxplot

Inicialmente, foi aplicada estatística descritiva para caracterizar o comportamento geral dos parâmetros em cada matriz hídrica. Foram calculados média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, número de observações e coeficiente de variação.

Além das medidas descritivas, foram utilizados boxplots para representar a distribuição dos dados padronizados. O boxplot consiste em representação gráfica baseada em quartis e valores discrepantes, amplamente utilizada para avaliação da dispersão e distribuição dos dados (Sahoo *et al.*, 2019). Neste estudo, os boxplots foram utilizados para comparar o comportamento das matrizes hídricas após padronização por z-score, permitindo avaliar quais matrizes apresentaram maior estabilidade ou maior dispersão temporal dos parâmetros.

4.4.2. Teste de normalidade e escolha dos coeficientes de correlação

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se nível de significância de 5% (Gonzáles-Estrada; Villasenõr; Acosta-Pech, 2022). Como a maior parte dos parâmetros apresentou distribuição não normal, a matriz de correlação principal utilizada na discussão foi baseada no coeficiente de Spearman, adequado para relações monotônicas e dados não padronizados. A adoção de Spearman também se mostrou compatível com a presença de variáveis assimétricas, valores extremos e indicadores microbiológicos convertidos em escala binária (Moya, 2020).

Dessa forma, a interpretação do heatmap e das associações entre parâmetros foi fundamentada predominantemente nos coeficientes de Spearman. O heatmap permite representar visualmente a intensidade e o sentido das correlações entre variáveis por meio de escala de cores (Wilkinson; Friendly, 2009). Essa visualização facilita a identificação de grupos de parâmetros com comportamento semelhante ou oposto.

4.4.3. Análise de Componentes Principais (PCA): PCA estrutural e PCA temporal

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para sintetizar as variáveis analisadas, reduzindo a complexidade dos dados sem perda significativa de informação. A técnica transforma variáveis correlacionadas em um número menor de componentes principais, facilitando a identificação dos fatores que mais contribuem para a variabilidade entre as matrizes hídricas.

A Análise de Componentes Principais foi aplicada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e compreender os fatores predominantes de variabilidade entre os parâmetros analisados. A PCA foi conduzida com dados padronizados por z-score, evitando influência indevida das diferentes escalas de medição.

Foram realizadas duas abordagens complementares: PCA estrutural e PCA temporal.

A PCA estrutural foi aplicada à base agregada por ponto amostral, utilizando valores médios dos parâmetros em cada ponto. Essa abordagem teve como objetivo identificar diferenças globais entre as matrizes e reconhecer quais variáveis mais contribuíram para separar os sistemas avaliados, como efluente, água potável, poço e água superficial.

A PCA temporal foi aplicada à base organizada ao longo do tempo, considerando os registros mensais dos parâmetros. Essa abordagem teve como objetivo avaliar a variabilidade temporal, agrupamentos de meses ou períodos com comportamento semelhantes e variáveis associadas às oscilações sazonais ou operacionais.

Cada componente principal corresponde a uma combinação linear das variáveis originais e resume parte da informação do conjunto de dados. O primeiro componente principal (CP1) explica a maior parcela da variabilidade, enquanto os componentes seguintes representam proporções menores da variância e são independentes entre si. Assim, poucos componentes podem representar adequadamente um grande conjunto de variáveis ambientais.

A seleção dos componentes principais foi auxiliada pelo scree plot, para visualizar a contribuição de cada componente principal, permitindo identificar os componentes responsáveis pela maior parcela da variabilidade dos dados. A retenção dos componentes principais foi baseada na proporção da variância explicada e na interpretação conjunta dos autovalores e das cargas fatoriais, priorizando os componentes capazes de representar a maior parte da variabilidade dos dados e que apresentassem significado ambiental para a interpretação dos resultados.

Os loadings, ou cargas fatoriais, indicaram a contribuição de cada parâmetro para os componentes principais. As cargas fatoriais representam o grau de associação entre cada variável original e os componentes principais. Quanto maior o valor absoluto da carga fatorial, maior a contribuição da variável para a formação do componente, permitindo identificar quais parâmetros exercem maior influência na variabilidade observada.

Já os scores representaram a posição das amostras ou pontos no espaço multivariado, permitindo interpretar agrupamentos e separações entre matrizes ou períodos.

4.5. Avaliação da eficácia do sistema de tratamento de efluentes

A eficiência da Estação de Tratamento de Efluentes foi avaliada por meio da comparação entre os valores observados na entrada e na saída do sistema. Para os parâmetros cuja interpretação envolve redução de concentração ou ocorrência, como turbidez, cor, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, coliformes totais e *Escherichia coli*, foi calculada a eficiência percentual de remoção pela relação amplamente utilizada na avaliação de sistemas de tratamento de águas residuárias (Von Sperling, 2014):

$$Eficiência (\%) = \frac{C_{entrada} - C_{saída}}{C_{entrada}} \times 100$$

onde:

- $C_{entrada}$: corresponde à concentração do parâmetro no afluente;
- $C_{saída}$: corresponde à concentração do parâmetro no efluente tratado.

Para temperatura, pH e oxigênio dissolvido, o cálculo percentual de remoção não foi aplicado, uma vez que esses parâmetros não representam, necessariamente, variáveis que devem ser removidas do sistema. Nesses casos, a interpretação foi realizada por comparação direta entre entrada e saída, considerando estabilidade, alteração de faixa e melhoria das condições de oxigenação.

4.6. Avaliação integrada entre matrizes

A comparação integrada entre matrizes foi realizada a partir da associação entre estatística descritiva, boxplots, correlações, PCA e séries temporais. Essa etapa não teve como objetivo apenas comparar valores absolutos, mas interpretar o comportamento relativo das matrizes quanto à estabilidade, dispersão e associação entre parâmetros.

A água superficial foi interpretada como matriz mais sensível às condições ambientais e sazonais. A água potável foi avaliada em função da estabilidade esperada após tratamento e distribuição. O poço foi interpretado considerando sua relação com águas subterrâneas e possível influência da geologia, recarga e proteção natural do aquífero. O efluente foi avaliado considerando a variabilidade das cargas afluentes e o desempenho do tratamento entre entrada e saída.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Consistência da base integrada

A base integrada apresentou continuidade temporal suficiente para a aplicação das análises propostas, permitindo a avaliação conjunta de diferentes matrizes hídricas ao longo do período de monitoramento. Essa estrutura foi essencial para diferenciar dois níveis de interpretação: a análise estrutural, baseada na comparação média entre pontos e matrizes, e a análise temporal, voltada à identificação de oscilações mensais e possíveis influências sazonais ou operacionais.

A transformação dos dados microbiológicos qualitativos em escala binária possibilitou incorporar coliformes totais e *Escherichia coli* às análises estatísticas sem perda da interpretação sanitária. A presença desses indicadores passou a representar condição de ocorrência microbiológica, enquanto a ausência foi interpretada como não detecção no registro analisado.

A padronização por z-score foi essencial para as análises integradas, pois permitiu comparar parâmetros de unidades distintas em uma mesma escala estatística. Sem essa etapa, variáveis de maior magnitude numérica, como condutividade elétrica, cor, turbidez e sólidos dissolvidos, tenderiam a dominar os resultados da PCA e mascarar a contribuição de parâmetros como pH, oxigênio dissolvido e indicadores microbiológicos.

A integração das diferentes matrizes hídricas evidenciou amplitudes distintas de variação entre os parâmetros analisados, demonstrando a capacidade da base em representar condições ambientais e operacionais contrastantes. De modo geral, a matriz de efluente apresentou maior dispersão dos dados, indicando elevada variabilidade das características físico-químicas e microbiológicas, enquanto a água potável apresentou comportamento mais homogêneo, refletindo a estabilidade proporcionada pelos processos de tratamento e controle operacional. A água superficial apresentou variabilidade intermediária, compatível com a influência conjunta da sazonalidade e das pressões antrópicas na área de estudo.

Esses resultados evidenciam que a base de dados contemplou diferentes condições ambientais e operacionais, favorecendo a aplicação de análises multivariadas. Do ponto de vista do monitoramento, essa diversidade de respostas

permite identificar os parâmetros mais sensíveis às alterações de cada matriz, subsidiando estratégias mais eficientes de gestão da qualidade da água. Essa interpretação é consistente com Chidiac *et al.* (2023) e Maia, Silva e Libânio (2019), que destacam o potencial das análises multivariadas para integrar diferentes parâmetros e reconhecer padrões ambientais complexos.

5.2. Estatística descritiva e comportamento geral das matrizes

A estatística descritiva evidenciou contrastes expressivos entre as matrizes avaliadas. A entrada da ETE apresentou os maiores valores médios de condutividade elétrica (1275,7 $\mu\text{S/cm}$), cor (676,0 UC) e turbidez (153,1 UNT), caracterizando uma matriz com elevada carga dissolvida, particulada e orgânica. Após o tratamento, esses valores foram reduzidos para 944,3 $\mu\text{S/cm}$, 62,5 UC e 9,3 UNT, respectivamente, indicando maior eficiência do sistema na remoção de partículas e compostos associados à coloração do que na remoção de constituintes dissolvidos. Esse comportamento é ambientalmente coerente, pois processos de tratamento convencionais tendem a reduzir com maior facilidade frações suspensas e coloidais, enquanto sais e íons dissolvidos permanecem mais estáveis no efluente tratado. Os resultados obtidos corroboram os achados de Maia, Silva e Libânio (2019), que observaram maior eficiência das estações de tratamento na redução da turbidez e da cor em relação à condutividade elétrica. Da mesma forma, Silva *et al.* (2024) atribuem a permanência de parte dos sólidos dissolvidos às limitações dos processos convencionais de coagulação, floculação, decantação e filtração.

A matriz potável apresentou maior estabilidade geral, especialmente nos pontos ETA e poço, com baixos valores médios de turbidez e cor, o que demonstra a eficiência operacional do sistema de abastecimento durante o período monitorado. Entretanto, a ponta de rede apresentou maior coeficiente de variação para cor e turbidez, indicando a ocorrência de variações pontuais que podem estar associadas à dinâmica de distribuição, deposição, ressuspensão de partículas ou alterações hidráulicas locais, o resultado é compatível com estudos que associam o aumento da turbidez e da cor em redes de abastecimento à ressuspensão de depósitos, oscilações hidráulicas e ao tempo de permanência da água nas tubulações (Maia; Silva; Libânio, 2019). Esse comportamento reforça a importância do monitoramento contínuo desses

parâmetros, pois alterações na rede de distribuição podem comprometer a qualidade da água mesmo após o tratamento.

A matriz superficial apresentou comportamento intermediário, com turbidez média de 4,44 UNT e cor média de 28,88 UC, refletindo a maior exposição do corpo hídrico a processos ambientais, aporte superficial, variações hidrológicas e influência do entorno. Esse comportamento é consistente com estudos realizados na Amazônia, nos quais as águas superficiais apresentaram maior sensibilidade às variações hidrológicas e ao escoamento superficial no período chuvoso, com influência principalmente sobre parâmetros como turbidez, cor aparente e sólidos suspensos (Silva *et al.*, 2024; Santos e Henrique, 2025). Esses achados reforçam a necessidade de considerar a sazonalidade no monitoramento de águas superficiais, especialmente em regiões amazônicas sujeitas a intensas variações hidrológicas.

5.3. Interpretação dos boxplots

Os boxplots dos valores padronizados por z-score evidenciaram diferenças na variabilidade entre as matrizes hídricas (Figura 7). A distribuição dos valores padronizados dos parâmetros de qualidade da água nas matrizes superficial, subterrânea, potável e efluente permitiu comparar a dispersão relativa entre variáveis originalmente expressas em diferentes unidades de medida.

