

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Nilvania Alves Da Silva

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA CARGA ORGÂNICA
AFLUENTE E DO DESEMPENHO OPERACIONAL DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO UBERABINHA

UBERLÂNDIA – MG

2026

NILVANIA ALVES DA SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA CARGA ORGÂNICA
AFLUENTE E DO DESEMPENHO OPERACIONAL DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO UBERABINHA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte das
exigências da graduação em Engenharia Ambiental e
Sanitária.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Sueli Moura Bertolino

UBERLÂNDIA – MG

2026

RESUMO

O monitoramento da qualidade do esgoto afluente às estações de tratamento é importante para compreender as condições às quais os processos de tratamento estão submetidos e para subsidiar decisões operacionais. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade temporal da carga orgânica afluente à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Uberabinha, em Uberlândia, Minas Gerais, utilizando a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a vazão como indicadores de monitoramento. A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma série histórica de 301 registros provenientes do monitoramento laboratorial operacional da estação. Foram realizadas análises estatísticas descritivas das concentrações de DQO afluente e efluente, da vazão e da eficiência de remoção, além da estimativa da carga de DQO nos 293 registros que apresentavam simultaneamente dados de concentração e vazão. A carga de DQO foi calculada a partir da relação entre a concentração do parâmetro e a vazão correspondente ao mesmo registro. Os resultados indicaram variabilidade nas concentrações de DQO ao longo do período analisado e eficiência média de remoção de DQO de 50,79%, com ampla variação entre os registros. Para os dados com concentração e vazão disponíveis, foram observadas variações expressivas nas cargas afluente e efluente. As correlações entre a vazão e a DQO afluente, a DQO efluente e a eficiência de remoção foram fracas, indicando que, no conjunto de dados analisado, a vazão, isoladamente, não explicou de forma relevante as variações observadas nesses indicadores. O estudo demonstra a utilidade de séries históricas provenientes do monitoramento operacional para a caracterização da variabilidade da carga orgânica e para o acompanhamento do desempenho de estações de tratamento de esgoto. Os resultados devem ser interpretados considerando as limitações da base de dados, especialmente a ausência de informações anteriores ao período analisado e a impossibilidade de quantificar a contribuição de diferentes fontes para as variações observadas na carga orgânica. A análise da série histórica pode, contudo, fornecer subsídios para o acompanhamento operacional e para o desenvolvimento de estudos futuros sobre os fatores associados à variabilidade da carga orgânica na ETE Uberabinha.

Palavras-chave: esgotamento sanitário; Demanda Química de Oxigênio; carga orgânica; variabilidade temporal; estação de tratamento de esgoto.

ABSTRACT

Monitoring the quality of wastewater entering treatment plants is important for understanding the conditions to which treatment processes are subjected and for supporting operational decisions. In this context, this study aimed to analyze the temporal variability of the organic load entering the Uberabinha Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, using Chemical Oxygen Demand (COD) and flow rate as monitoring indicators. The research was based on a historical series of 301 records obtained from the plant's operational laboratory monitoring. Descriptive statistical analyses were performed for influent and effluent COD concentrations, flow rate, and removal efficiency. In addition, COD loads were estimated for the 293 records that contained both concentration and flow data. The COD load was calculated from the relationship between the parameter concentration and the flow rate corresponding to the same record. The results indicated variability in COD concentrations throughout the analyzed period and a mean COD removal efficiency of 50.79%, with substantial variation among the records. For the records containing both concentration and flow data, considerable variations were observed in influent and effluent COD loads. The correlations between flow rate and influent COD, effluent COD, and removal efficiency were weak, indicating that, within the analyzed dataset, flow rate alone did not substantially explain the variations observed in these indicators. The study demonstrates the usefulness of historical series obtained from operational monitoring for characterizing organic load variability and monitoring the performance of wastewater treatment plants. The results should be interpreted considering the limitations of the available database, particularly the absence of information from periods prior to the series analyzed and the inability to quantify the contribution of different sources to the observed variations in organic load.

Nevertheless, the analysis of historical monitoring data can provide support for operational monitoring and for future studies investigating the factors associated with organic load variability at the Uberabinha WWTP.

Keywords: wastewater treatment; Chemical Oxygen Demand; organic load; temporal variability; wastewater treatment plant.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CHA - Carga Hidráulica Aplicada

COA - Carga Orgânica Aplicada

COV - Carga Orgânica Volumétrica

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

PREMEND - Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes não Domésticos

SEPLAM - Secretária Municipal de Planejamento

SESP - Serviço Especial de Saúde Pública

SISEMA - Sistema Estadual de Meio Ambiente

SISNAMA - Sistema Nacional de Meio Ambiente

TDH - Tempo de Detenção Hidráulica

UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	07
2. OBJETIVOS	
2.1 Objetivo Geral.....	09
2.2 Objetivo Específicos.....	09
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	09
4. METODOLOGIA.....	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico exerce papel fundamental na proteção da saúde pública e do meio ambiente. Entre seus componentes, o esgotamento sanitário compreende a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final adequada dos esgotos. A realização adequada dessas etapas contribui para reduzir a contaminação dos corpos hídricos e a exposição da população a agentes associados à transmissão de doenças, além de favorecer melhores condições ambientais e sanitárias. Apesar dos avanços observados no setor, o Brasil ainda enfrenta desafios relacionados à expansão, à universalização e à manutenção da qualidade dos serviços de esgotamento sanitário. Nesse cenário, o funcionamento adequado das estações de tratamento de esgoto (ETEs) permanece uma questão relevante, especialmente diante da diversidade das condições de geração e composição dos esgotos urbanos (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2023).

O desempenho de uma ETE resulta da interação entre as características do esgoto afluente e as condições hidráulicas, físicas, químicas e biológicas de operação do sistema. Alterações na composição do afluente podem influenciar os processos de tratamento e, conseqüentemente, seu desempenho. Assim, a avaliação da qualidade do esgoto deve considerar não apenas os valores médios dos parâmetros, mas também sua variabilidade ao longo do tempo, uma vez que a carga orgânica afluente constitui um importante indicador das condições operacionais da estação (Von Sperling, 2014).

A variabilidade da carga orgânica pode decorrer de diversos fatores, como oscilações no consumo de água, infiltrações na rede coletora e, especialmente, das contribuições de efluentes não domésticos provenientes de atividades industriais, comerciais e de serviços. Esses efluentes podem apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica, óleos e graxas, nutrientes, metais e outros compostos, alterando a composição do esgoto afluente e interferindo no desempenho das unidades de tratamento. Nesse contexto, o controle dos efluentes não domésticos constitui uma medida importante para reduzir riscos de sobrecarga e preservar a eficiência operacional dos sistemas de tratamento (Jordão; Pessôa, 2017; Metcalf; Eddy, 2016).

A Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha é a principal unidade de tratamento de esgotos do município de Uberlândia, Minas Gerais, sendo responsável pelo tratamento de aproximadamente 95% do esgoto coletado. Localizada no Distrito Industrial, a estação foi projetada para receber predominantemente esgotos domésticos e utiliza reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) em sua etapa de tratamento biológico (Departamento Municipal de Água e Esgoto [DMAE], 2025). Em sistemas

de tratamento, as características do afluente, incluindo a quantidade de matéria orgânica disponível, fazem parte das condições que influenciam o funcionamento do processo biológico. Assim, o acompanhamento da carga orgânica afluente é relevante para a avaliação das condições operacionais do sistema (Chernicharo, 2007).

Entre os parâmetros empregados para a avaliação da matéria orgânica presente nos esgotos, destaca-se a Demanda Química de Oxigênio (DQO). O parâmetro é utilizado para estimar a quantidade de oxigênio necessária à oxidação química da matéria orgânica presente na amostra e apresenta ampla aplicação no controle e no acompanhamento de sistemas de tratamento. A possibilidade de obtenção dos resultados em menor tempo do que em análises como a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e outras análises laboratoriais favorece sua utilização no monitoramento operacional e na identificação de variações na qualidade do esgoto afluente (Metcalf; Eddy, 2016). O PREMEND (Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos) implantado em Uberlândia, por meio do Decreto Municipal nº 10.643, de 16 de abril de 2007 tem como objetivo controlar o lançamento de efluentes não domésticos na rede pública de esgotamento sanitário, contribuindo para a proteção do sistema coletor e das unidades de tratamento. Considerando sua implantação no período abrangido pela série histórica analisada, o programa é apresentado neste estudo como parte do contexto institucional relacionado ao controle das contribuições não domésticas ao sistema de esgotamento sanitário.

A ETE Uberabinha possui registros históricos provenientes do monitoramento operacional de rotina, os quais podem ser utilizados para avaliar o comportamento dos parâmetros analisados ao longo do tempo. Esses registros permitem observar a amplitude das variações, identificar períodos com comportamentos distintos e verificar a ocorrência de valores extremos na série histórica. A utilização desse tipo de informação complementa avaliações realizadas por meio de campanhas específicas de amostragem, uma vez que possibilita analisar e comparar as condições observadas durante o funcionamento cotidiano da estação.

Estudos anteriores realizados em Uberlândia também abordaram aspectos relacionados ao PREMEND, à qualidade dos efluentes da ETE Uberabinha e às condições ambientais do Rio Uberabinha. Bazílio (2023) analisou a evolução das adesões ao programa, as características dos efluentes brutos e tratados e a qualidade da água do corpo receptor, relacionando esses aspectos ao contexto da gestão ambiental e do controle de efluentes não domésticos no município. A presente pesquisa adota abordagem distinta, ao concentrar-se na análise da variabilidade temporal dos dados operacionais da ETE Uberabinha, com ênfase na DQO, na vazão e na carga orgânica calculada a partir dos registros disponíveis. Dessa forma, o estudo complementa

investigações anteriores ao explorar o comportamento da série histórica operacional da estação, sem atribuir causalidade ao PREMEND ou a outros fatores que não foram diretamente avaliados.

A análise estatística desses dados permite caracterizar a distribuição dos valores e quantificar a variabilidade dos parâmetros monitorados. A avaliação temporal, por sua vez, contribui para a identificação de oscilações e padrões de comportamento ao longo do período analisado.

O estudo contribui para a discussão sobre o uso de séries históricas de monitoramento operacional na avaliação de estações de tratamento de esgoto. Os resultados podem auxiliar na interpretação do comportamento da ETE Uberabinha e fornece uma base para pesquisas posteriores que disponham de séries temporais mais extensas (anterior a 2014 e posteriores a 2021), informações sobre as fontes de contribuição e variáveis adicionais para aprofundar a análise das relações entre a qualidade do afluente e o desempenho do tratamento.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a variabilidade temporal da carga orgânica afluente à Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha, utilizando a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a vazão como indicadores de monitoramento, a partir de uma série histórica de dados provenientes do laboratório operacional.