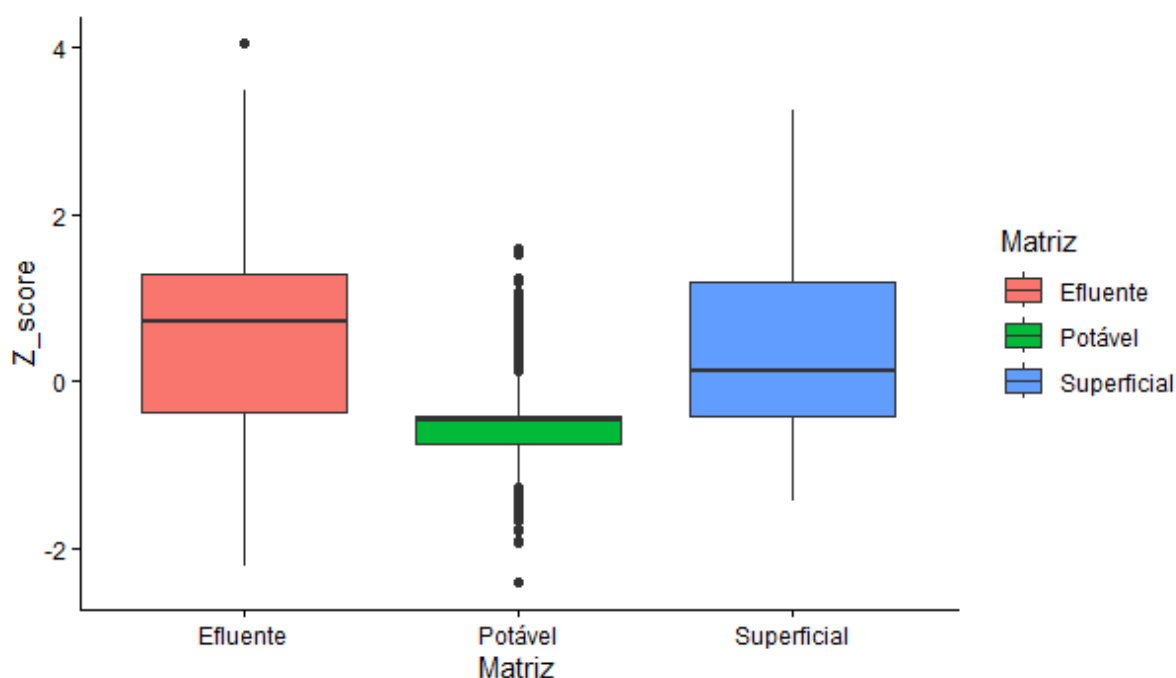
A matriz potável apresentou a menor dispersão, com desvio padrão z de 0,541, indicando maior estabilidade relativa dos parâmetros monitorados. Esse padrão é compatível com a existência de controle operacional, tratamento e menor exposição direta às oscilações ambientais. Esse comportamento indica que os processos de tratamento e distribuição foram capazes de reduzir a variabilidade natural dos parâmetros monitorados, tornando a água potável a matriz mais homogênea entre aquelas avaliadas.

A menor variabilidade observada na matriz subterrânea é compatível com os resultados de Carvalho *et al.* (2015), que identificaram maior estabilidade hidroquímica das águas subterrâneas em comparação às superficiais na Região Metropolitana de Belém, associando esse comportamento à proteção natural do meio aquífero. No presente estudo, esse padrão indica menor influência de processos hidrológicos de

curta duração, evidenciando maior estabilidade das características hidroquímicas ao longo do período monitorado.

A matriz superficial apresentou dispersão intermediária, com desvio padrão z de 0,953, refletindo influência de processos naturais, sazonalidade hidrológica e aporte de material particulado. O comportamento observado para a água superficial é compatível com estudos realizados na Amazônia Oriental. Em Paragominas (PA), Nascimento *et al.* (2023) verificaram que a sazonalidade influenciou significativamente a variabilidade dos parâmetros de qualidade da água, associando esse efeito ao aumento do escoamento superficial no período chuvoso. Esse padrão reforça que, no presente estudo, a matriz superficial apresentou maior sensibilidade às condições hidroclimáticas locais, respondendo mais rapidamente às alterações relacionadas ao transporte de sedimentos e material particulado.

Figura 7: Boxplot comparativo entre as matrizes no PAST e RStudio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A matriz potável apresentou menor amplitude interquartil, indicando maior concentração dos dados em torno da mediana e maior estabilidade do comportamento geral dos parâmetros monitorados. Entretanto, a presença de valores discrepantes demonstra a ocorrência de variações pontuais, possivelmente associadas a oscilações operacionais, eventos específicos na rede ou alterações em parâmetros

isolados. Em contraste, a matriz de efluente apresentou a maior variabilidade entre as avaliadas (desvio padrão $z = 1,175$), indicando elevada heterogeneidade das características físico-químicas e microbiológicas durante o período monitorado. Esse comportamento está associado à variação das cargas afluentes à estação de tratamento de esgoto, influenciada pelas contribuições domésticas, condições operacionais e eficiência dos processos de tratamento. A presença de valores extremos sugere a ocorrência de eventos pontuais com impacto significativo sobre determinados parâmetros.

Embora os boxplots evidenciem diferenças na dispersão e estabilidade das matrizes, essa análise não permite avaliar as relações entre os parâmetros. Dessa forma, a análise de correlação foi utilizada como etapa complementar para identificar associações entre variáveis, antecedendo a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), que permite interpretar os principais fatores ambientais e operacionais associados à variabilidade observada.

5.4. Normalidade e correlação entre parâmetros

O teste de Shapiro-Wilk indicou predominância de distribuições não normais entre os parâmetros avaliados. Por esse motivo, a matriz de correlação apresentada e discutida foi fundamentada no coeficiente de Spearman, mais adequado para dados ambientais com assimetria, valores extremos, relações monotônicas e variáveis microbiológicas convertidas para escala binária. Essa escolha reduziu o risco de interpretação inadequada das associações observadas, especialmente considerando a integração de matrizes com características distintas.

As correlações obtidas demonstram que a variabilidade da qualidade da água não ocorreu de forma aleatória, mas foi condicionada por conjuntos de parâmetros que responderam simultaneamente aos mesmos processos ambientais.

A associação extremamente forte entre cor e turbidez ($r_{st} = 0,925$) indica influência conjunta de partículas em suspensão e matéria orgânica. Observando a realidade de Canaã dos Carajás, esse comportamento pode estar relacionado à intensa mobilização de sedimentos promovida pelo escoamento superficial durante o período chuvoso, processo potencialmente intensificado pelas alterações do uso e

ocupação da terra associadas à expansão urbana e às atividades mineradoras presentes na região. Embora o presente estudo não tenha sido desenvolvido para identificar fontes específicas de contribuição, os resultados sugerem que os processos de transporte de material particulado desempenham papel relevante na dinâmica da qualidade da água local.

A correlação entre cor e turbidez também foi observada por Silva *et al.* (2020) em corpos hídricos da Amazônia, sendo associada ao aumento do escoamento superficial e ao transporte de sedimentos e matéria orgânica durante o período chuvoso. Essa concordância indica que o comportamento observado em Canaã dos Carajás está relacionado à dinâmica hidroambiental característica de regiões amazônicas.

Os indicadores microbiológicos também apresentaram associações expressivas, destacando-se a correlação entre coliformes totais e *Escherichia coli* ($r_{st} = 0,850$). Esse resultado demonstra consistência entre os indicadores utilizados e sugere que ambos responderam de forma semelhante às condições ambientais observadas durante o monitoramento. Além disso, as correlações positivas entre *E. coli* e turbidez ($r_{st} = 0,705$), *E. coli* e cor ($r_{st} = 0,684$) e coliformes totais e turbidez ($r_{st} = 0,656$) evidenciam que episódios de maior ocorrência microbiológica estiveram associados ao aumento da carga particulada e da matéria orgânica presente na água.

Esse padrão é particularmente relevante porque indica que os processos responsáveis pela alteração das características físicas da água também influenciaram a ocorrência microbiológica observada nas diferentes matrizes. Assim, os resultados sugerem que partículas suspensas e matéria orgânica não atuaram apenas como indicadores de alteração da qualidade da água, mas constituíram elementos associados à dinâmica de transporte e persistência microbiológica no sistema monitorado.

As correlações negativas observadas entre oxigênio dissolvido e variáveis como condutividade elétrica ($r_{st} = -0,351$), cor ($r_{st} = -0,303$) e turbidez ($r_{st} = -0,276$) indicam tendência de redução das condições de oxigenação em cenários caracterizados por maior carga dissolvida ou particulada. Embora esses coeficientes apresentem magnitude moderada, o comportamento observado é ambientalmente coerente, uma vez que o aumento de matéria orgânica e sólidos em suspensão pode

favorecer processos de consumo biológico de oxigênio. Dessa forma, a matriz de correlação evidencia que a qualidade da água foi influenciada pela interação entre processos físicos, químicos e microbiológicos, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada para interpretação dos resultados.

Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et al.* (2024), que associaram a redução do oxigênio dissolvido ao aumento da matéria orgânica e da carga particulada em ambientes aquáticos sujeitos à influência antrópica.

Embora a matriz de correlação permita identificar a magnitude das associações entre os parâmetros, a interpretação conjunta dessas relações torna-se mais evidente por meio de representações gráficas, como o heatmap. As associações identificadas indicam que parte significativa da variabilidade observada na qualidade da água esteve concentrada em grupos de variáveis que responderam conjuntamente aos mesmos processos ambientais. Entretanto, a interpretação isolada dos coeficientes dificulta a visualização da estrutura global dessas relações. Nesse contexto, o heatmap permite avaliar simultaneamente a intensidade e o padrão das associações, facilitando a identificação de agrupamentos de variáveis e possíveis gradientes de qualidade da água.

5.5. Heatmap de correlação estrutural

O heatmap estrutural (Figura 8) permitiu avaliar as associações entre os parâmetros considerando as diferenças médias observadas entre os pontos e matrizes monitorados. Diferentemente da matriz de correlação, que apresenta coeficientes individualmente, o heatmap facilita a identificação visual de agrupamentos associados a processos ambientais comuns.

O padrão estrutural mais evidente foi observado entre cor e turbidez ($r_s = 1,000$), indicando que as diferenças entre as matrizes foram fortemente influenciadas pela presença simultânea de partículas em suspensão e compostos responsáveis pela coloração da água. Esse comportamento evidencia que os ambientes mais impactados apresentaram aumento conjunto desses parâmetros.

Os indicadores microbiológicos apresentaram forte associação entre si ($r_s = 0,955$) e com variáveis físicas como cor e turbidez, sugerindo que os ambientes com maior carga particulada também concentraram maior ocorrência microbiológica.

O oxigênio dissolvido apresentou correlações negativas expressivas com condutividade elétrica ($r_s = -1,000$), cor ($r_s = -0,700$) e turbidez ($r_s = -0,700$), indicando que as matrizes caracterizadas por maiores concentrações de substâncias dissolvidas e particuladas tenderam a apresentar menores concentrações de oxigênio dissolvido.

Os resultados do heatmap demonstraram a existência de grupos de variáveis fortemente correlacionadas, sugerindo a atuação de processos ambientais comuns. Esse padrão indica que os processos de transporte de sedimentos e de aporte de matéria orgânica exerceram papel importante na diferenciação entre as matrizes avaliadas.

Resultados semelhantes foram descritos por Chidiac *et al.* (2023), que identificaram agrupamentos de variáveis associados ao transporte de sedimentos e à influência antrópica em estudos de qualidade da água com técnicas multivariadas. Na Amazônia, Santos e Henrique (2025) também observaram associação entre turbidez, cor e indicadores microbiológicos, relacionando esse comportamento ao aumento do escoamento superficial no período chuvoso.