2.2.Objetivos Específicos

- ✓ caracterizar estatisticamente as concentrações de DQO afluente e efluente;
- ✓ calcular a carga de DQO nos registros que apresentavam dados de vazão;
- ✓ calcular a eficiência de remoção de DQO; e
- ✓ analisar o comportamento temporal dos indicadores.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1.Sistemas públicos de esgotamento sanitário

O esgotamento sanitário é um dos componentes do saneamento básico e compreende o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações destinados à coleta, ao transporte, ao

tratamento e à disposição final ambientalmente adequada dos esgotos sanitários. A implantação e a operação adequadas desses sistemas contribuem para reduzir a exposição da população a agentes patogênicos e para evitar o lançamento inadequado de cargas poluentes nos corpos hídricos, favorecendo a proteção da saúde pública e a conservação ambiental (Brasil, 2007). No Brasil, as diretrizes para a prestação dos serviços de saneamento básico são estabelecidas pela Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, posteriormente atualizada pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.

Os sistemas públicos de esgotamento sanitário são formados por unidades que funcionam de maneira integrada. Entre seus principais componentes estão as ligações prediais, as redes coletoras, os coletores-tronco, os interceptores, os emissários, as estações elevatórias e as estações de tratamento de esgoto (ETEs). Esse conjunto permite o encaminhamento dos esgotos gerados nas áreas atendidas até as unidades de tratamento, nas quais são aplicados processos físicos, químicos e biológicos para a remoção de diferentes constituintes, como sólidos, matéria orgânica, nutrientes e microrganismos, antes da disposição do efluente tratado no corpo receptor (Fundação Nacional de Saúde, 2015; Von Sperling, 2014).

O desempenho de um sistema público de esgotamento sanitário depende da integração entre a infraestrutura implantada e as condições de operação e manutenção de suas unidades. A capacidade de tratamento deve ser compatível com as características e as variações do esgoto recebido, uma vez que alterações na vazão e na composição do afluente podem modificar as condições de funcionamento das unidades de tratamento.

Entre as condições que podem aumentar a variabilidade do esgoto recebido pelas redes públicas estão as contribuições não domésticas. Efluentes provenientes de atividades industriais, comerciais e de serviços podem apresentar características diferentes das observadas no esgoto predominantemente doméstico. Quando lançados em condições incompatíveis com a capacidade do sistema, esses efluentes podem contribuir para sobrecargas hidráulicas e orgânicas, interferir nos processos biológicos de tratamento e provocar problemas na infraestrutura, como corrosão e formação excessiva de gases. Essas ocorrências podem aumentar a necessidade de manutenção e os custos associados à operação do sistema (Metcalf; Eddy, 2016).

Por esse motivo, a operação dos sistemas públicos de esgotamento sanitário requer, além de infraestrutura adequada, o acompanhamento das características do esgoto afluente e o controle das contribuições lançadas na rede coletora. O monitoramento fornece informações sobre as condições de funcionamento do sistema e permite identificar alterações na vazão e na carga poluente recebida pela estação. Essas informações podem apoiar decisões operacionais e

medidas preventivas voltadas à manutenção da estabilidade dos processos de tratamento e à proteção dos corpos hídricos receptores.

3.2.Características do esgoto sanitário

A caracterização dos esgotos sanitários é importante para compreender as condições às quais os sistemas de coleta e tratamento estão submetidos. Os esgotos apresentam constituintes físicos, químicos e biológicos cuja concentração e composição variam ao longo do tempo. Essas características influenciam o planejamento, a operação e a avaliação do desempenho das estações de tratamento de esgoto (ETEs), especialmente porque os processos empregados precisam responder às condições do afluente recebido.

De acordo com Von Sperling (2014), os esgotos sanitários são constituídos predominantemente por água, enquanto uma pequena fração corresponde a sólidos dissolvidos e suspensos, matéria orgânica, nutrientes, microrganismos e outros compostos químicos. Embora represente uma parcela reduzida do volume total, essa fração concentra grande parte dos constituintes associados ao potencial poluidor dos esgotos. Por essa razão, a caracterização e o acompanhamento desses constituintes são importantes para avaliar as condições do afluente e o funcionamento das unidades de tratamento.

As características do esgoto sanitário podem variar em função de diferentes fatores, como os hábitos de consumo da população, o consumo de água, as condições socioeconômicas da área atendida, as características climáticas e a ocorrência de infiltrações na rede coletora. Também podem influenciar a qualidade do afluente o tempo de permanência do esgoto nas tubulações, as condições da rede e as contribuições provenientes de atividades industriais, comerciais e institucionais (Jordão; Pessôa, 2017).

Essa variabilidade é relevante para a operação das ETEs porque alterações na vazão e na concentração dos constituintes modificam as cargas submetidas aos processos de tratamento. No caso dos sistemas biológicos, mudanças na quantidade e na composição da matéria orgânica podem alterar as condições de funcionamento dos microrganismos responsáveis pela degradação dos poluentes. A presença de determinadas substâncias em concentrações elevadas também pode interferir nos processos biológicos, dependendo das características do sistema e da capacidade de adaptação da biomassa (Metcalf; Eddy, 2016).

A matéria orgânica é um dos principais constituintes de interesse na caracterização dos esgotos sanitários. Ela é formada por diferentes substâncias, que podem apresentar maior ou menor facilidade de degradação biológica. Essas contribuições podem alterar as características

do esgoto predominantemente doméstico e aumentar a variabilidade da carga orgânica recebida pelas estações de tratamento (Von Sperling, 2014).

Entre esses parâmetros, destacam-se aqueles relacionados à matéria orgânica, especialmente a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO), por representarem a carga orgânica afluyente submetida ao tratamento. A remoção dessa carga constitui o principal objetivo das estações de tratamento de esgotos, uma vez que seu lançamento nos corpos hídricos promove o consumo de oxigênio dissolvido, comprometendo a qualidade da água e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Além disso, a DBO e a DQO são amplamente utilizadas no monitoramento operacional por permitirem avaliar a eficiência dos processos de tratamento e identificar variações na carga orgânica afluyente (Von Sperling, 2014; Jordão; Pessoa, 2017; Metcalf; Eddy, 2016).

A escolha do parâmetro e a interpretação dos resultados dependem do objetivo da análise, das características do sistema e das condições de monitoramento disponíveis (Chernicharo, 2007).

3.2.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a fração biodegradável da matéria orgânica presente nos esgotos sanitários e nos efluentes. O ensaio estima a quantidade de oxigênio dissolvido consumida pelos microrganismos durante a degradação biológica da matéria orgânica em condições padronizadas de temperatura e tempo. A determinação convencional é realizada após cinco dias de incubação a 20 °C, sendo o resultado geralmente expresso como DBO_{5,20} (Von Sperling, 2014).

A concentração de DBO fornece uma indicação da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente na amostra. Quando o esgoto com elevada carga de matéria orgânica é lançado sem tratamento adequado em um corpo hídrico, a atividade dos microrganismos decompositores pode aumentar o consumo de oxigênio dissolvido. Esse processo pode reduzir a disponibilidade de oxigênio para outros organismos aquáticos e comprometer as condições ambientais do corpo receptor (Metcalf; Eddy, 2016).

Nas estações de tratamento, a DBO é utilizada na avaliação da carga orgânica aplicada aos processos biológicos e na verificação da eficiência de remoção de matéria orgânica. A comparação entre as concentrações de DBO no afluyente e no efluente permite estimar a parcela

removida pelo sistema e acompanhar o desempenho das unidades de tratamento (Jordão; Pessoa, 2017).

Apesar de sua importância, a DBO apresenta uma limitação relacionada ao tempo necessário para a obtenção do resultado. O ensaio convencional requer cinco dias de incubação, o que limita sua utilização quando são necessárias informações rápidas para a tomada de decisões operacionais. Além disso, os resultados podem ser influenciados pelas condições da amostra e pela atividade dos microrganismos envolvidos no processo de degradação, o que exige controle das condições analíticas e adequada execução do procedimento laboratorial (Metcalf; Eddy, 2016).

3.2.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro utilizado para estimar a quantidade de oxigênio equivalente necessária à oxidação química da matéria oxidável presente em uma amostra. A determinação é realizada sob condições padronizadas, geralmente utilizando um agente oxidante forte, como o dicromato de potássio. Diferentemente da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que depende da atividade de microrganismos durante o período de incubação, a DQO está relacionada à oxidação química das substâncias oxidáveis presentes na amostra. Dessa forma, o resultado pode incluir tanto frações orgânicas biodegradáveis quanto compostos de menor biodegradabilidade e determinadas substâncias inorgânicas oxidáveis, dependendo da composição do esgoto (Von Sperling, 2014).

Em razão das diferenças entre os princípios dos dois ensaios, a DQO sempre apresenta valores iguais ou superiores à DBO para uma mesma amostra. A relação entre esses parâmetros pode fornecer uma indicação do grau de biodegradabilidade da matéria orgânica presente no esgoto. Valores mais elevados da relação DBO/DQO tendem a indicar maior participação de matéria orgânica biodegradável, enquanto valores mais baixos podem estar associados à presença de compostos de menor biodegradabilidade. Essa interpretação, entretanto, deve considerar as características específicas do esgoto analisado e não deve ser utilizada isoladamente para identificar a origem dos compostos presentes na amostra (Metcalf; Eddy, 2016).

Nas estações de tratamento de esgoto, a DQO pode ser utilizada para caracterizar o afluente, acompanhar a concentração de matéria oxidável, estimar cargas quando associada à vazão e avaliar a eficiência de remoção do tratamento. Variações nos valores observados podem estar relacionadas a mudanças nas características do esgoto recebido, às oscilações da vazão ou à presença de diferentes contribuições na área atendida pelo sistema. A interpretação dessas

variações, contudo, depende da análise conjunta dos dados disponíveis e não permite, isoladamente, determinar a origem específica de cada alteração (Von Sperling, 2014).

A necessidade de obter informações em menor tempo contribuiu para a ampla utilização da Demanda Química de Oxigênio (DQO) no monitoramento de esgotos e efluentes. A DQO apresenta tempo de análise menor que o da DBO, essa característica favorece seu uso no acompanhamento de alterações na qualidade do esgoto afluyente e na avaliação das condições operacionais das estações de tratamento.

Nesta pesquisa, a DQO foi adotada como principal parâmetro de avaliação em razão da disponibilidade de registros históricos provenientes do monitoramento operacional da Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha e de sua utilização na caracterização da matéria orgânica e no acompanhamento de sistemas de tratamento. A análise foi realizada em conjunto com os dados de vazão disponíveis, permitindo também estimar a carga de DQO nos registros que apresentavam informações compatíveis para esse cálculo.