Entretanto, embora a análise de correlação permita identificar associações entre pares de variáveis, ela não quantifica a contribuição conjunta desses parâmetros para a variabilidade global dos dados. Dessa forma, a PCA estrutural foi empregada para avaliar a importância relativa dos gradientes identificados na diferenciação entre as matrizes monitoradas.

Figura 8: Heatmap da matriz de correlação estrutural.

	Coliformes Totais	Condutividade	Cor	Escherichia coli	Oxigênio Dissolvido	Temperatura	Turbidez	pH
Coliformes Totais		0.406	0.841	0.955	-0.400	0.116	0.841	0.812
Condutividade	0.406		0.486	0.334	-1.000	-0.543	0.486	0.200
Cor	0.841	0.486		0.880	-0.700	0.257	1.000	0.886
Escherichia coli	0.955	0.334	0.880		-0.359	0.273	0.880	0.941
Oxigênio Dissolvido	-0.400	-1.000	-0.700	-0.359		0.500	-0.700	-0.300
Temperatura	0.116	-0.543	0.257	0.273	0.500		0.257	0.429
Turbidez	0.841	0.486	1.000	0.880	-0.700	0.257		0.886
pH	0.812	0.200	0.886	0.941	-0.300	0.429	0.886	

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Legenda:

Faixa de rs	Interpretação	Cor
0,70 a 1,00	Correlação positiva forte	Verde escuro
0,50 a 0,69	Correlação positiva moderada	Verde claro
-0,49 a 0,49	Correlação fraca ou ausente	Amarelo

Faixa de rs	Interpretação	Cor
-0,69 a -0,50	Correlação negativa moderada	Laranja
-1,00 a -0,70	Correlação negativa forte	Vermelho

5.6. PCA estrutural

A PCA estrutural foi empregada para investigar se as diferenças observadas entre os pontos amostrais poderiam ser explicadas por padrões multivariados consistentes, considerando simultaneamente todos os parâmetros monitorados. Inicialmente, foi avaliada a variância explicada por cada componente e, em seguida, as cargas fatoriais, permitindo identificar as variáveis com maior contribuição para cada eixo.

Na interpretação dos resultados, inicialmente foi analisada a variância explicada pelos componentes principais e, posteriormente, as cargas fatoriais, permitindo identificar as variáveis responsáveis pela formação de cada componente.

A Tabela 5 demonstra a variabilidade total dos dados dos componentes principais da PCA estrutural.

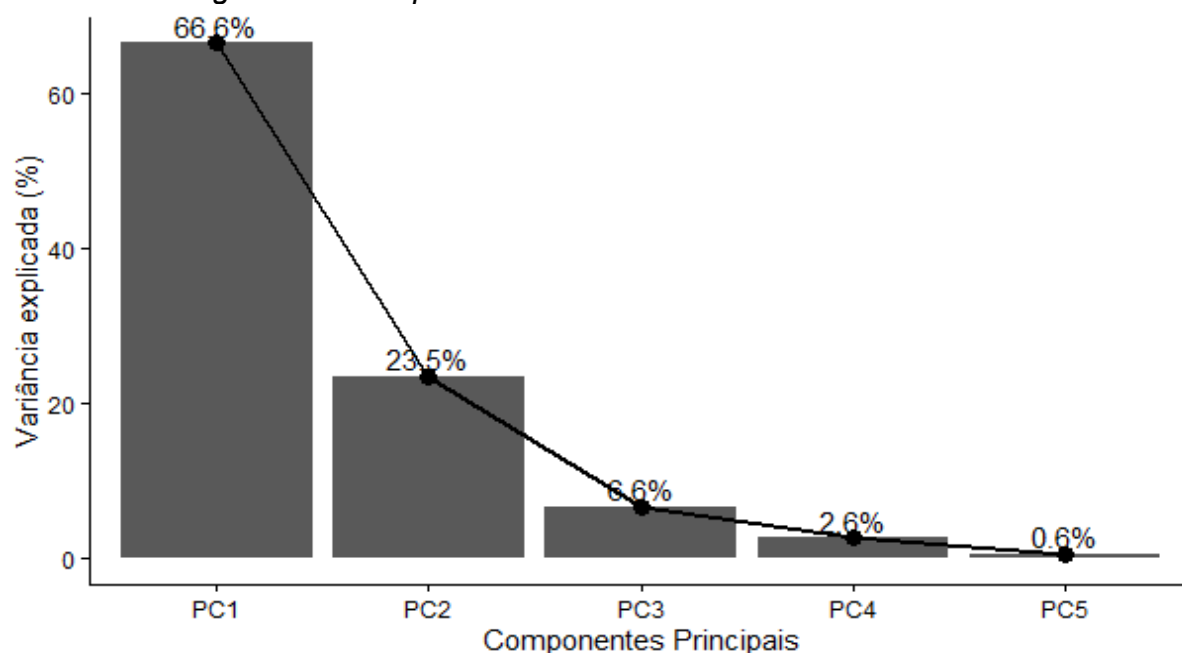
Tabela 5 - Variância explicada pela Análise de Componentes Principais.

Componente	Autovalor	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
PC1	5.32705	66.588	66.588
PC2	1.88332	23.541	90.129
PC3	0.531823	6.648	96.777
PC4	0.211776	2.647	99.424
PC5	0.0460284	0.575	99.999

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O resultado obtido demonstra que a variabilidade estrutural dos dados foi explicada principalmente pelos dois primeiros componentes principais, que conjuntamente representaram 90,13% da variância total observada (Figura 9). Esse percentual indica elevada capacidade de síntese da PCA, permitindo interpretar a maior parte dos padrões estruturais dos dados a partir de dois gradientes ambientais principais.

Figura 9: Scree plot da PCA estrutural no PAST e RStudio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O primeiro componente (PC1), responsável por 66,59% da variância, isso significa que aproximadamente dois terços das diferenças observadas entre as amostras pode ser resumida por esse único componente, evidenciando sua importância para a interpretação do comportamento das matrizes hídricas. Apresentou ainda, cargas fatoriais (Tabela 6) positivas para cor (0,408), turbidez (0,405), *Escherichia coli* (0,389), pH (0,371), coliformes totais (0,362) e condutividade (0,341), além de associação negativa com o oxigênio dissolvido (-0,342). As variáveis associadas ao PC1 caracterizam um gradiente relacionado ao aumento da carga particulada, matéria orgânica e contaminação microbiológica, acompanhado pela redução do oxigênio dissolvido. Esse componente pode ser interpretado como um indicador de alteração da qualidade da água, refletindo a atuação conjunta de processos naturais, como o transporte de sedimentos no período chuvoso, e pressões antrópicas relacionadas ao uso e ocupação do solo.

Comportamento semelhante foi descrito por Chidiac *et al.* (2023), que identificaram agrupamentos envolvendo turbidez, cor e indicadores microbiológicos associados à influência antrópica em sistemas aquáticos. Na Amazônia, Nascimento *et al.* (2023) também relacionaram a associação entre essas variáveis ao transporte de sedimentos e matéria orgânica intensificado durante o período chuvoso, corroborando a interpretação do PC1 neste estudo.

O segundo componente (PC2), responsável por 23,54% da variância, complementou a interpretação dos resultados ao representar um gradiente associado às condições físico-químicas naturais da água, sendo influenciado principalmente pela temperatura (0,587), seguida pelo oxigênio dissolvido (0,415) e pH (0,369), Diferentemente do PC1, esse componente não esteve diretamente relacionado ao aumento da carga particulada ou da contaminação microbiológica, indicando variações ligadas ao equilíbrio dos processos hidrológicos e bioquímicos.

Essa interpretação é compatível com Maia, Silva e Libânio (2019), que identificaram componentes associados às condições naturais dos sistemas aquáticos, representados principalmente por temperatura, pH e oxigênio dissolvido.

Tabela 6 - Cargas fatoriais (loadings) das variáveis nos cinco primeiros componentes principais.

Parâmetro	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Coliformes Totais	0.362	0.281	-0.514	0.232	-0.037
Condutividade	0.341	-0.316	0.338	0.788	0.165
Cor	0.408	-0.208	0.024	-0.340	0.365
Escherichia coli	0.389	0.281	-0.278	0.105	0.101
Oxigênio Dissolvido	-0.342	0.415	-0.207	0.185	0.681
Temperatura	0.124	0.587	0.707	-0.094	0.128
Turbidez	0.405	-0.213	0.010	-0.390	0.379
pH	0.37087	0.36942	0.018822	-0.05768	-0.45169

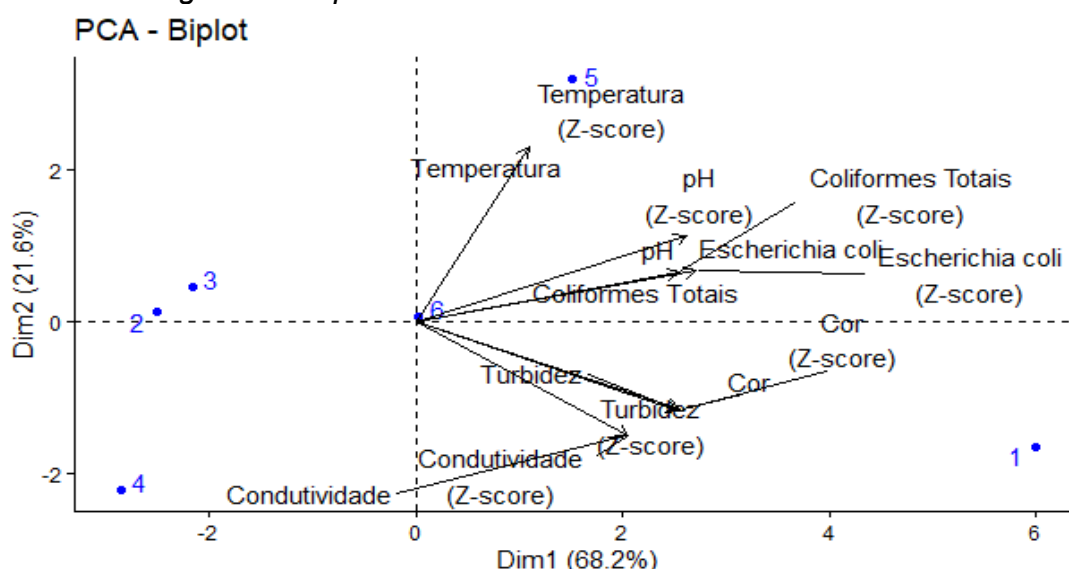
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Os resultados da PCA estrutural corroboram os padrões identificados anteriormente no heatmap de correlação, demonstrando que os agrupamentos identificados não representam associações ocasionais entre pares de variáveis, mas refletem processos ambientais consistentes que atuaram simultaneamente sobre

diferentes parâmetros de qualidade da água. Essa convergência fortalece a interpretação dos componentes principais e aumenta a robustez das inferências obtidas a partir da análise multivariada.

A distribuição das matrizes no biplot (Figura 10) evidencia a existência de padrões distintos de qualidade da água entre os ambientes monitorados. A separação observada entre os pontos indica que as diferenças estruturais não foram determinadas por uma única variável, mas pelo comportamento conjunto dos parâmetros associados ao PC1, especialmente cor, turbidez e indicadores microbiológicos, em oposição ao oxigênio dissolvido. A água potável permaneceu associada a condições de maior estabilidade operacional, os pontos relacionados ao sistema de tratamento de esgoto concentraram-se na direção das variáveis associadas ao PC1, indicando maior influência da carga orgânica e microbiológica. A posição intermediária ocupada pela represa sugere comportamento de transição entre condições predominantemente naturais e influências decorrentes das atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica.

Figura 10: Biplot da PCA estrutural no PAST e RStudio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

De forma integrada, a PCA estrutural demonstrou que a diferenciação entre as matrizes hídricas foi controlada principalmente por dois processos distintos. O primeiro corresponde ao gradiente associado ao aumento da carga particulada, matéria orgânica e indicadores microbiológicos, representando o principal fator de diferenciação entre os ambientes monitorados. O segundo reflete variações nas

características físico-químicas naturais da água, relacionadas principalmente à temperatura, ao pH e ao oxigênio dissolvido. Assim, a análise multivariada permitiu sintetizar a estrutura dos dados e evidenciar que a qualidade da água em Canaã dos Carajás resulta da interação entre fatores naturais e operacionais, os quais atuam de forma integrada sobre as diferentes matrizes hídricas avaliadas.

5.7. Heatmap de correlação temporal

Enquanto o heatmap estrutural evidenciou as associações entre os parâmetros considerando as características próprias das diferentes matrizes monitoradas, permitindo verificar associações relacionados à origem da água e aos processos de tratamento, o heatmap temporal (Figura 11) destacou a influência da variabilidade sazonal e das condições hidrológicas sobre essas relações, evidenciando como os parâmetros responderam conjuntamente às mudanças ocorridas ao longo do período de monitoramento. Ressalta-se que esses agrupamentos foram definidos de forma exploratória, com base na magnitude e no sentido dos coeficientes de Spearman, não correspondendo a agrupamentos estatísticos formais.

O primeiro padrão identificado foi formado por cor e turbidez, que apresentaram a associação positiva mais intensa da matriz ($r_s = 0,925$). A proximidade visual dessas variáveis no heatmap evidencia que ambas responderam praticamente ao mesmo processo ambiental ao longo do monitoramento. Esse comportamento indica que grande parte da variabilidade observada na qualidade da água esteve associada à presença de partículas em suspensão e substâncias responsáveis pela coloração, sugerindo influência de processos de transporte de material particulado e matéria orgânica.

Esse comportamento é consistente com estudos realizados na Amazônia, nos quais a turbidez e a cor aumentaram simultaneamente durante períodos de maior precipitação em decorrência do incremento do escoamento superficial e do transporte de sedimentos para os corpos hídricos (Nascimento *et al.*, 2023).

O segundo padrão foi constituído pelos indicadores microbiológicos e suas associações com cor e turbidez. A disposição dessas variáveis no heatmap demonstra que a ocorrência microbiológica esteve integrada ao mesmo conjunto de processos que influenciaram as características físicas da água. Esse resultado sugere que

alterações microbiológicas não ocorreram de forma independente, mas estiveram associadas a condições caracterizadas por maior presença de partículas e compostos orgânicos, reforçando a interpretação de que os mecanismos de transporte de materiais no sistema também influenciaram a dinâmica microbiológica observada.

A associação entre os indicadores microbiológicos e os parâmetros físicos sugere que maiores concentrações de coliformes e *Escherichia coli* ocorreram em condições favoráveis ao transporte de partículas e matéria orgânica, evidenciando a influência dos processos hidrológicos sobre a qualidade microbiológica da água. Resultados semelhantes foram observados por Chidiac *et al.* (2023), que identificaram agrupamentos entre turbidez, matéria orgânica e indicadores microbiológicos em análises multivariadas da qualidade da água.

O terceiro padrão correspondeu às correlações negativas observadas entre oxigênio dissolvido e parâmetros relacionados à carga dissolvida e particulada. Embora os coeficientes tenham apresentado menor magnitude, a distribuição observada no heatmap evidencia uma tendência consistente de comportamento oposto entre essas variáveis. Esse resultado sugere que ambientes com maiores concentrações de partículas e substâncias dissolvidas tenderam a apresentar menores concentrações de oxigênio dissolvido, comportamento compatível com processos de consumo biológico de oxigênio e aumento da demanda associada à presença de matéria orgânica.

Esse comportamento também foi observado por Maia, Silva e Libânio (2019), que associaram reduções do oxigênio dissolvido ao aumento da carga orgânica e da concentração de sólidos em sistemas aquáticos monitorados.

De forma integrada, o heatmap temporal evidenciou que as variáveis responderam de maneira conjunta às oscilações por grupos de variáveis aos processos hidrológicos e ambientais observadas ao longo do período de monitoramento. Entretanto, embora essa ferramenta permita visualizar os agrupamentos existentes, ela não quantifica a contribuição relativa de cada conjunto de variáveis para a variabilidade temporal. Diante desse comportamento integrado, a PCA temporal foi aplicada para identificar quais desses gradientes exerceram maior influência sobre a variabilidade observada ao longo do tempo.

Figura 11: Heatmap da matriz de correlação temporal.

	Coliformes Totais	Condutividade	Cor	Escherichia coli	Oxigênio Dissolvido	Temperatura	Turbidez	pH
Coliformes Totais		0.127	0.624	0.850	-0.129	0.087	0.652	0.596
Condutividade	0.127		0.482	0.177	-0.360	-0.159	0.431	0.114
Cor	0.624	0.482		0.680	-0.308	0.188	0.925	0.583
Escherichia coli	0.850	0.177	0.680		-0.138	0.181	0.703	0.623
Oxigênio Dissolvido	-0.129	-0.360	-0.308	-0.138		0.435	-0.279	-0.008
Temperatura	0.087	-0.159	0.188	0.181	0.435		0.176	0.485
Turbidez	0.652	0.431	0.925	0.703	-0.279	0.176		0.602
pH	0.596	0.114	0.583	0.623	-0.008	0.485	0.602	

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Legenda:

Faixa de rs	Interpretação	Cor
0,70 a 1,00	Correlação positiva forte	Verde escuro
0,50 a 0,69	Correlação positiva moderada	Verde claro
-0,49 a 0,49	Correlação fraca ou ausente	Amarelo

Faixa de rs	Interpretação	Cor
-0,69 a -0,50	Correlação negativa moderada	Laranja
-1,00 a -0,70	Correlação negativa forte	Vermelho

5.8. PCA temporal

A PCA temporal resultou em componentes capazes de representar grande parte da variabilidade observada ao longo dos 24 meses de monitoramento. Os dois primeiros componentes principais explicaram conjuntamente 71,15% da variância total dos dados (Tabela 7), indicando que a maior parte da informação presente no conjunto original pode ser representada em um espaço bidimensional sem perda significativa de informação.

Esse percentual evidencia a capacidade da técnica em sintetizar os padrões temporais de qualidade da água, permitindo a identificação dos principais gradientes responsáveis pela variabilidade observada ao longo do monitoramento.

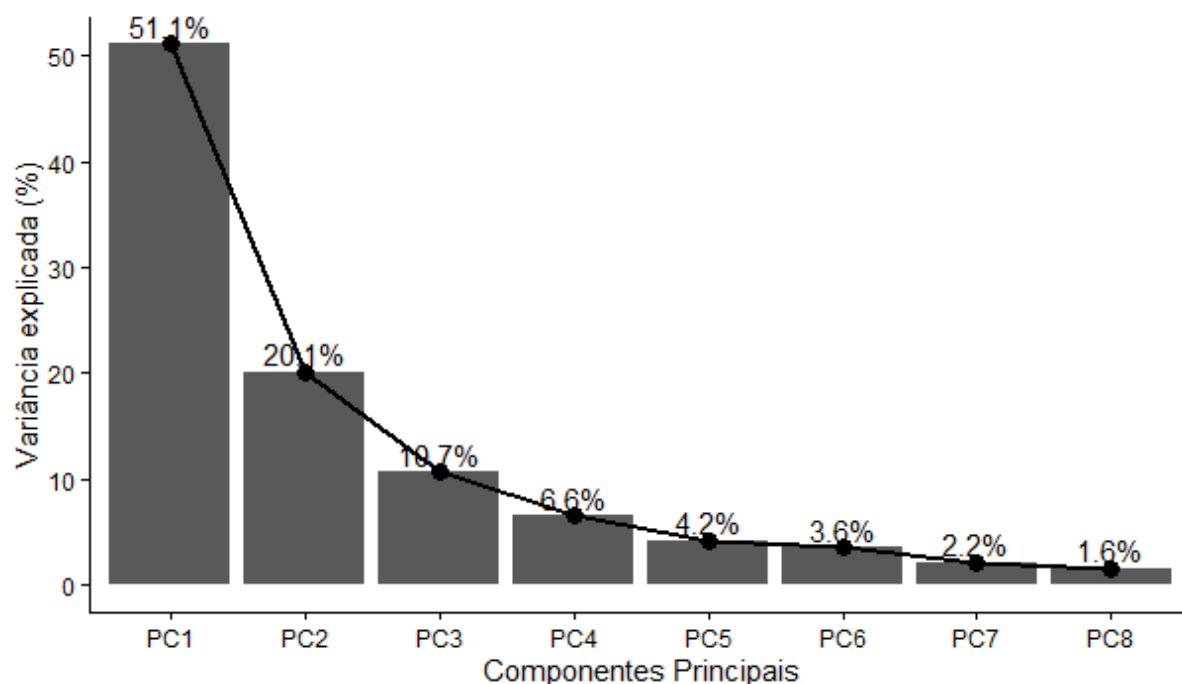
Tabela 7 - Variância explicada da PCA temporal.

Componente	Autovalor	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
PC1	4.08407	51.051	51.051
PC2	1.60834	20.104	71.155
PC3	0.855387	10.692	81.847
PC4	0.52475	6.559	88.406
PC5	0.338541	4.232	92.638
PC6	0.287473	3.593	96.232
PC7	0.17613	2.202	98.433
PC8	0.125302	1.566	100.000

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O scree plot (Figura 12) confirmou a predominância dos dois primeiros componentes principais, evidenciando redução acentuada dos autovalores após o segundo componente. Esse comportamento indica que os componentes subsequentes contribuem de forma menos expressiva para a explicação da variabilidade dos dados, justificando a utilização dos dois primeiros componentes na interpretação da estrutura temporal observada.

Figura 12: Scree plot da PCA temporal no PAST e RStudio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A análise das cargas fatoriais (Tabela 8) permitiu identificar as variáveis responsáveis pela formação dos componentes principais.

Tabela 8 - Loadings da PCA temporal.

Variável	PC1	PC2
Coliformes Totais	0.382	0.207
Condutividade	0.377	-0.211
Cor	0.415	-0.177
Escherichia coli	0.405	0.209
Oxigênio Dissolvido	-0.25311	0.48385
Temperatura	0.070906	0.65267
Turbidez	0.42693	-0.16666
pH	0.35272	0.38701

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O PC1 foi interpretado como um gradiente associado ao transporte de material particulado e matéria orgânica, com influência simultânea sobre os indicadores microbiológicos. A associação entre cor, turbidez, condutividade elétrica, coliformes totais e Escherichia coli indica que esse componente representa períodos em que as condições hidrológicas favoreceram o aporte de sedimentos e compostos orgânicos às matrizes avaliadas. Esse comportamento é compatível com ambientes amazônicos, nos quais o aumento do escoamento superficial durante a estação

chuvosa promove alterações simultâneas em diversos parâmetros de qualidade da água (Nascimento *et al.*, 2023).

O PC2 apresentou maior influência da temperatura, oxigênio dissolvido e pH, caracterizando um gradiente relacionado às condições físico-químicas naturais do sistema aquático. Diferentemente do PC1, esse componente representa variações associadas ao equilíbrio ambiental e às condições climáticas e hidrológicas, sem relação direta com o aumento da carga orgânica ou microbiológica.

Resultados semelhantes foram descritos por Chidiac *et al.* (2023), que identificaram componentes relacionados tanto ao transporte de sedimentos quanto às características naturais da água. Na Amazônia Oriental, Nascimento *et al.* (2023) também destacaram a sazonalidade como fator determinante na organização temporal dos parâmetros de qualidade da água.