3.2.3 Carga orgânica e variabilidade operacional

A carga orgânica expressa a quantidade de matéria oxidável ou biodegradável que chega a uma estação de tratamento por unidade de tempo. Seu cálculo depende da concentração do parâmetro utilizado e da vazão do esgoto. Assim, enquanto a DQO é normalmente apresentada como concentração, em mg O₂/L, a carga de DQO representa a massa correspondente transportada pelo esgoto durante determinado período, sendo geralmente expressa em kg/d. Essa distinção é importante porque a concentração, isoladamente, não representa a quantidade total de matéria orgânica recebida pela estação.

A carga orgânica pode ser estimada a partir de parâmetros como DBO e DQO e constitui uma informação importante para o dimensionamento, a operação e a avaliação do desempenho de sistemas de tratamento. Em processos biológicos, a quantidade de matéria orgânica disponível influencia a atividade dos microrganismos responsáveis por sua transformação. Por essa razão, a avaliação da carga deve considerar não apenas os valores observados, mas também a vazão associada ao período analisado (Chernicharo, 2007).

A estabilidade operacional de uma estação de tratamento não depende exclusivamente da magnitude da carga recebida. A forma como essa carga varia ao longo do tempo também é relevante. Sistemas de tratamento são projetados para operar dentro de determinadas condições de vazão e de carga, mas variações acentuadas ou persistentes podem alterar as condições de funcionamento das unidades e influenciar o desempenho do processo. A resposta a essas

variações depende das características do sistema, das condições de operação e da capacidade de adaptação dos processos envolvidos (Von Sperling, 2014).

A variabilidade da carga orgânica resulta das oscilações da concentração dos constituintes e da vazão, associadas a padrões de consumo de água, variações diárias e sazonais, infiltrações na rede coletora e características da área de contribuição. Efluentes industriais, comerciais e institucionais podem modificar a concentração de matéria orgânica e introduzir substâncias distintas das encontradas no esgoto doméstico. A magnitude dessa influência depende da composição e da quantidade dos despejos, de sua participação no fluxo total e dos mecanismos de controle existentes (Jordão; Pessoa, 2017; Metcalf; Eddy, 2016).

Nos reatores biológicos, especialmente nos sistemas anaeróbios, variações expressivas na carga aplicada podem alterar as condições de funcionamento da biomassa. O processo anaeróbio envolve diferentes grupos de microrganismos e etapas metabólicas interdependentes, incluindo a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese. Alterações nas condições de alimentação podem interferir nesse equilíbrio e, dependendo da magnitude e da duração da perturbação, afetar a estabilidade do tratamento (Chernicharo, 2007).

3.3. Tratamento anaeróbio de esgotos e reatores UASB

O tratamento anaeróbio utiliza microrganismos capazes de degradar a matéria orgânica na ausência de oxigênio dissolvido, convertendo os compostos orgânicos em produtos mais simples, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e nova biomassa. No tratamento de esgotos sanitários, essa tecnologia destaca-se pelo baixo consumo de energia, reduzida produção de lodo e capacidade de remover parcela significativa da matéria orgânica, embora seu desempenho dependa das características do afluente e das condições de operação do sistema (Chernicharo, 2007; Von Sperling, 2014).

Entre as tecnologias anaeróbias, destaca-se o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), ou reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, amplamente empregado no tratamento de esgotos sanitários no Brasil. Nesse sistema, o esgoto é distribuído na parte inferior do reator e percorre a manta de lodo em fluxo ascendente, promovendo o contato entre a matéria orgânica e a biomassa anaeróbia responsável por sua degradação. Na parte superior, um separador trifásico promove a separação do biogás, do efluente tratado e dos sólidos, favorecendo a retenção da biomassa, condição essencial para a estabilidade do processo e para a eficiência da remoção da matéria orgânica (Chernicharo, 2007).

O desempenho dos reatores UASB está diretamente relacionado às condições de projeto e operação. Seu dimensionamento baseia-se principalmente na vazão afluyente, no tempo de detenção hidráulica (TDH), na velocidade ascensional e na carga orgânica volumétrica aplicada. A definição do volume útil do reator depende da vazão de projeto e do TDH, enquanto a verificação da carga orgânica aplicada assegura que a biomassa opere dentro de condições compatíveis com sua capacidade de degradação. Dessa forma, a relação entre vazão e carga orgânica aplicada é determinante para a estabilidade da manta de lodo e para a eficiência do tratamento (Chernicharo, 2007; Von Sperling, 2014).

A avaliação do desempenho de reatores UASB pode ser realizada por meio de parâmetros operacionais associados às condições de aplicação de carga e às características hidráulicas do sistema. A carga orgânica aplicada (COA) representa a quantidade de matéria orgânica introduzida no reator por unidade de tempo (dia), sendo expressa em kg DQO d⁻¹, enquanto a carga orgânica volumétrica (COV) relaciona a carga aplicada ao volume útil do reator, sendo expressa em kg DQO m⁻³ d⁻¹. Esses parâmetros permitem avaliar se a quantidade de matéria orgânica recebida está compatível com a capacidade de degradação da biomassa anaeróbia.

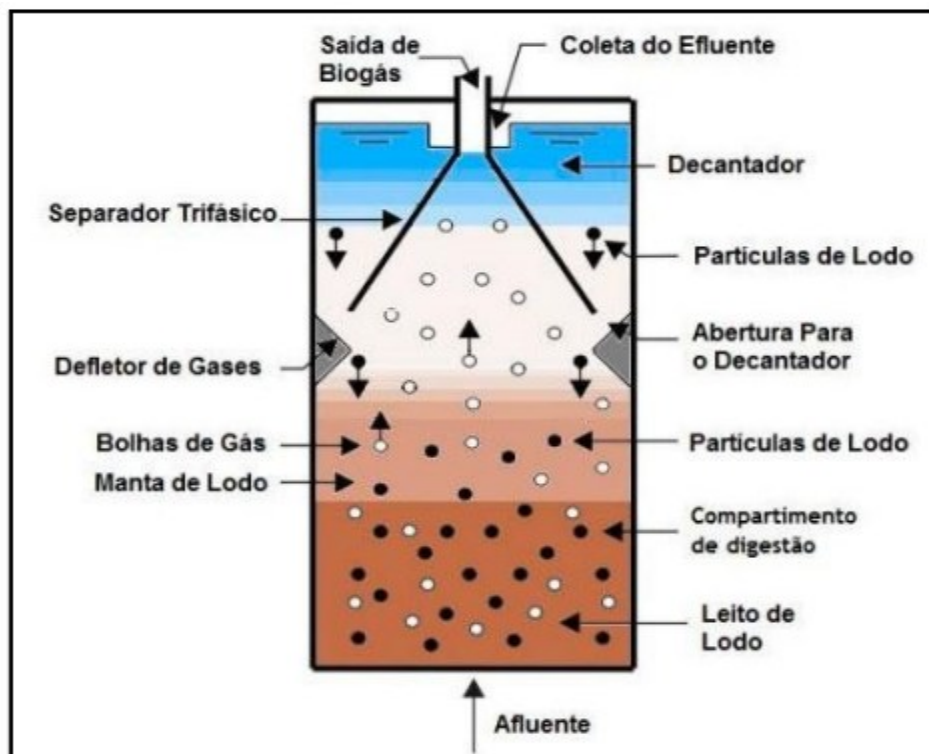
De forma complementar, a carga hidráulica aplicada (CHA) representa a relação entre a vazão afluyente e o volume útil do reator, sendo expressa em m³. m⁻³ d⁻¹ ou relacionada ao tempo de detenção hidráulica. Alterações elevadas na carga hidráulica podem modificar a velocidade ascensional e o tempo de permanência do esgoto no sistema, influenciando a retenção de sólidos e a estabilidade da manta de lodo. Assim, a análise conjunta da carga orgânica e da carga hidráulica aplicada constitui uma ferramenta importante para interpretar variações no desempenho de reatores UASB (Chernicharo, 2007; Von Sperling, 2014).

Durante a operação, alterações na vazão modificam o tempo de detenção hidráulica e a velocidade ascensional, podendo favorecer o arraste de sólidos e comprometer a retenção da biomassa. Da mesma forma, variações na concentração de matéria orgânica alteram a carga orgânica aplicada ao reator e, quando superiores à capacidade de degradação da biomassa, podem provocar desequilíbrios microbiológicos e redução da eficiência de remoção. Assim, a estabilidade do processo depende do equilíbrio entre as características do afluyente, a carga orgânica aplicada e as condições operacionais (Chernicharo, 2007; Metcalf; Eddy, 2016).

Nesse contexto, o monitoramento da qualidade e da quantidade do esgoto afluyente constitui uma ferramenta essencial para a avaliação operacional dos reatores UASB. A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO), associada à vazão, permite estimar a carga orgânica aplicada ao sistema, interpretar as condições de alimentação do reator e avaliar seu desempenho

ao longo do tempo. Essa relação fundamenta a utilização da DQO e da vazão como variáveis de análise no presente estudo (Von Sperling, 2014; Chernicharo, 2007).

Figura 1: Esquema de um reator anaeróbio de fluxo ascendente



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2017).

3.4 Programas de controle de efluentes não domésticos como instrumentos de gestão ambiental

Os efluentes não domésticos, provenientes de atividades industriais, comerciais e de prestação de serviços, podem apresentar características distintas das observadas no esgoto doméstico, como elevadas concentrações de matéria orgânica, variações de pH e presença de compostos potencialmente inibidores. Quando lançados na rede pública de esgotamento sanitário, esses despejos podem alterar a composição do esgoto afluente e influenciar as condições de operação das estações de tratamento, especialmente em processos biológicos, como os reatores UASB, cujo desempenho depende da estabilidade da carga orgânica aplicada e das condições da biomassa. Em razão desses potenciais impactos sobre a infraestrutura e a eficiência do tratamento, diversos prestadores de serviços de saneamento adotam programas específicos para o controle e monitoramento desses lançamentos, utilizando-os como instrumentos de gestão ambiental voltados à proteção do sistema de esgotamento sanitário (Chernicharo, 2007; Von Sperling, 2014; Metcalf; Eddy, 2016).

Os programas de controle de efluentes não domésticos são voltados ao acompanhamento dos despejos líquidos provenientes de atividades industriais, comerciais e de prestação de serviços que são lançados nos sistemas públicos de esgotamento sanitário. De modo geral, esses programas procuram estabelecer critérios para o recebimento desses efluentes, considerando as características da rede coletora e a capacidade operacional das estações de tratamento de esgoto. Seu objetivo é reduzir riscos à infraestrutura de saneamento e ao funcionamento dos processos de tratamento, além de contribuir para o controle das cargas poluidoras encaminhadas ao sistema.