O biplot da PCA temporal (Figura 13) permitiu visualizar simultaneamente a distribuição das amostras e a relação entre as variáveis responsáveis pela estrutura temporal dos dados.

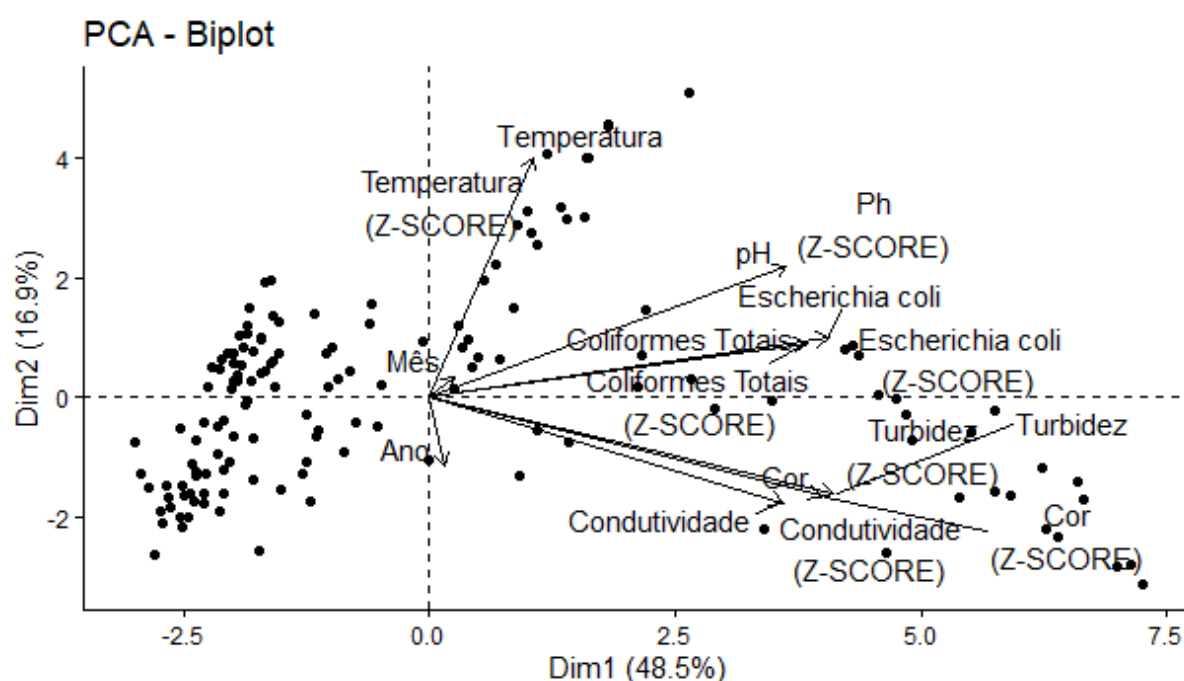
A disposição dos vetores evidenciou dois processos principais atuando sobre a qualidade da água: o primeiro associado ao transporte de partículas, matéria orgânica e microrganismos; e o segundo relacionado às variações físico-químicas naturais do sistema. Dessa forma, a variabilidade temporal observada resulta da interação entre fatores hidrológicos, ambientais e operacionais, e não de um único mecanismo isolado.

A dispersão das amostras em diferentes quadrantes indica que a qualidade da água não permaneceu homogênea durante o período analisado, refletindo a influência de processos temporais que atuaram de forma diferenciada sobre os parâmetros monitorados.

Os resultados da PCA temporal corroboram os padrões observados nos boxplots e no heatmap temporal. De forma integrada, a PCA temporal demonstrou que a variabilidade da qualidade da água ao longo dos 24 meses de monitoramento foi influenciada principalmente por dois processos complementares. O primeiro correspondeu ao gradiente associado ao aumento da carga particulada, matéria orgânica e indicadores microbiológicos, evidenciando a influência das condições

hidrológicas e da sazonalidade sobre os parâmetros monitorados. O segundo esteve relacionado às variações físico-químicas naturais da água, representadas principalmente pela temperatura, oxigênio dissolvido e pH. Assim, os resultados indicam que a dinâmica temporal da qualidade da água em Canaã dos Carajás resulta da interação entre processos naturais e operacionais, permitindo uma interpretação integrada dos fatores responsáveis pelas oscilações observadas.

Figura 13: Biplot da PCA temporal no PAST e RStudio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Embora os componentes principais não permitam identificar diretamente a origem de cada processo, sua composição sugere que o PC1 foi predominantemente influenciado por processos hidrológicos e por pressões antrópicas que favorecem o transporte de partículas e matéria orgânica, enquanto o PC2 refletiu principalmente processos naturais relacionados ao equilíbrio físico-químico do sistema.

5.9. Integração entre PCA estrutural e temporal

A integração entre a PCA estrutural e a PCA temporal permitiu compreender a qualidade da água sob duas dimensões complementares: a diferenciação entre as matrizes monitoradas e a variabilidade observada ao longo do tempo. Enquanto a PCA

estrutural sintetizou os principais gradientes responsáveis pelas diferenças entre os sistemas avaliados, a PCA temporal evidenciou como esses gradientes responderam às oscilações ambientais observadas ao longo dos 24 meses de monitoramento.

Sob a perspectiva ambiental, o PC1 estrutural pode ser interpretado como um gradiente associado à qualidade da água influenciado pelo aumento da carga particulada, da matéria orgânica e dos indicadores microbiológicos, enquanto o PC2 representa predominantemente as características físico-químicas naturais do sistema.

A PCA estrutural evidenciou que as diferenças entre as matrizes não foram determinadas por um único parâmetro, mas pelo comportamento conjunto de variáveis associadas à cor, turbidez, indicadores microbiológicos e oxigênio dissolvido. Esses resultados indicam que os principais contrastes observados entre os ambientes monitorados estão relacionados à atuação integrada de processos físicos, químicos e microbiológicos que influenciam a qualidade da água.

A PCA temporal demonstrou que esses padrões estruturais não permaneceram constantes ao longo do período analisado. Os agrupamentos observados para cor, turbidez, condutividade elétrica, coliformes totais e *Escherichia coli* indicam que a variabilidade temporal esteve associada à mobilização de partículas, matéria orgânica e indicadores microbiológicos, enquanto temperatura, oxigênio dissolvido e pH representaram um segundo gradiente relacionado às condições físico-químicas do sistema. A predominância dessas variáveis no PC1 temporal sugere que a sazonalidade hidrológica exerceu influência importante sobre a dinâmica da qualidade da água, promovendo alterações simultâneas em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Em contrapartida, o segundo componente permaneceu relacionado principalmente às condições naturais do ambiente aquático, representadas pela temperatura, pelo oxigênio dissolvido e pelo pH.

Dessa forma, a utilização conjunta das duas PCA permitiu identificar que a qualidade da água em Canaã dos Carajás resulta da interação entre processos naturais, pressões antrópicas e condições operacionais. As diferenças entre as matrizes refletem principalmente suas características intrínsecas e os processos de tratamento, enquanto as oscilações temporais evidenciam a influência da sazonalidade hidrológica sobre o comportamento dos parâmetros monitorados. Essa abordagem integrada permitiu compreender não apenas quais variáveis diferenciam

os sistemas avaliados, mas também como essas diferenças evoluem ao longo do tempo.

A eficiência da PCA em sintetizar a variabilidade dos parâmetros observada neste estudo está de acordo com aplicações recentes em sistemas de abastecimento. Silva *et al.* (2024) também verificaram que a técnica permitiu distinguir diferentes matrizes hídricas e identificar os parâmetros responsáveis pela maior variabilidade dos dados, evidenciando sua utilidade como ferramenta de apoio à interpretação ambiental.

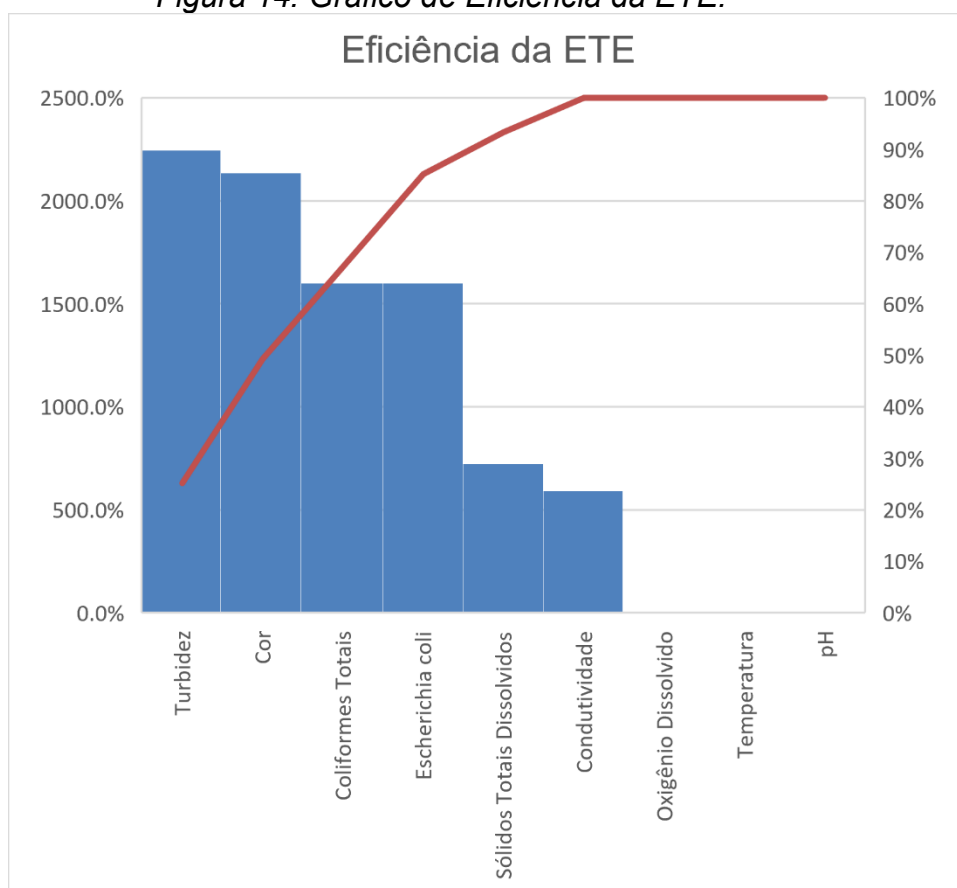
Além de reduzir a dimensionalidade dos dados, a aplicação conjunta da PCA estrutural e temporal permitiu distinguir os mecanismos associados à variabilidade entre as matrizes e ao longo do período monitorado. Essa abordagem possibilitou separar a influência de processos relacionados ao aporte de partículas e matéria orgânica daqueles vinculados às condições físico-químicas naturais da água, fornecendo uma interpretação mais ampla dos fatores que condicionam a qualidade hídrica. Resultados semelhantes foram observados por Chidiac *et al.* (2023) e Nascimento *et al.* (2023), que demonstraram a capacidade das análises multivariadas em revelar relações complexas entre variáveis ambientais e a dinâmica dos sistemas aquáticos.

5.10. Avaliação da eficiência da ETE

Os padrões identificados pelas análises multivariadas indicaram que variáveis relacionadas à carga particulada e à matéria orgânica exerceram papel importante na variabilidade da qualidade da água. Dessa forma, a avaliação da eficiência da ETE torna-se fundamental para compreender em que medida o tratamento contribuiu para reduzir os parâmetros que mais influenciaram os padrões observados nas análises de correlação, heatmap e PCA.