No Brasil, o controle dos lançamentos de efluentes está inserido em um conjunto de instrumentos legais e normativos relacionados ao saneamento básico e à proteção da qualidade ambiental. A Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, posteriormente atualizada pela Lei nº 14.026, de 2020, estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. No âmbito da proteção dos recursos hídricos, a Resolução CONAMA nº 430, de 2011, complementa a regulamentação relacionada às condições e aos padrões de lançamento de efluentes, considerando a necessidade de controle da poluição e de proteção dos corpos receptores.

Além das normas de abrangência nacional, os prestadores de serviços de saneamento podem estabelecer regulamentos e procedimentos específicos para disciplinar o recebimento de efluentes não domésticos nas redes públicas. Esses instrumentos podem definir parâmetros de controle, procedimentos de monitoramento, exigências de pré-tratamento e mecanismos de fiscalização, de acordo com as características do sistema de esgotamento sanitário e com a capacidade das unidades de tratamento.

A necessidade desse controle está relacionada à heterogeneidade dos efluentes provenientes de atividades não domésticas. Dependendo da origem e da composição dos despejos, podem ocorrer alterações nas concentrações de matéria orgânica, no pH, na presença de sólidos, óleos, graxas e outras substâncias capazes de interferir nas condições de operação do sistema. Em determinadas situações, compostos presentes nos efluentes podem também afetar processos biológicos ou provocar danos à infraestrutura de coleta e tratamento (Von Sperling, 2014; Metcalf; Eddy, 2016). Sob a perspectiva operacional, o controle preventivo permite acompanhar as características dos despejos antes ou durante sua incorporação ao sistema público de esgotamento sanitário.

Essa abordagem pode contribuir para reduzir a ocorrência de lançamentos incompatíveis com as condições de operação da rede coletora e das estações de tratamento. Entretanto, a efetividade das medidas adotadas depende da capacidade de identificação das fontes geradoras,

da abrangência do monitoramento, do cumprimento das exigências estabelecidas e das características específicas de cada sistema.

Esses dados podem subsidiar ações de fiscalização, definição de exigências de pré-tratamento, avaliação de riscos operacionais e planejamento das atividades de monitoramento. Dessa forma, o acompanhamento sistemático dos lançamentos fornece informações que podem ser utilizadas tanto na gestão dos usuários quanto no planejamento das atividades relacionadas à operação do sistema de esgotamento sanitário.

A utilização dessas informações como instrumento de gestão depende da qualidade e da continuidade dos registros disponíveis. A atualização dos critérios técnicos, a integração entre os setores responsáveis pelo monitoramento, a fiscalização e a operação das estações de tratamento, bem como a disponibilidade de recursos laboratoriais e de equipes capacitadas, são fatores que influenciam a capacidade de resposta dos programas às alterações no perfil dos efluentes recebidos. A necessidade de avaliação contínua desses instrumentos torna-se ainda mais relevante em sistemas sujeitos a mudanças nas atividades econômicas e nas características das contribuições lançadas na rede (Bazílio, 2023).

Assim, os programas de controle de efluentes não domésticos podem ser compreendidos como instrumentos de gestão que atuam na interface entre o usuário gerador, a rede pública de esgotamento sanitário e a estação de tratamento. Sua função está relacionada à obtenção de maior compatibilidade entre as características dos despejos lançados e as condições de operação do sistema, contribuindo para o controle de riscos à infraestrutura e para o acompanhamento das cargas encaminhadas ao tratamento.

No município de Uberlândia, o Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos (PREMEND) constitui um instrumento institucional do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) voltado ao controle dos efluentes provenientes de atividades industriais, comerciais e de prestação de serviços lançados na rede pública de esgotamento sanitário. O programa está relacionado ao estabelecimento de critérios e procedimentos para o recebimento, o monitoramento e o controle desses despejos, considerando as condições do sistema público de coleta e tratamento.

O PREMEND foi instituído pelo Decreto Municipal nº 10.643, de 2007, e posteriormente atualizado pelo Decreto Municipal nº 13.481, de 2012. Entre os mecanismos associados ao programa estão o cadastramento de usuários, o acompanhamento da qualidade dos efluentes, a fiscalização dos lançamentos e a possibilidade de exigência de medidas de pré-tratamento, conforme as características dos despejos e as condições estabelecidas pela regulamentação aplicável.

A existência de um programa específico para o controle de efluentes não domésticos permite organizar procedimentos de acompanhamento dos usuários e estabelecer critérios para a sua relação com o sistema público de esgotamento sanitário. Do ponto de vista da gestão, essas informações podem contribuir para o conhecimento das fontes geradoras e das características dos despejos que podem alcançar as unidades de coleta e tratamento. A avaliação dos resultados e da efetividade das medidas adotadas, entretanto, depende da disponibilidade de dados compatíveis com o objetivo da análise.

Estudos relacionados ao PREMEND destacam a importância do programa no contexto da gestão dos efluentes não domésticos no município de Uberlândia. Bazílio (2023) analisou aspectos relacionados ao programa e ao controle de efluentes no município, contribuindo para a compreensão de sua relevância como instrumento de gestão ambiental e de acompanhamento das contribuições provenientes de atividades não domésticas.

Embora o controle dos lançamentos possa contribuir para reduzir riscos associados à entrada de efluentes incompatíveis com as condições do sistema, a avaliação de seus efeitos sobre o comportamento da carga orgânica afluenta à Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha exige uma análise específica. A variabilidade observada na DQO e na carga de DQO pode resultar da combinação de diferentes fatores, incluindo as características do esgoto doméstico, as contribuições não domésticas, as variações de vazão, as condições da rede coletora e outros fatores que não são necessariamente identificados nos registros operacionais analisados.

Nesse sentido, o PREMEND é considerado, nesta pesquisa, como parte do contexto institucional relacionado ao controle dos efluentes não domésticos no município de Uberlândia. A série histórica utilizada no estudo permite analisar o comportamento temporal da DQO, da vazão e da carga de DQO na ETE Uberabinha, mas não permite atribuir diretamente as variações observadas à atuação específica do programa. Essa delimitação é necessária porque a base de dados analisada não contém informações suficientes para estabelecer uma relação causal entre as ações do PREMEND e o comportamento da carga orgânica afluenta. A relação entre o controle de efluentes não domésticos e as condições de operação de uma estação de tratamento permanece, portanto, como uma questão relevante para estudos específicos. Investigações futuras que integrem dados de monitoramento da ETE, registros de usuários vinculados ao PREMEND, características dos efluentes lançados e informações sobre a distribuição temporal das contribuições poderão avaliar essa relação de forma mais direta.

4. METODOLOGIA

4.1 Delineamento da pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza quantitativa, documental, retrospectiva, descritiva e exploratória, desenvolvido a partir da análise de dados operacionais da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Uberabinha, localizada no município de Uberlândia, Minas Gerais. O objetivo consistiu em caracterizar a variabilidade da carga orgânica afluenta e efluente e avaliar o desempenho operacional da estação por meio da análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da eficiência de remoção da matéria orgânica ao longo da série histórica disponível.

A pesquisa possui natureza documental por utilizar exclusivamente registros técnicos gerados durante o monitoramento operacional rotineiro do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), sem interferência da pesquisadora na obtenção ou no processamento original dos dados. Seu caráter retrospectivo decorre do emprego de informações históricas previamente registradas.

Por utilizar dados obtidos em condições reais de operação, o estudo representa o comportamento efetivamente observado na ETE Uberabinha, sem controle experimental das condições de monitoramento ou da frequência de amostragem. Dessa forma, as interpretações fundamentam-se exclusivamente na série histórica disponível e na literatura técnico-científica pertinente.

Embora o Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos (PREMEND) constitua um importante instrumento de gestão do sistema de esgotamento sanitário do município, a inexistência de registros laboratoriais anteriores ao banco histórico utilizado impossibilitou a realização de análises comparativas entre períodos anteriores e posteriores à sua implantação. Assim, o PREMEND foi considerado apenas como elemento contextual da pesquisa, não constituindo objeto de avaliação estatística.

4.2 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido com os dados da Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha (ETE Uberabinha), integrante do sistema público de esgotamento sanitário do município de Uberlândia, Minas Gerais, operada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) (Figura 2). A estação recebe predominantemente esgoto sanitário da área urbana do município e utiliza reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) como processo biológico de tratamento, tecnologia

amplamente empregada em regiões tropicais devido à elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, ao baixo consumo de energia e à reduzida produção de lodo.

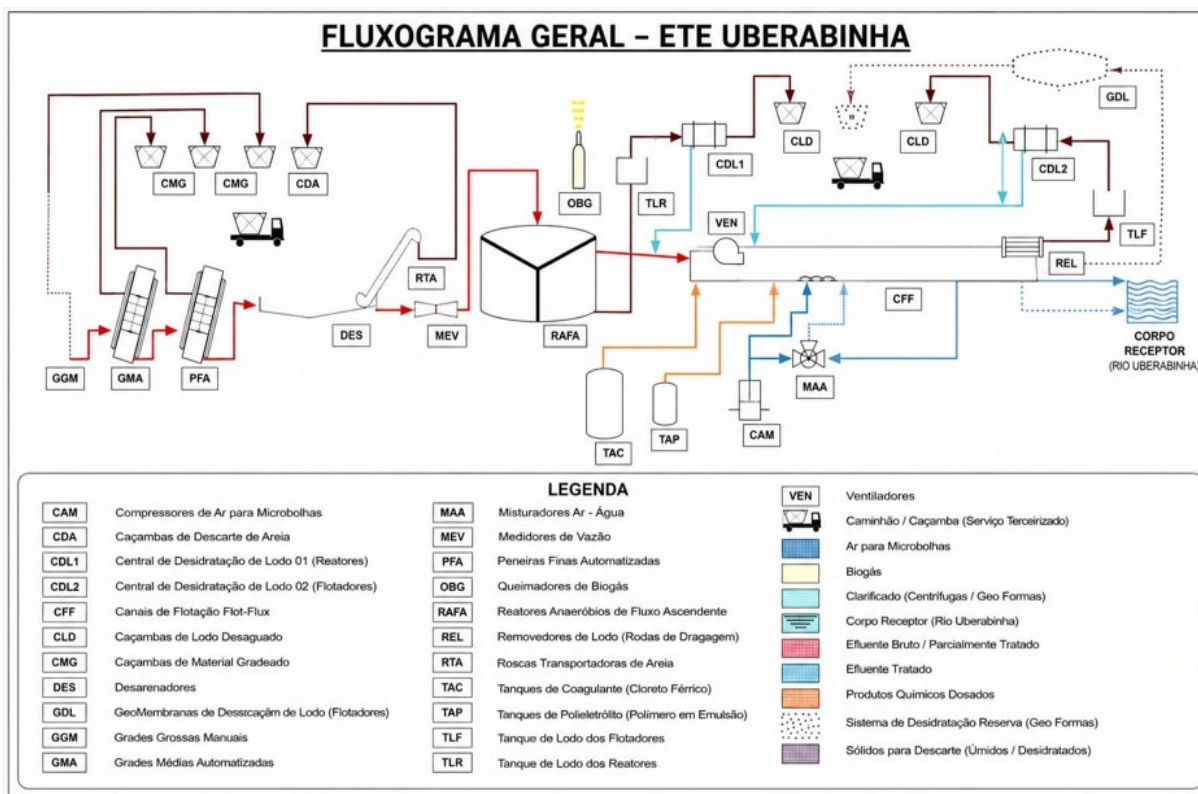
Figura 2: Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha (ETE Uberabinha)



Fonte: DMAE (2026)

O sistema de tratamento é constituído por unidades de tratamento preliminar, secundário e terciário. (Figura 3). Inicialmente, o esgoto bruto passa pelo gradeamento e pela desarenação, destinados à remoção de sólidos grosseiros e materiais sedimentáveis. Em seguida, é encaminhado aos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), responsáveis pela principal etapa de remoção da matéria orgânica por digestão anaeróbia. Após essa etapa, o efluente segue para o sistema de flotação, empregado como pós-tratamento para remoção de sólidos suspensos e materiais flotáveis remanescentes, antes do lançamento no Rio Uberabinha. De acordo com o DMAE (2025) o lodo gerado no processo é submetido ao desaguamento, com retorno da fração líquida ao sistema de tratamento, e posteriormente destinado a aterro industrial, conforme os procedimentos operacionais adotados pelo DMAE.