A avaliação da ETE, pode ser verificada por meio da Figura 14.

Figura 14: Gráfico de Eficiência da ETE.



Fonte: Elaborada pela autora, 2026.

Observa-se que houve desempenho mais elevado para parâmetros associados à fração suspensa e à coloração do efluente. A turbidez apresentou redução média de 153,07 UNT na entrada para 9,33 UNT na saída, correspondendo a eficiência média de 93,59%. A cor reduziu de 676,00 UC para 62,48 UC, com eficiência média de 89,00%. Esses resultados indicam que o sistema apresentou boa capacidade de remoção de material particulado, coloides e compostos associados à coloração, que tendem a ser mais sensíveis aos processos físicos e biológicos presentes no tratamento.

Resultados semelhantes foram descritos por Von Sperling (2014), que destaca que sistemas biológicos convencionais apresentam elevada eficiência na remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica particulada, refletindo diretamente na redução da turbidez e da cor do efluente tratado.

A elevada eficiência observada para turbidez e cor apresenta coerência com os resultados obtidos na matriz de correlação e na PCA temporal, que identificaram essas

variáveis entre os principais fatores responsáveis pela variabilidade da qualidade da água. Esse resultado demonstra a aplicabilidade prática da PCA, uma vez que os parâmetros identificados como principais responsáveis pela variabilidade da qualidade da água corresponderam justamente àqueles que apresentaram maior remoção durante o tratamento.

Em contraste, a condutividade elétrica apresentou redução média de 1275,71 $\mu\text{S/cm}$ para 944,29 $\mu\text{S/cm}$, com eficiência média de 24,74%, enquanto os sólidos totais dissolvidos reduziram de 693,91 mg/L para 470,51 mg/L, com eficiência média de 30,18%. A menor remoção desses parâmetros é ambientalmente coerente, pois condutividade e STD representam a fração dissolvida e iônica do efluente, geralmente menos removida por sistemas convencionais quando comparada aos sólidos suspensos. Assim, esses resultados não indicam necessariamente falha operacional, mas uma limitação esperada quanto à remoção de constituintes dissolvidos.

Esse comportamento é ambientalmente coerente e descrito por Bezerra *et al.* (2021), pois a condutividade elétrica reflete a concentração de íons dissolvidos na água, os quais, diferentemente das partículas em suspensão, não são removidos de forma significativa pelos processos convencionais de tratamento empregados na ETE.

Os indicadores microbiológicos apresentaram redução relevante, porém incompleta. Os coliformes totais tiveram eficiência média de 66,67%, enquanto *Escherichia coli* apresentou eficiência média de 69,57%. A redução indica contribuição do tratamento para melhoria sanitária do efluente, mas a presença de registros positivos na saída evidencia que a remoção microbiológica variou ao longo do período monitorado. Essa interpretação deve ser feita com cautela devido à conversão binária dos dados, que representa presença ou ausência, mas não intensidade da contaminação.

Os parâmetros pH, temperatura e oxigênio dissolvido foram interpretados por comparação direta, e não por eficiência percentual. O pH reduziu de média 7,71 na entrada para 7,14 na saída, mantendo-se próximo à neutralidade, o que sugere estabilidade das condições químicas do efluente tratado. A temperatura apresentou pequena variação média, de 29,94 °C para 30,37 °C, sem indicar alteração expressiva. O oxigênio dissolvido aumentou de 2,38 mg/L para 3,89 mg/L, sugerindo melhoria das condições de oxigenação após o tratamento. Esse aumento é

ambientalmente relevante, pois maior disponibilidade de OD pode indicar menor demanda imediata de oxigênio e melhores condições para lançamento ou continuidade do processo de autodepuração, dependendo dos padrões aplicáveis. Esse comportamento reforça a interpretação obtida na PCA, na qual o oxigênio dissolvido apresentou comportamento oposto ao grupo formado por cor, turbidez e indicadores microbiológicos, sugerindo melhoria das condições ambientais após o tratamento.

Os resultados de eficiência observados na ETE são coerentes com os padrões identificados nas análises multivariadas. A forte associação entre turbidez, cor e indicadores microbiológicos observada nos heatmaps e nas PCA evidencia que a redução desses parâmetros exerce papel relevante na diferenciação entre afluente e efluente tratado, contribuindo para a melhoria global da qualidade do efluente final.

5.11. Limitações metodológicas

O estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A primeira refere-se à disponibilidade e heterogeneidade dos dados, uma vez que nem todos os parâmetros estiveram disponíveis com a mesma completude para todas as matrizes e pontos. Essa característica pode influenciar a comparabilidade entre algumas análises, embora não comprometa a identificação dos principais padrões de variabilidade observados. A segunda está relacionada à conversão dos indicadores microbiológicos para escala binária, procedimento que permitiu sua inclusão nas análises estatísticas, mas reduziu a representação da magnitude da contaminação. A terceira limitação envolve o tratamento de valores abaixo do limite de detecção por LD/2, procedimento adequado para análises exploratórias, mas menos robusto que métodos específicos para dados censurados quando há elevada frequência de não detecção.

Embora o período de monitoramento tenha abrangido 24 meses, a quantidade de pontos amostrais disponíveis para algumas matrizes foi relativamente reduzida. Essa característica limita a capacidade de representar toda a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos existentes no município. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados como representativos das matrizes avaliadas e não como diagnóstico exaustivo de todos os sistemas de abastecimento e corpos hídricos de

Canaã dos Carajás. Ainda assim, a série temporal extensa permitiu investigar um comportamento consistente e associação entre parâmetros, fornecendo informações relevantes para subsidiar programas de monitoramento contínuo e o planejamento da gestão dos recursos hídricos municipais.

A PCA estrutural foi desenvolvida a partir de valores médios agregados por ponto amostral, estratégia que permitiu comparar diferentes matrizes hídricas em uma mesma estrutura analítica. Entretanto, a agregação reduz parte da variabilidade temporal originalmente presente nos dados, fazendo com que os componentes principais representem tendências médias das matrizes avaliadas. Dessa forma, os resultados da PCA estrutural devem ser interpretados como uma síntese exploratória dos contrastes entre os ambientes monitorados, não substituindo análises específicas voltadas à investigação detalhada das variações temporais. Ainda assim, essa abordagem mostrou-se útil para identificar os principais gradientes ambientais responsáveis pela diferenciação entre matrizes, podendo amparar a definição de parâmetros prioritários para o monitoramento ambiental.

A conversão dos indicadores microbiológicos para escala binária permitiu sua incorporação às análises multivariadas. Contudo, essa abordagem não diferencia intensidades distintas de contaminação, uma vez que registros positivos passam a receber a mesma representação numérica independentemente da magnitude observada. Assim, os resultados microbiológicos devem ser interpretados como indicadores de ocorrência e não como estimativas quantitativas da carga microbiana. Apesar dessa limitação, a inclusão desses indicadores permitiu avaliar sua associação com os demais parâmetros físico-químicos, contribuindo para compreender a dinâmica sanitária das diferentes matrizes hídricas.

Além disso, a compatibilização de informações de poços com registros do SIAGAS foi realizada com base em critérios de coerência espacial e disponibilidade de dados, mas está sujeita às limitações próprias de bases secundárias, como possíveis defasagens cadastrais e diferenças entre os períodos de atualização das informações. Entretanto, a utilização dessa base permitiu contextualizar a representatividade dos pontos avaliados em relação aos sistemas de captação existentes no município, ampliando a interpretação dos resultados obtidos.

Embora essas limitações exijam cautela na extrapolação dos resultados, elas não comprometem os padrões identificados pelas análises multivariadas. Os resultados contribuem para o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos municipais e podem ser aprimorados em estudos futuros com a ampliação da rede amostral e a incorporação de variáveis relacionadas ao uso e ocupação do solo e às atividades minerárias.

5.12. Considerações integradas dos resultados

A integração dos resultados evidencia que as diferentes matrizes hídricas apresentaram comportamentos próprios quanto à estabilidade e à variabilidade da qualidade da água, refletindo tanto suas características naturais quanto a influência dos processos de tratamento e das condições operacionais. Essa heterogeneidade foi consistente em todas as abordagens estatísticas empregadas, indicando que a diferenciação entre as matrizes constitui um dos principais aspectos que estruturam a dinâmica da qualidade da água no município.

Um dos principais resultados obtidos foi a recorrência da associação entre cor, turbidez e indicadores microbiológicos nas diferentes abordagens estatísticas. A repetição desse padrão demonstra que esses parâmetros representam um mesmo processo ambiental, relacionado ao transporte de partículas, matéria orgânica e microrganismos. A consistência dessa associação ao longo das análises reforça que essas variáveis constituem os principais indicadores da dinâmica da qualidade da água no sistema estudado.

As PCA estrutural e temporal confirmaram e sintetizaram os padrões identificados pelas análises anteriores. A PCA estrutural evidenciou que as diferenças entre as matrizes estão associadas principalmente ao comportamento conjunto de parâmetros físicos e microbiológicos, especialmente cor, turbidez e indicadores microbiológicos, enquanto a PCA temporal demonstrou que esses padrões são continuamente influenciados pelas oscilações hidrológicas e operacionais ao longo do monitoramento. Assim, os resultados indicam que a dinâmica da qualidade da água no município não pode ser explicada apenas pela comparação entre pontos, nem apenas pela variação mensal, mas pela interação entre estrutura e tempo.

Enquanto a análise estrutural evidenciou que esses processos diferenciam as matrizes hídricas entre si, a análise temporal demonstrou que sua intensidade varia ao longo do monitoramento, indicando que a qualidade da água resulta da interação entre características próprias de cada matriz e das oscilações hidrológicas observadas durante o período de estudo. Dessa forma, as análises revelam que espaço e tempo não atuam de maneira independente, mas constituem dimensões complementares da dinâmica hidroambiental.

A avaliação da eficiência da ETE complementa essa interpretação ao demonstrar que os parâmetros identificados como principais responsáveis pela variabilidade da qualidade da água também foram aqueles que apresentaram maior remoção durante o tratamento. Esse resultado evidencia que os gradientes identificados pela PCA possuem correspondência prática na operação do sistema, reforçando a aplicabilidade da abordagem multivariada para interpretação do desempenho ambiental.

Em conjunto, os resultados demonstram que a utilização integrada das análises descritivas e multivariadas permitiu compreender a qualidade da água de forma mais abrangente do que seria possível pela avaliação isolada dos parâmetros. A recorrência dos mesmos grupos de variáveis nas diferentes técnicas estatísticas reforça a robustez dos padrões identificados e evidencia que a dinâmica da qualidade da água em Canaã dos Carajás é controlada por processos ambientais que atuam simultaneamente sobre diferentes matrizes hídricas. Nesse contexto, a integração entre análises estruturais e temporais constitui uma contribuição relevante para o monitoramento ambiental em municípios amazônicos, ao permitir interpretar conjuntamente os efeitos das características hidroambientais, da sazonalidade e das condições operacionais sobre a qualidade da água. Esses resultados corroboram Maia, Silva e Libânio (2019), que destacam a contribuição das técnicas multivariadas para caracterizar o comportamento da qualidade da água e subsidiar estratégias de monitoramento mais eficientes.

Essa compreensão integrada reforça que o monitoramento da qualidade da água no município deve considerar simultaneamente águas superficiais, subterrâneas, potáveis e efluentes, especialmente diante da dependência local de

poços, da expansão urbana e das transformações territoriais associadas à atividade minerária.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo alcançou o objetivo de analisar a dinâmica da qualidade da água em diferentes matrizes hídricas de Canaã dos Carajás por meio de técnicas estatísticas multivariadas, permitindo compreender como fatores ambientais e operacionais influenciam o comportamento dos parâmetros monitorados.