Figura 3 – Fluxograma do sistema de tratamento de esgoto da ETE Uberabinha.



Fonte: DMAE (2026).

A escolha da ETE Uberabinha fundamenta-se em sua relevância para o sistema de esgotamento sanitário de Uberlândia e na disponibilidade de uma série histórica contínua e consistente de dados operacionais, condição essencial para a aplicação das análises estatísticas desenvolvidas neste estudo. Considerando que os reatores UASB constituem a principal unidade responsável pela remoção da matéria orgânica, a avaliação da variabilidade da DQO e da carga orgânica afluyente fornece subsídios para analisar o comportamento operacional da estação ao longo do período monitorado.

4.3 Base de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) e são provenientes do monitoramento operacional realizado rotineiramente na Estação de Tratamento de Esgoto Uberabinha. Os dados utilizados nesta pesquisa correspondem à Demanda Química de Oxigênio (DQO) e à vazão, obtidos a partir do monitoramento operacional da ETE Uberabinha. A DQO foi selecionada por representar a carga orgânica do esgoto, abrangendo frações biodegradáveis e não biodegradáveis, enquanto a vazão foi utilizada para caracterizar as condições hidráulicas associadas às variações observadas e possibilitar a estimativa da carga orgânica afluyente.

A série histórica compreendeu o período de 03 de janeiro de 2014 a 15 de setembro de 2021, totalizando 301 registros laboratoriais válidos. Foram incluídos apenas os registros que continham, na mesma data de amostragem, resultados de DQO do esgoto afluente e do efluente tratado, condição indispensável ao cálculo da eficiência de remoção. As amostras eram compostas, com volume proporcional à vazão horária de coleta, constituídas por duas ou mais alíquotas com frequência e quantidade irregular obtidas ao longo de cada dia.

As análises laboratoriais foram realizadas pelo Laboratório de Análises de Esgoto de Uberlândia (LAE-UBE), conforme os procedimentos adotados pelo DMAE. A metodologia analítica seguiu o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21ª edição, e normas técnicas da ABNT. Os resultados possuem significado restrito às amostras ensaiadas; os procedimentos de coleta e análise encontram-se disponíveis no laboratório para consulta.

A DQO, expressa em $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, foi utilizada como parâmetro para caracterizar a concentração de matéria orgânica no esgoto afluente e no efluente tratado. A vazão, expressa em L s^{-1} nos registros operacionais, foi utilizada em conjunto com a DQO para o cálculo da carga de DQO e nas análises de correlação. A partir das concentrações de DQO afluente e efluente, calculou-se a eficiência de remoção.

A vazão apresentou 293 registros preenchidos, enquanto a DQO afluente e efluente apresentou 301 pares válidos. Assim, a estatística descritiva de DQO e de eficiência utilizou 301 registros, e as análises que envolveram vazão utilizaram 293 registros completos. Em algumas datas foram realizadas análises em duplicata para verificação dos resultados de rotina; essas observações foram preservadas por constituírem resultados analíticos distintos da mesma campanha. Informações de pH, temperatura e sólidos suspensos totais, quando disponíveis, foram consultadas apenas para subsidiar a interpretação, em razão da inexistência de séries completas.

Os registros foram organizados em planilha eletrônica desenvolvida no Microsoft Excel®, estruturada para o processamento estatístico de dados operacionais de estações de tratamento de esgoto, contemplando rotinas de estatística descritiva, cálculo da eficiência de remoção, histogramas, diagramas de caixa (*boxplots*), distribuições de frequência e séries temporais. A estrutura metodológica adotada baseia-se nos procedimentos estatísticos descritos por Von Sperling (2012) para avaliação de desempenho de sistemas de tratamento de esgotos.

Durante todo o processamento, a sequência cronológica dos registros foi preservada, assegurando a consistência das análises temporais e a representação do comportamento operacional da ETE Uberabinha.

4.4 Tratamento e validação dos dados

Após a obtenção da base de dados, realizou-se o tratamento das informações com o objetivo de assegurar a consistência, a confiabilidade e a representatividade da série histórica utilizada nas análises estatísticas.

Inicialmente, os registros foram organizados em ordem cronológica e conferidos quanto à integridade das informações, padronização das unidades de medida, inconsistências de preenchimento e informações incompletas. Registros em duplicata analítica foram preservados quando identificados como controles de verificação da rotina laboratorial.

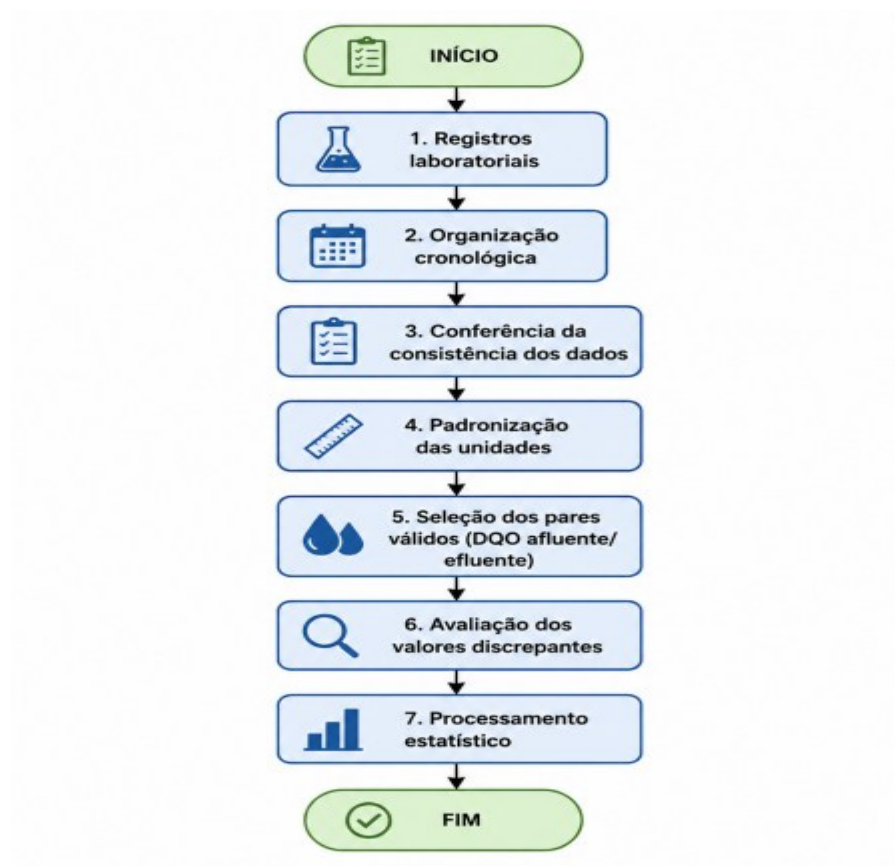
Como critério de inclusão, foram considerados apenas os registros que apresentavam resultados de DQO do esgoto afluente e do efluente obtidos na mesma data de amostragem, possibilitando o cálculo da eficiência de remoção. Assim, os 301 registros analisados correspondem à totalidade dos pares válidos disponíveis para o período compreendido entre 03 de janeiro de 2014 e 15 de setembro de 2021.

A frequência das amostragens refletiu a rotina operacional da ETE Uberabinha e, portanto, não apresentou periodicidade fixa. Em alguns períodos ocorreram coletas em dias consecutivos, enquanto em outros verificaram-se intervalos maiores entre as campanhas de monitoramento, decorrentes da rotina operacional da estação, de finais de semana, feriados, manutenções programadas ou da indisponibilidade de registros laboratoriais.

Em seguida, a base de dados foi submetida à análise exploratória para identificação de valores discrepantes. Cada ocorrência foi avaliada individualmente quanto à consistência dos registros laboratoriais e à compatibilidade com as condições operacionais da estação. Valores extremos associados a eventos reais de operação foram mantidos na base de dados, por representarem condições efetivamente observadas durante o funcionamento da ETE Uberabinha. Apenas registros comprovadamente inconsistentes ou decorrentes de erros de preenchimento ou transcrição foram desconsiderados.

Concluída a etapa de validação, os dados foram organizados em planilhas destinadas ao processamento estatístico, ao cálculo dos indicadores operacionais e à elaboração dos gráficos utilizados na análise dos resultados.

Figura 4 – Fluxograma do tratamento e validação dos dados.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

4.5 Variáveis e estatística aplicada

As variáveis analisadas neste estudo foram: concentração de DQO afluente e efluente à ETE, expressa em $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$; vazão, expressa em L s^{-1} , carga orgânica afluente e efluente, expressa em kg DQO d^{-1} ; eficiência de remoção, expressa em %; e data da amostragem, expressa em d. Para a contextualização dos resultados, foram considerados os critérios normativos aplicáveis ao período da série histórica, de janeiro de 2014 a setembro de 2021, tendo como referência a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. A Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022, foi considerada como referência da legislação atualmente vigente, sem aplicação retroativa aos dados históricos. A comparação com os critérios normativos foi utilizada de forma complementar à análise da variabilidade da DQO, da carga orgânica e da eficiência de remoção.

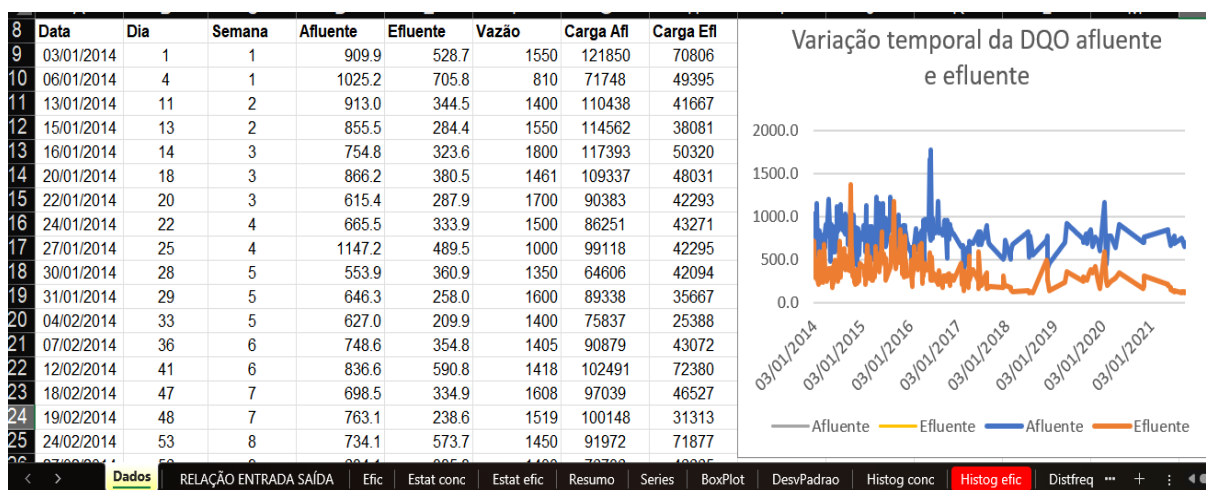
As análises estatísticas foram realizadas no Microsoft Excel®, utilizando uma planilha eletrônica estruturada para o processamento e a avaliação de dados operacionais de estações de tratamento de esgoto, baseada nos procedimentos estatísticos descritos por Von Sperling (2012) para esse tipo de aplicação.

Inicialmente, realizou-se estatística descritiva das variáveis por meio de medidas de tendência central, dispersão e posição, permitindo caracterizar as concentrações de DQO afluente, DQO efluente, eficiência de remoção e vazão. Para os registros completos, foram calculadas correlações lineares de Pearson entre vazão, DQO afluente, DQO efluente e eficiência, exclusivamente como medida exploratória de associação, sem atribuição de causalidade. Em seguida, foram elaborados histogramas e distribuições de frequência para avaliar a distribuição dos resultados e identificar as faixas de concentração e de eficiência predominantes na série histórica.

Os diagramas de caixa (*boxplots*) foram empregados para analisar a dispersão dos dados, a amplitude interquartílica e a ocorrência de valores discrepantes (*outliers*). Os valores extremos identificados foram avaliados individualmente e permaneceram na base de dados quando compatíveis com registros laboratoriais consistentes e com as condições operacionais da estação.

O comportamento das variáveis ao longo do tempo foi analisado por meio de séries temporais das concentrações de DQO afluente, DQO efluente e eficiência de remoção. Essa abordagem permitiu descrever oscilações e padrões visuais durante o período entre janeiro de 2014 e setembro de 2021. Como não foram aplicados testes formais de tendência ou de mudança estrutural, a análise não permite inferir significância estatística para tendência temporal.

Figura 5– Aparência da planilha de dados estatísticos empregados na pesquisa.



A eficiência de remoção da matéria orgânica foi determinada a partir das concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto afluyente e do efluente tratado, conforme apresentado na Equação 1. O cálculo foi realizado para cada dia de monitoramento da série histórica da ETE Uberabinha.

Equação 1 – Cálculo da eficiência de remoção da DQO

$$\eta = ((DQO_{\text{afluente}} - DQO_{\text{efluente}}) / DQO_{\text{afluente}}) \times 100$$

em que:

η = eficiência de remoção da DQO (%);

DQO afluyente = concentração de DQO do esgoto afluyente ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$);

DQO efluente = concentração de DQO do efluente tratado ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$).

A eficiência de remoção foi calculada para todos os registros válidos da série histórica e utilizada como principal indicador do desempenho operacional da estação.

De forma complementar, as concentrações de DQO do efluente tratado foram comparadas ao limite de lançamento estabelecido pela legislação ambiental aplicável, permitindo realizar uma comparação técnica com a referência normativa vigente, sem caracterizar avaliação de conformidade legal histórica.

De forma complementar à análise estatística descritiva, foi realizada uma avaliação exploratória da relação entre vazão, concentração de DQO afluyente, concentração de DQO efluente e eficiência aparente de remoção de DQO. Para essa análise, foram considerados apenas os registros que apresentavam simultaneamente informações de vazão, DQO afluyente, DQO efluente e eficiência de remoção, totalizando 293 observações completas.

A vazão foi caracterizada por meio de medidas de tendência central, amplitude dos valores observados e coeficiente de variação. Posteriormente, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson entre a vazão e as variáveis DQO afluyente, DQO efluente e eficiência de remoção. A correlação foi utilizada exclusivamente como ferramenta exploratória para avaliar associações lineares entre as variáveis, não sendo empregada para estabelecer relações de causa e efeito, considerando que o desempenho de estações de tratamento de esgoto depende da interação de múltiplos fatores operacionais e ambientais.

4.2.Limitações da pesquisa

A principal limitação deste estudo está relacionada à disponibilidade da base de dados, uma vez que não foram encontrados registros laboratoriais no DMAE anteriores a 03 de janeiro de 2014. Essa condição impossibilitou a realização de análises comparativas entre períodos anteriores e posteriores à implantação do Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos (PREMEND).

Outra limitação refere-se à ausência de informações individualizadas sobre a origem dos efluentes não domésticos lançados na rede coletora, impedindo associar diretamente as variações observadas na carga orgânica afluenta às respectivas fontes de contribuição.

Os dados analisados são provenientes do monitoramento operacional de rotina da ETE Uberabinha e foram originalmente produzidos para fins de controle operacional, não para delineamento experimental. A frequência de amostragem foi irregular; adicionalmente, a interpretação da carga depende da representatividade temporal entre a amostra composta e a vazão registrada. Essas características limitam inferências causais e a generalização dos resultados.

Embora também tenham sido consultadas informações referentes ao pH, à temperatura e aos sólidos suspensos totais (SST), essas variáveis não apresentavam séries históricas completas e compatíveis com todos os registros de DQO. Por esse motivo, foram utilizadas apenas como suporte à interpretação dos resultados, sem participação nas análises estatísticas quantitativas.

Assim, as conclusões desta pesquisa restringem-se às condições representadas pela série histórica analisada e fundamentam-se exclusivamente nos dados operacionais disponíveis e na literatura técnico-científica. Dessa forma, não foram estabelecidas relações de causa e efeito além daquelas sustentadas pelas evidências obtidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do banco de dados contendo as concentrações de DQO afluenta e efluente e os registros de vazão da ETE Uberabinha, referentes ao período de 2014 a 2021, foram realizadas análises estatísticas descritivas das concentrações de DQO, da eficiência de remoção e da vazão. Também foi avaliada a relação entre a carga orgânica afluenta e efluente e o desempenho do sistema, bem como o comportamento temporal dos indicadores analisados. Adicionalmente, a concentração de DQO efluente foi comparada, de forma complementar, ao valor de referência

estabelecido pela legislação ambiental vigente, considerando as limitações temporais dessa comparação.

5.1 Análise estatística descritiva da DQO afluyente e DQO efluente.

Foram analisados 301 registros válidos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto afluyente e do efluente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Uberabinha, referentes ao período de 03 de janeiro de 2014 a 15 de setembro de 2021. A Tabela 1 apresenta a análise estatística da série temporal destes parâmetros. Todos os registros continham resultados obtidos na mesma campanha de monitoramento para afluyente e efluente, permitindo o cálculo da eficiência de remoção da matéria orgânica para cada observação.

Tabela 1: Estatística descritiva da concentração de DQO afluyente, DQO efluente e Eficiência dos 301 dados.

Indicador	DQO afluyente mg O ₂ L ⁻¹	DQO efluente mg O ₂ L ⁻¹	Eficiência %
Média aritmética	779,89	378,10	50,79
Mediana	768,00	370,11	53,11
Desvio-padrão	±186,40	±164,05	19,52
Coefficiente de variação	23,90	43,39	38,44
Mínimo	328,00	116,05	-31,76
Máximo	1.772,00	1.372,40	84,54
Percentil 25	668,72	258,24	40,62
Percentil 75	877,70	465,00	64,94
Percentil 90	975,63	566,42	73,92

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A análise da série histórica permitiu caracterizar as concentrações de DQO afluyente e efluente, a eficiência aparente de remoção da ETE e a variabilidade desses parâmetros ao longo do período monitorado. A proximidade entre os valores de média (779,89 mg O₂ L⁻¹) e mediana (768,00 mg O₂ L⁻¹) da DQO afluyente indica que a maior parte das observações se concentrou em torno da região central da distribuição, embora tenham sido registrados valores elevados, atingindo 1.772,0 mg O₂ L⁻¹. No efluente tratado, a maior diferença entre média, mediana e valor máximo mostra maior influência de eventos extremos sobre a distribuição dos resultados.

A DQO afluyente apresentou média de 779,89 mg O₂ L⁻¹, com variação entre 328,0 e 1.772,0 mg O₂ L⁻¹ e coeficiente de variação de 23,9%, caracterizando variabilidade moderada. Segundo Von Sperling (2014), a DQO de esgotos domésticos normalmente varia entre aproximadamente 250 e 1.000 mg O₂ L⁻¹, enquanto Metcalf & Eddy (2016) apresentam faixa semelhante para esgotos sanitários. Dessa forma, a concentração média observada na ETE

Uberabinha situa-se na faixa superior dos valores típicos descritos na literatura, indicando uma concentração de DQO relativamente elevada no afluente.

A DQO efluente apresentou média de 378,10 mg O₂ L⁻¹, variando entre 116,05 e 1.372,40 mg O₂ L⁻¹, com coeficiente de variação de 43,39%. Embora esse coeficiente seja superior ao observado no afluente, essa diferença deve ser interpretada com cautela, pois, em séries com menores concentrações médias, uma mesma variação em mg O₂ L⁻¹ representa uma variação percentual maior. Ainda assim, a ocorrência de valores elevados em algumas campanhas demonstra que o desempenho do sistema variou ao longo do período de monitoramento, comportamento esperado em estações de tratamento em operação contínua, sujeitas às variações naturais das características do esgoto afluente e das condições operacionais.