Os resultados demonstraram que as matrizes superficial, subterrânea, potável e de efluente apresentam padrões distintos de qualidade da água. Enquanto a água superficial mostrou maior influência da sazonalidade hidrológica e dos processos de transporte de material particulado, a água subterrânea apresentou maior estabilidade, refletindo as características hidrogeológicas locais. A água potável evidenciou maior homogeneidade em função do tratamento e do controle operacional do sistema de abastecimento, ao passo que o efluente apresentou maior variabilidade, associada às oscilações das cargas afluentes e ao funcionamento da estação de tratamento.

A aplicação integrada da estatística descritiva, das análises de correlação, dos heatmaps e da Análise de Componentes Principais permitiu identificar que a variabilidade da qualidade da água é explicada pela atuação conjunta de processos físicos, químicos e microbiológicos. A PCA sintetizou esses processos em gradientes ambientais, evidenciando que as diferenças entre as matrizes e suas variações ao longo do tempo não decorrem de alterações isoladas dos parâmetros, mas da interação entre sazonalidade, características hidroambientais e condições operacionais dos sistemas monitorados.

Esses resultados respondem à problemática proposta ao demonstrar que o comportamento das diferentes matrizes hídricas em um município amazônico é condicionado por fatores naturais e antrópicos que atuam de forma integrada. Assim, a utilização de técnicas multivariadas mostrou-se mais eficaz para interpretar essa complexidade do que a avaliação isolada de parâmetros ou o emprego exclusivo de índices sintéticos de qualidade da água.

A principal contribuição deste estudo consiste na integração de diferentes matrizes hídricas em uma única abordagem analítica, contemplando águas superficial, subterrânea, potável e efluente em um município amazônico marcado pela expansão urbana, pela atividade minerária e pela elevada dependência de águas subterrâneas

para abastecimento. Essa abordagem amplia a compreensão da dinâmica da qualidade da água e fornece subsídios para o planejamento do monitoramento ambiental e para a gestão dos recursos hídricos municipais.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem a rede de monitoramento, incorporando novos pontos amostrais, variáveis hidrológicas e informações sobre uso e ocupação do solo, de modo a aprofundar a compreensão dos processos que controlam a qualidade da água em municípios amazônicos submetidos a intensas transformações territoriais.

Conclui-se que a integração de diferentes matrizes hídricas por meio de técnicas estatísticas multivariadas permitiu compreender os fatores ambientais e operacionais que condicionam a qualidade da água, fornecendo subsídios para o monitoramento ambiental e para a gestão dos recursos hídricos em municípios amazônicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JUNG, M. S., DA SILVA, J. A. G., FACHINETTO, J. M., CARVALHO, I. R., LUCCHESI, O. A., BASSO, N. C. F., DA SILVA, L. G. Água: recurso imensurável na garantia da sustentabilidade. *Revista De Gestão Social E Ambiental - RGSA*, 17(7), e03661. (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n7-013>. Acesso em 12 de fevereiro de 2026.

SOUZA, M. F., MILANI, I. C. B., JÚNIOR, R. M. S. D. Variabilidade espacial da qualidade da água do Canal São Gonçalo em períodos de alta e baixa pluviosidade: avaliação de dados pretéritos utilizando estatística multivariada. *Revista Thema*, V.24, n.2. p.1-17. (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.15536/revistathema.24.2025.3618>. Acesso em 10 de janeiro de 2026.

FILGUEIRAS, H. F., CALLADO, N. H., DE SOUZA, V. C. B., PACHECO, F. N. S. Efeitos naturais e antrópicos sobre os aspectos qualitativos da água na bacia hidrográfica do rio Niquim. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 22, e1. (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.v22e1>. Acesso em 12 de fevereiro de 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Portal da Qualidade das Águas. Indicadores de Qualidade – Índices de Qualidade das Águas IQA. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/portaIpnqa/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em 20 de dezembro de 2025.

WEHBE, C., BAROUD, H. Limitations and considerations of using composite indicators to measure vulnerability to natural hazards. *Scientific Reports – nature research* 14:19333. (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68060-z>. Acesso em 22 de dezembro de 2025.

BRANCHI, B. A. Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas e Índices Compostos: Aplicação e Desafios. *Revista Sociedade e Natureza*. 34.2022. (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63868>. Acesso em 12 de fevereiro de 2026.

CHIDIAC, S., EL NAJJAR, P.; OUAINI, N., EL RAYESS, Y., EL AZZI, D. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and

perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2023) 22:349-395. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>. Acesso em 21 de janeiro de 2025.

KACHROUD, M., TROLARD, F., KEFI, M., JEBARI, S., BOURRIÉ, G. Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water* 2019, 11(2),361. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11020361>. Acesso em 12 de fevereiro de 2026.

FORTES, A. C. C., BARROCAS, P. R. G., KLIGERMAN, D. C. Water quality indices: Construcion, potential, and limitations. *Ecological Indicators* 157 (2023) 111187. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111187>. Acesso em 21 de janeiro de 2025.

ROCHA, C. H. B., PEREIRA, A. M. Análise multivariada para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Revista Ambiente e Água* 11(1). Mar 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1590>. Acesso em 21 de janeiro de 2025.

BRASIL. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação. Município de Canaã dos Carajás – PA. 2023. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/cartografia-de-suscetibilidade>. Acesso em 20 de dezembro de 2025.

MAIA, K. P., DA SILVA, G. A., LIBÂNIO, M. Aplicação de análise multivariada no estudo da frequência de amostragem e do número de estações de monitoramento de qualidade da água. *Eng. Sanit. Ambient.* 24 (05). Sep-Oct 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019175743>. Acesso em 10 de janeiro de 2026.

CECCONELLO, S. T., CENTENO, L. N., GUEDES, H. A. S. Índice de qualidade de água modificado pela análise multivariada: estudo de caso do Arroio Pelotas, RS, Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.* 23(05). Out 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018165394>. Acesso em 23 de janeiro de 2026.

TUNDISI, J. G., TAKAKO M. T. Recursos Hídricos no Século XXI. Oficina de Textos, 2011. São Paulo. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/359509969/Recursos-Hidricos-No-Seculo-XXI>. Acesso em 10 de janeiro de 2026.

TRIPATHI, M., SINGAL, S. K. Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India. *Ecological Indicators* 96 (2019) 430-436. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.025> Acesso em 20 de dezembro de 2025.

BEGUM, S., FIRDOUS, S., NAEEM, Z., CHAUDHRY, G., ARSHAD, S., ABID, F., ZAHRA, S., KHAN, S., ADNAN, M., SUNG, Y. Y., MUHAMMAD, T. S. T. Combined Multivariate Statistical Techniques and Water Quality Index (WQI) to Evaluate Spatial Variation in Water Quality. *Tropical Life Sciences Research*, 34(3), 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21315/tlsr2023.34.3.7>. Acesso em 20 de dezembro de 2025.

YANG, Y., HUANG, X., WU, X., LIU, C., ZHAO, S., ZHU, X. The spatiotemporal variations characteristic and pollution evaluation of water quality in Qujiang River, China. *Springer* (2023) 13:32. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01829-7>. Acesso em 14 de fevereiro de 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020/view>. Acesso em 14 de fevereiro de 2026.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em 28 de dezembro de 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em 28 de dezembro de 2025.

KLAMT, R. A., DA COSTA, A. B., GAEDKE, M. A., LOBO, E. A. Drinking water quality índices: a systematic review. *Revista Ambiente e Água* 16 (2). 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2630>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Índices de Qualidade de Água: métodos e aplicabilidade. Brasília: EMBRAPA, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/859420/1/Cap-Livro-manejo-pag-325-352.pdf>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.

NUNES, J. W. A.; QUEIROZ, T. M. Análise multivariada da qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Jauquara – MT. Boletim Goiano de Geografia, v. 43, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v43i01.64798>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.

BOTELHO, V. F., MORALES, G. P., PONTES, A. N. Variações Espaço Temporais da Qualidade da Água do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, Pará, Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, v.18, n.02 (2025) 1057-1070. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1057-1070>. Acesso em 22 de fevereiro de 2026.

SALES, J. M. J., NETTO, A. O. A., MONTEIRO, A. S. C., CARVALHO, C. M. Variabilidade Espaço- Temporal da Qualidade da Água em Área de Agricultura Irrigada. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.14, n°. 3, p. 4071-4085, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7127/RBAI.V14N101167> Acesso em 22 de fevereiro de 2026.

PARÁ. SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, MINERAÇÃO E ENERGIA – SEDEME. EIA – Estudo de Impacto Ambiental – Ferrovia Paraense S.A. Volume IV/X. Diagnóstico Ambiental – Meio Físico. (2017). Disponível em: https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2017/06/eia/4_EIA_Ferrovia_Vol.IV.pdf. Acesso em 05 de março de 2026.

PAULA, F. F., FONTOURA, J. R., PAIVA, R. C. D. Mudanças na cor da água relacionadas a mineração em rios da Amazônia Sul Ocidental observadas por satélite. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 22, n. 2025 (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.v22e2>. Acesso em 05 de março de 2026.

VASCONCELOS, B. R., LIMA, M. T. V., FILHO, A. C. P. Detecção de mudanças no uso e ocupação do solo no Estado do Amazonas baseada nas classificações do projeto MAPBIOMAS. Revista GeoFronter, vol. 10 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.61389/geofronter.v10.7773>. Acesso em 22 de fevereiro de 2026.

BRITO, A. P., TOMASELLA, J., WAHNFRIED, I. D., CANDIDO, L. A., MONTEIRO, M. T., FILGUEIRAS, S. J. F. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29616>. Acesso em 18 de janeiro de 2026.

NOGUEIRA, G. E. H., GONÇALVES, R. D. Recarga de águas subterrâneas em aquíferos freáticos, um estudo de caso: modelagem da zona não saturada e de taxas de recarga do Aquífero Rio Claro usando Hydrus-1D. *Holos Environment*, v. 21, n. 3 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.14295/holos.v21i3.12455>. Acesso em 18 de janeiro de 2026.

PRADO, J. R., FIGUEIREDO, D. M., DORES, E. F. G. C., HONGYU, K., DELFINO, A. J. G., RODRIGUES, D. V. B. Variação da qualidade da água em relação à sazonalidade e ao uso da terra no Sul da região Amazônica. *Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente*, n. 43, v. 2, p. 159-184, mai-ago, 2021. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/7676>. Acesso em 19 de janeiro de 2026.

SANTOS, E. L. N., HENRIQUE, I. N. A ação humana sobre a qualidade das águas na Amazônia Brasileira: uma revisão. *Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade*, v. 11, ed. Especial, mar., 2025, n. 2526. Disponível em: <https://doi.org/10.23899/3tr56b10>. Acesso em 07 de março de 2026.

MUNIZ, D. H.F., OLIVEIRA-FILHO, E. C. Multivariate Statistical Analysis for Water Quality Assessment: A rReview of Research Published between 2001 and 2020. *Hydrology* 2023, 10(10), 196. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology10100196>. Acesso em 07 de março de 2026.

WANG, Z., JIA, D., SONG, S., SUN, J. Assessments of surface water quality through the use of multivariate statistical techniques: A case study for the watershed of the Yuqiao Reservoir, China. *Front. Environ. Sci.* 11:1107591 (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1107591>. Acesso em 07 de março de 2026.

CHAVES, H. S., MORAIS, D. G., FILHO, H. A. D., DANTAS, K. G. F., BEIRÃO, A. T. M., SILVA, K. P. SILVA, J. N., SILVA, V. F. A., SILVA, P. A., CARVALHO, F. I. M. Aplicação estatística multivariada para a avaliação físico-química na qualidade da

água subterrânea na cidade de Parauapebas (Sudeste do Estado do Pará). Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais – Ago, set 2020, v. 11, n. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0025>. Acesso em 12 de março de 2026.

ARANTES, A. G. S., HOFFMANN, N. K. S. A. Aplicação de técnicas de estatística multivariada na avaliação da qualidade da água do reservatório João Leite (GO). Revista DAE, São Paulo, v. 69, n 233, pp 06-19. (2021) Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.073>. Acesso em 12 de março de 2026.

JÚNIOR, R. F. O., FILHO, L. C. A. L., BATISTA, R. O., FERREIRA, L. L. N., COSTA, L. R., CAMINHA, M. P. Multivariate statistics Applied to irrigation water quality data of a watershed in the semiarid region of Brazil. Revista Caatinga, Mossoró, v. 34, n. 3, p. 650-658, jul.-set., 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n317rc>. Acesso em 19 de março de 2026.

FINKLER, N. R., BORTOLIN, T. A., COCCONI, J., MENDES, L. A., SCHNEIDER, V. E. Avaliação espaço-temporal da qualidade da água utilizando técnicas estatísticas multivariadas. Ciência e Natura, v. 38, n. 2 (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X18168>. Acesso em 19 de março de 2026.

MA, X., WANG, L., YANG, H., LI, N., GONG, C. Spatiotemporal Analysis of Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques and the Water Quality Identification Index for the Qinhuai River Basin, East China. Water 2020, 12, 2764. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12102764> Aceso em 07 de março de 2026.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_das_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos. Acesso em 29 de março de 2026.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE CANAÃ DOS CARAJÁS – PA, SAAE. SAAE – História. Disponível em: <https://saaecanaadoscarajas.com.br/sobre/>. Acesso em 07 de março de 2026.

CANAÃ DOS CARAJÁS. Plano Municipal de Saneamento Básico. Portal da Transparência – Canaã dos Carajás – PA. 2012. Disponível em:

<https://transparencia.transparenciacanaa.com.br/arquivos/PMBCC.pdf>. Acesso em 07 de março de 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.ana.gov.br/portalpnqa/Publicacao/PANORAMA_DA_QUALIDADE_DAS_AGUAS.pdf. Acesso em 05 de janeiro de 2026.

HAIR Jr., J. F. *et al.* Análise multivariada de dados. Tradução Adonai Schlup Sant'Anna. 6. E. Porto Alegre: Bookman, 2009. Disponível em: https://ia903108.us.archive.org/33/items/kupdf.net_hair-j-f-anaacutelise-multivariada-de-dados-6ordf-ediccedilatildeopdf/kupdf.net_hair-j-f-anaacutelise-multivariada-de-dados-6ordf-ediccedilatildeopdf.pdf. Acesso em 06 de maio de 2026.

HELSEL, D. R. Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab® and R. John Wiley & Sons, Inc. Publication. Denver, Colorado. (2012). Disponível em: https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/28522/1/Dennis%20R.%20Helsel_2012.pdf. Acesso em 06 de maio de 2026.

SAHOO, K., SAMAL, A. K., PRAMANIK, J., PANI, S. K. Exploratory Data Analysis using Python. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). V. 8, Issue-12, October 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3591.1081219>. Acesso em 08 de maio de 2026.

WILKINSON, L., FRIENDLY, M. The History of the Cluster Heat Map. The American Statistician. 63 (2): 179-184. (2009) Disponível em: <https://doi.org/10.1198/tas.2009.0033>. Acesso em 06 de maio de 2026.

GONZÁLEZ-ESTRADA, E., VILLASEÑOR, J. A., ACOSTA-PECH, R. Shapiro-Wilk test for multivariate skew-normality. Computational Statistics (2022) 37:1985-2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00180-021-01188-y>. Acesso em 15 de maio de 2026.

MOYA. C. R. Como escolher o teste estatístico: um guia para o pesquisador iniciante. São Paulo: Ed. Da Autora, 2021. Disponível em: <https://www.sbquadril.org.br/app/uploads/2021/10/Como-escolher-o-teste-estati%CC%81stico-Um-guia-para-o-pesquisador-iniciante.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. Mapa Municipal Estatístico. (2022). Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_municipais/colecao_de_mapas_municipais/2020/PA/canaa_dos_carajas/1502152_MM.pdf. Acesso em 14 de abril de 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB. Atlas pluviométrico do Brasil. Equações intensidade-duração-frequência (Desagregação de Precipitações Diárias). (2022). Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/server/api/core/bitstreams/3d57de5c-fdea-4f21-99b0-c81247350c53/content>. Acesso em 14 de abril de 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). As regiões Hidrográficas. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/regioes-hidrograficas>. Acesso em 14 de abril de 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. 2024. Disponível em: https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php. Acesso em 14 de abril de 2026.

SILVA, A. L. P., JUNIOR, J. F. C. C., COSTA, J. A. Análise das características estruturais e ocupação do solo do município de Canaã dos Carajás – Pará – Brasil. *Ambiência Guarapuava* (PR), v.16 n.1 p.962-975. Jan/Mar 2020 ISSN 2175 – 9405. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2020.01.02>. Acesso em 10 de julho de 2026.

FURTADO, L. G., PEREIRA, C. B., SILVA, D. F., BELATO, L. S., PEREIRA, B. W. F. DETECÇÃO DE MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DO SOLO NO MUNICÍPIO DE CANAÃ DOS CARAJÁS, PARÁ. Volume 5, nº 2. (2023) ISSN: 2675-2395. Disponível em: <https://doi.org/10.46551/rvg2675239520232116131>. Acesso em 10 de julho de 2026.

CARVALHO, F. I. M.; LEMOS, V. P.; DANTAS FILHO, H. A.; DANTAS, K. G. F. Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas de Belém a partir de Parâmetros Físico-Químicos e Níveis de Elementos Traço Usando Análise Multivariada. *Ver. Virtual Quim.*, 2015, 7 (6), 2221-2241. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150132>. Acesso em 10 de julho de 2026.

SILVA, S. A., AZEVEDO, L. E. C., LIMA, G. V. B. A., PEREIRA, M. M., ARAÚJO, I. R. S. Otimização estatística de parâmetros de qualidade de águas superficiais no monitoramento ambiental em atividades de mineração na Amazônia. *Revista Research, Society and Development*, v. 9, n. 3, e99932596, 2020. ISSN 2525-3409. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2596>. Acesso em 10 de julho de 2026.

SILVA, J. A. A., LEMOS, M. S., SILVA, N. C., DANTAS, K. G. F., DANTAS FILHO, H. A. AVALIAÇÃO MULTIVARIADA DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E ÁGUA FINAL DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DE BELÉM, PARÁ, BRASIL. *Revista Quím. Nova*, Vol. 47, nº. 6, e-20240013, 1-9, 2024. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20240013>. Acesso em 10 de julho de 2026.

NASCIMENTO, R. O., ARAÚJO, S. R., SODRÉ, S. S. V., FREITAS, K. M., ALVES, A. C. Characterization of water quality and the effects of land use and seasonality on springs in eastern Amazonia. *Revista Ambiente e Água* 18. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2909>. Acesso em 10 de julho de 2026.

BEZERRA, V. G. S., TAVARES, M. G., DOMBROSKI, S. A. G., CAVALCANTE, F. L., SOUZA, L., MARTINS, R. C. G., BATISTA, R. O. Desempenho de estação de tratamento de esgoto doméstico no semiárido brasileiro e potencial de seu efluente para fins de irrigação. *Revista Brazilian Journal of Development*. Vol.7 nº 4 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-197>. Acesso em 10 de julho de 2026.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Amostra da estrutura da base analítica de dados.

Base Analítica							
Data	Período	Ponto	Matriz	Parâmetro	Valor Padronizado	Valor Numérico	Observação Técnica
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Temperatura	30.200	30.200	-
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Temperatura	29.300	29.300	-
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Temperatura	28	28.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Temperatura	29.700	29.700	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Temperatura	31.600	31.600	-
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Temperatura	32.100	32.100	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	pH	7.270	7.270	-
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	pH	6.980	6.980	-
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	pH	6.920	6.920	-
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	pH	7.020	7.020	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	pH	7.740	7.740	-
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	pH	6.920	6.920	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Condutividade	299	299.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Condutividade	109.300	109.300	-
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Condutividade	351	351.000	-

Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Condutividade	190.500	190.500	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Condutividade	1244	1244.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Condutividade	897	897.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Turbidez	0.310	0.310	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Turbidez	6.740	6.740	-
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Turbidez	0.310	0.310	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Turbidez	0.310	0.310	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Turbidez	105	105.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Turbidez	1.210	1.210	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Cor	4	4.000	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Cor	25	25.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Cor	4	4.000	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Cor	5	5.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Cor	350	350.000	-
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Cor	33.700	33.700	-
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Coliformes Totais	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Coliformes Totais	1	1.000	Presente
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Coliformes Totais	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Coliformes Totais	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Coliformes Totais	1	1.000	Presente
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Coliformes Totais	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Escherichia coli	0	0.000	Ausente

Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Escherichia coli	1	1.000	Presente
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Escherichia coli	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Escherichia coli	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Escherichia coli	1	1.000	Presente
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Escherichia coli	0	0.000	Ausente
Janeiro 2024	Chuvoso	ETA	Potável	Oxigênio Dissolvido	5.060	5.060	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	REPRESA	Superficial	Oxigênio Dissolvido	5.060	5.060	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	POÇO	Potável	Oxigênio Dissolvido	5.060	5.060	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	PONTA DE REDE	Potável	Oxigênio Dissolvido	-		-
Janeiro 2024	Chuvoso	ENTRADA ETE	Efluente	Oxigênio Dissolvido	5.060	5.060	<LD
Janeiro 2024	Chuvoso	SAÍDA ETE	Efluente	Oxigênio Dissolvido	5.060	5.060	<LD

APÊNDICE B – Amostra da estrutura da eficiência da ETE.

Data	Parâmetro	Entrada ETE	Saída ETE	Diferença (Entrada-Saída)	Eficiência (%)	Classificação
01/24	Temperatura	31,60	32,10	-0,50	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
01/24	pH	7,74	6,92	0,82	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
01/24	Condutividade	1244,00	897,00	347,00	27,9%	Baixa remoção
01/24	Turbidez	105,00	1,21	103,79	98,8%	Alta remoção
01/24	Cor	350,00	33,70	316,30	90,4%	Alta remoção
01/24	Coliformes Totais	1,00	0,00	1,00	100,0%	Alta remoção
01/24	Escherichia coli	1,00	0,00	1,00	100,0%	Alta remoção
01/24	Oxigênio Dissolvido	5,06	5,06	0,00	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
01/24	Sólidos Totais Dissolvidos	465,00	470,00	-5,00	-1,1%	Aumento após tratamento
02/24	Temperatura	30,10	31,10	-1,00	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
02/24	pH	7,69	6,93	0,76	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
02/24	Condutividade	1402,00	946,00	456,00	32,5%	Baixa remoção
02/24	Turbidez	146,00	1,07	144,93	99,3%	Alta remoção
02/24	Cor	451,00	27,90	423,10	93,8%	Alta remoção
02/24	Coliformes Totais	1,00	0,00	1,00	100,0%	Alta remoção
02/24	Escherichia coli	1,00	0,00	1,00	100,0%	Alta remoção
02/24	Oxigênio Dissolvido	5,06	5,06	0,00	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
02/24	Sólidos Totais Dissolvidos	555,00	280,00	275,00	49,5%	Baixa remoção
03/24	Temperatura	30,20	30,80	-0,60	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
03/24	pH	7,95	7,14	0,81	Não se aplica	Avaliação por comparação direta
03/24	Condutividade	1418,00	849,00	569,00	40,1%	Baixa remoção
03/24	Turbidez	213,00	2,06	210,94	99,0%	Alta remoção