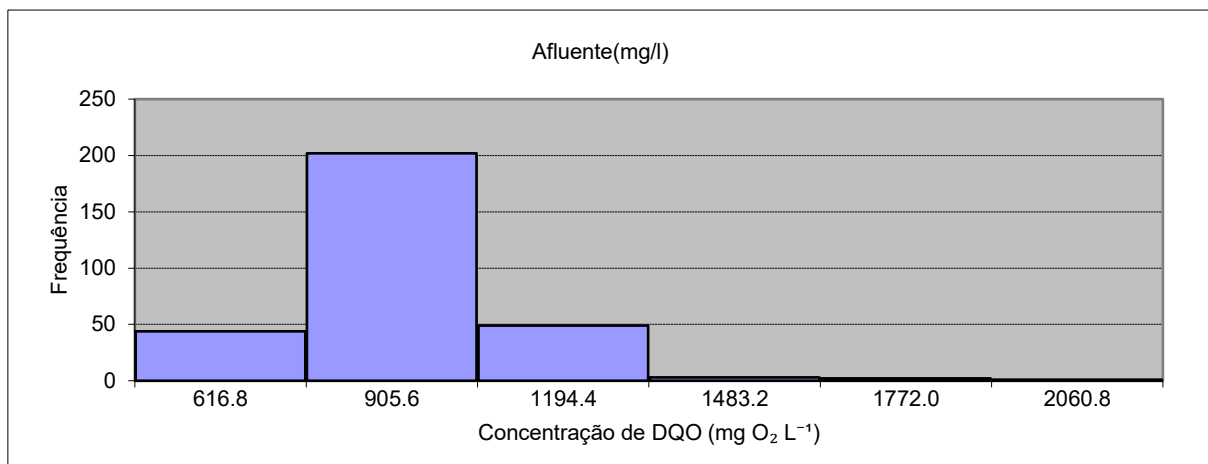
A eficiência aparente média de remoção da DQO foi de 50,79%, com mediana de 53,11% e ampla variação entre as campanhas, incluindo valores negativos e eficiência máxima de 84,54%. Essa dispersão evidencia que o desempenho da estação não foi uniforme ao longo de toda a série histórica. Embora a eficiência média observada tenha ficado abaixo da faixa típica de 55 a 70% reportada para reatores UASB tratando esgotos domésticos (VON SPERLING, 2014), esse resultado representa o comportamento médio de uma série histórica de longo prazo, sujeita a variações nas características do afluente, nas condições operacionais e às incertezas associadas ao processo de amostragem.

As eficiências negativas correspondem a situações pontuais em que a concentração de DQO no efluente foi superior à do afluente na mesma campanha, podendo estar relacionadas às limitações inerentes às amostragens pontuais, às variações das características do esgoto e às condições operacionais observadas no momento da coleta.

5.1.1. Distribuição estatística das concentrações de DQO

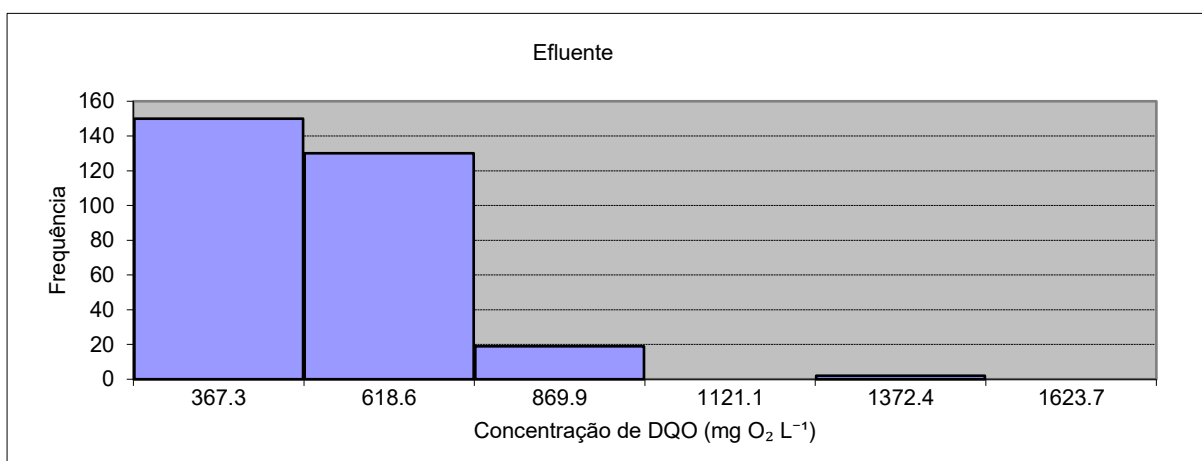
A distribuição das concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi analisada por meio de histogramas e distribuições de frequência (Figuras 6 e 7), complementando as informações obtidas pelas medidas de tendência central e dispersão.

Figura 6 – Histogramas de frequência das concentrações de DQO do afluente.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Figura 7 – Histogramas de frequência das concentrações de DQO do efluente.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

No afluente, observou-se maior concentração das amostras nas classes intermediárias de DQO, próximas ao valor médio da série histórica (Figura 6). À medida que as concentrações aumentaram, a frequência de ocorrência diminuiu gradativamente, indicando que os valores mais elevados corresponderam a eventos pontuais. Esse comportamento é coerente com a proximidade entre média e mediana observada na estatística descritiva e reforça a interpretação de que, apesar da ampla faixa de variação registrada, a maior parte das campanhas apresentou cargas orgânicas relativamente próximas do comportamento predominante da série.

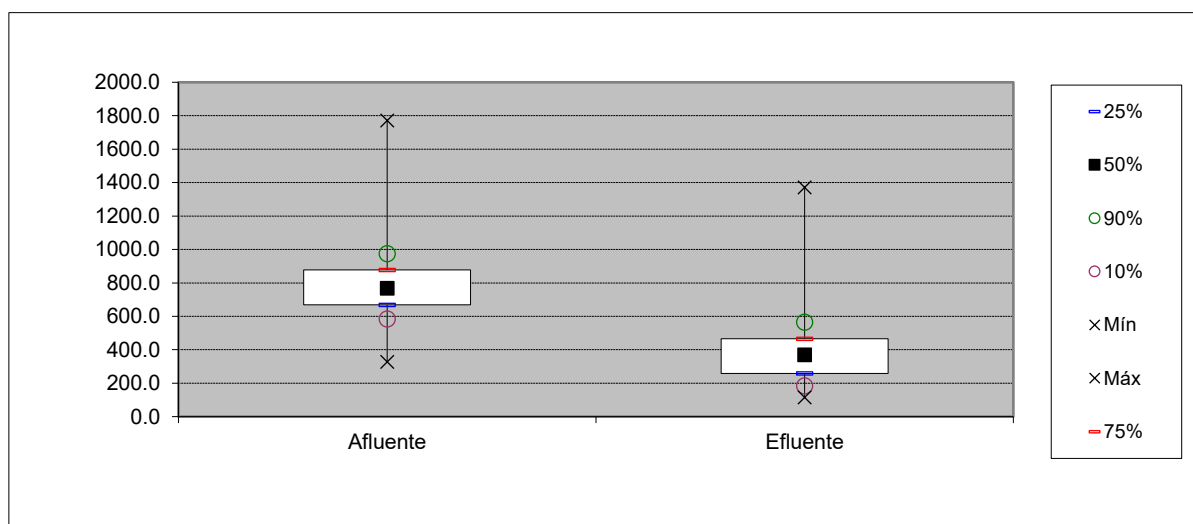
No efluente tratado, os histogramas evidenciaram uma distribuição mais dispersa das concentrações de DQO, compatível com o maior coeficiente de variação obtido para essa variável (Figura 7). Essa característica indica que a resposta do sistema de tratamento

apresentou maior variabilidade do que a carga orgânica afluyente, refletindo a influência das condições operacionais sobre o desempenho dos reatores ao longo do período monitorado.

Embora tenham sido registrados valores extremos tanto no afluyente quanto no efluente, sua baixa frequência demonstra que esses episódios não representaram o comportamento predominante da estação. A distribuição das observações permaneceu concentrada nas classes centrais, indicando relativa estabilidade do sistema durante a maior parte das campanhas de monitoramento. Dessa forma, a análise da distribuição de frequência amplia a interpretação das estatísticas descritivas ao evidenciar como as concentrações de DQO se comportaram ao longo de toda a série histórica, distinguindo eventos isolados do padrão operacional predominante observado na ETE Uberabinha.

Os diagramas de caixa (gráfico *boxplot*) reforçam essa interpretação ao evidenciar a presença de valores extremos acima do limite superior da distribuição. Conforme estabelecido na metodologia, esses registros foram mantidos na análise por apresentarem consistência laboratorial e representarem condições efetivamente observadas durante a operação da ETE Uberabinha.

Figura 8 - Gráfico *Boxplot* das concentrações de DQO afluyente e efluente.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

É importante destacar que a ocorrência de concentrações elevadas de DQO não permite, por si só, identificar sua origem. Embora cargas orgânicas elevadas possam estar associadas a diferentes fatores operacionais, incluindo contribuições não domésticas, os dados disponíveis não possibilitam estabelecer essa relação de forma direta. Qualquer inferência nesse sentido extrapolaria as evidências produzidas pela pesquisa.

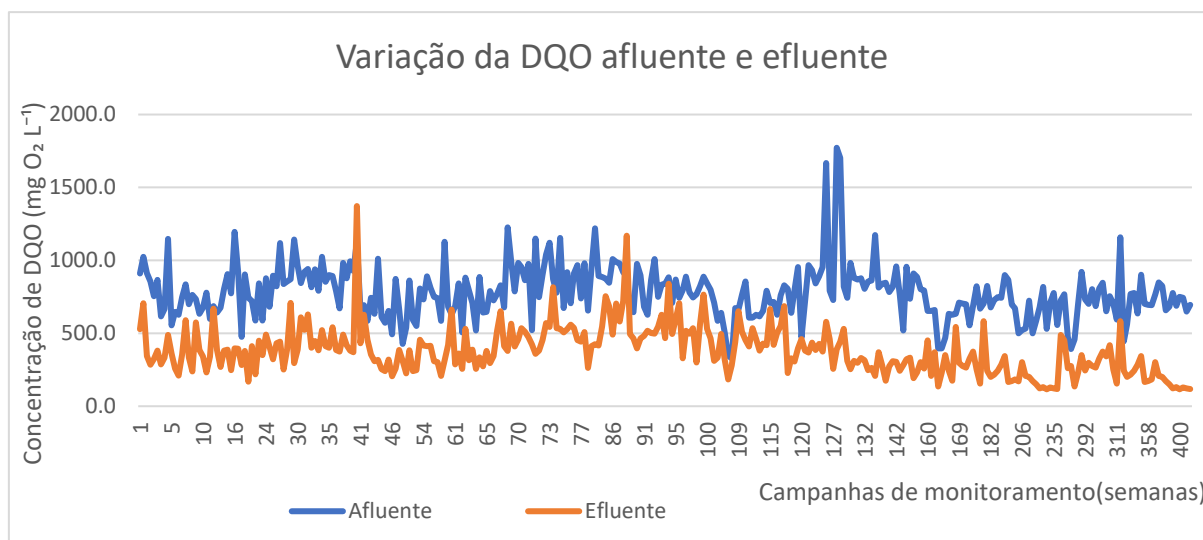
Sob a perspectiva operacional, episódios de concentrações elevadas de DQO afluente merecem atenção, pois refletem condições de alimentação potencialmente mais exigentes para os reatores anaeróbios. Conforme discutido por Chernicharo (2007), alterações nas características do afluente podem influenciar a estabilidade operacional de reatores UASB, especialmente quando ocorrem de forma abrupta.

Dessa forma, os resultados obtidos caracterizam um sistema submetido a condições variáveis de alimentação, porém sem evidências de comportamento atípico em relação ao esperado para estações de tratamento de esgoto operando em condições reais.

5.1.2 Comportamento temporal da DQO e estabilidade operacional

As séries temporais permitiram acompanhar a evolução das concentrações de DQO afluente e efluente ao longo do período de monitoramento da ETE Uberabinha.

Figura 9 - Variação da DQO afluente e efluente ao longo das campanhas



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Foram observadas oscilações nas concentrações de DQO afluente durante toda a série histórica, destacam-se, na série, comportamentos atípicos nas semanas 40 e 128. Na semana 40, correspondente ao registro de 06/10/2014, a DQO afluente foi de 1.131,6 mg O₂ L⁻¹, enquanto a DQO efluente atingiu 1.372,4 mg O₂ L⁻¹, resultando em eficiência de remoção de aproximadamente -21,3%. Esse resultado indica que, nessa campanha, a concentração de DQO medida no efluente foi superior à observada no afluente. Em contraste, na semana 128, correspondente aos registros de 10/06/2016, foram observadas as maiores concentrações de DQO afluente da série, de 1.772,0 e 1.702,2 mg O₂ L⁻¹, enquanto as concentrações efluentes

foram de 389,6 e 442,5 mg O₂ L⁻¹, respectivamente, correspondendo a eficiências de remoção de aproximadamente 78,0% e 74,0%.

Assim, enquanto a semana 40 representa uma ocorrência pontual em que a concentração de DQO efluente superou a afluenta, a semana 128 evidencia que uma elevada concentração afluenta não resultou em redução da eficiência de remoção naquela campanha. Na ausência de registros operacionais complementares, não é possível atribuir causas específicas a esses comportamentos. Entretanto, a análise das médias anuais apresentada na Tabela 2 evidencia uma mudança no comportamento do desempenho operacional ao longo dos anos.

Tabela 2 – Médias anuais da DQO afluenta, DQO efluente e eficiência de remoção da estação de tratamento de esgotos no período de 2014 a 2021.

Ano	n	DQO afluenta mg O₂L⁻¹	DQO efluente mg O₂L⁻¹	Eficiência média %
2014	81	788,28	396,32	49,37
2015	84	832,75	483,54	41,07
2016	60	813,92	371,51	50,61
2017	30	660,32	272,63	57,54
2018	13	613,08	205,45	65,23
2019	12	742,38	294,42	60,50
2020	11	736,53	267,59	63,81
2021	10	731,93	147,09	79,95

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nos anos iniciais do período analisado, correspondentes a 2014 e 2015, foram registradas as menores eficiências médias de remoção de DQO, com valores de 49,37% e 41,07%, respectivamente. A partir de 2016, observa-se recuperação gradual do desempenho, com aumento da eficiência média para 50,61% em 2016, 57,54% em 2017 e 65,23% em 2018. Nos anos seguintes, apesar de pequenas oscilações, as eficiências permaneceram superiores às observadas no início da série, atingindo 79,95% em 2021.

Esse comportamento evidencia uma evolução positiva do desempenho da estação ao longo do período monitorado. A melhoria observada coincide temporalmente com o período posterior à implantação do Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos (PREMEND), que estabelece procedimentos de cadastramento, monitoramento e controle dos lançamentos industriais e comerciais na rede pública de esgotamento sanitário (DMAE, 2025). Entretanto, essa coincidência temporal não permite atribuir a evolução

observada ao programa, uma vez que não estão disponíveis dados anteriores à sua implantação nem informações individualizadas sobre os lançamentos monitorados.

No efluente tratado, as concentrações de DQO apresentaram redução progressiva nas médias anuais, passando de 396,32 mg O₂ L⁻¹ em 2014 para 147,09 mg O₂ L⁻¹ em 2021. Esse comportamento acompanha o aumento das eficiências médias de remoção, indicando condições operacionais mais favoráveis nos anos finais da série histórica.

A análise temporal permite, portanto, identificar uma tendência visual de melhoria do desempenho operacional ao longo do período avaliado. Contudo, como não foram aplicados testes estatísticos específicos para detecção de tendências, essa interpretação deve ser considerada descritiva. Assim, o PREMEND deve ser interpretado como parte do contexto institucional de gestão do sistema de esgotamento sanitário, e não como uma variável diretamente avaliada neste estudo.

5.2 Análise da carga orgânica de DQO, vazão e eficiência da ETE

A avaliação da carga orgânica complementou a análise das concentrações de DQO, uma vez que incorpora a influência da vazão na determinação da massa de matéria orgânica transportada ao longo do tempo. Para o cálculo, foram utilizados os 293 registros que apresentavam simultaneamente dados de DQO e vazão. Os oito registros sem informação de vazão foram mantidos na análise de concentração e eficiência, mas não puderam ser utilizados no cálculo da carga.

A carga de DQO foi calculada pela seguinte equação:

$$C_DQO = DQO \times Q \times 0,0864$$

Em que:

C_DQO= carga de DQO (kg/d);

DQO= concentração de DQO (mg/L);

Q= vazão (L/s);

0,0864= fator de conversão das unidades para kg/d

Tabela 3 – Estatísticas das cargas de DQO nas 293 campanhas.

Indicador	Carga afluyente (kg DQO/d)	Carga efluente (kg DQO/d)
Média	97479,0	47.970,3
Mediana	94593,7	46980,0
Mínimo	27443,6	6016,0
Máximo	216331,4	171934,3
Desvio-padrão	26166,2	21520,3
CV	26,8%	44,9%
P25	79170,4	32918,4
P75	110471,9	59875,2
P90	128400,1	73848,3

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A carga afluyente apresentou média aritmética de 97.479 kg DQO/d, variando entre 27.444 e 216.331 kg DQO/d, enquanto a carga efluente apresentou média aritmética de 47.970 kg DQO/d, com valores entre 6.016 e 171.934 kg DQO/d. Essas estimativas foram obtidas apenas para os 293 registros com vazão disponível.

A amplitude observada demonstra que a carga orgânica recebida pela ETE variou ao longo do período analisado. Essa variação resulta da combinação entre a concentração de DQO e a vazão, uma vez que uma concentração elevada não necessariamente corresponde à maior carga quando associada a uma vazão reduzida. Dessa forma, a análise da carga fornece uma avaliação complementar à concentração, permitindo estimar a quantidade de matéria orgânica efetivamente encaminhada ao sistema de tratamento.

Foi observado valor negativo para a carga removida em alguns registros. Esse resultado ocorre quando a carga calculada no efluente supera a carga calculada no afluyente e pode estar relacionado à variabilidade das vazões e concentrações, à representatividade temporal das medições e às características do procedimento de amostragem. Portanto, esses valores foram mantidos na análise, sem exclusão arbitrária, devendo ser interpretados considerando as limitações dos dados disponíveis.

A ampla variação da carga orgânica afluyente observada ao longo da série histórica indica que o sistema foi submetido a diferentes condições de alimentação. Segundo Chernicharo (2007), alterações na carga aplicada podem influenciar o desempenho de reatores UASB, especialmente quando ocorrem de forma significativa, exigindo maior capacidade de adaptação da biomassa anaeróbia. Assim, uma hipótese para parte das menores eficiências observadas é que períodos de maior carga orgânica aplicada aos reatores tenham imposto condições operacionais mais exigentes ao sistema. Entretanto, essa hipótese não pode ser confirmada neste estudo, uma vez que parâmetros operacionais, como o tempo de detenção hidráulica e características da biomassa, não foram avaliados.

A análise conjunta da vazão, DQO afluente, DQO efluente e eficiência de remoção foi realizada com 293 registros completos. A vazão apresentou média de $1.453,3 \text{ L s}^{-1}$, mediana de 1.450 L s^{-1} , valores entre 600 e 2.600 L s^{-1} e coeficiente de variação de 15,9%. As correlações de Pearson entre vazão e DQO afluente ($r = -0,145$), vazão e DQO efluente ($r = 0,049$) e vazão e eficiência ($r = -0,192$) indicaram fraca associação linear. Esses resultados sugerem que a vazão, isoladamente, não explica a variabilidade observada nas concentrações de DQO nem na eficiência de remoção, indicando a influência de outros fatores operacionais.

Com base na vazão média da ETE e considerando a distribuição uniforme entre os 12 reatores UASB em operação, foi estimada a carga orgânica média aplicada a cada reator, bem como a carga orgânica volumétrica (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores médios de vazão, DQO, carga orgânica e carga orgânica volumétrica na ETE Uberabinha

Ponto de avaliação	Vazão média (L/s)	DQO média (mg O ₂ /L)	Carga orgânica média (kg DQO/dia)	Carga orgânica volumétrica (kg DQO·m ⁻³ ·dia ⁻¹)
Entrada da ETE	1.453,32	779,89	97.479,03	Não se aplica
Entrada de cada reator UASB	121,11	779,89	8.123,25	1,49
Saída de cada reator UASB	121,11	378,10	3.997,52	0,73

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Considerando o volume útil aproximado de 5.450 m^3 de cada reator UASB (DMAE, 2023), estimou-se uma carga orgânica volumétrica média de $1,49 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$. Segundo Chernicharo (2007), para reatores UASB tratando esgotos sanitários valores da ordem de 2,5 a $3,5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ são frequentemente adotados como referência para o dimensionamento de reatores UASB destinados ao tratamento de esgotos domésticos, podendo ocorrer variações conforme as características do afluente, temperatura, tempo de detenção hidráulica (TDH) e condições de operação do sistema. Cargas superiores à capacidade de assimilação da biomassa podem comprometer o desempenho do reator, enquanto cargas muito reduzidas podem resultar em menor aproveitamento da capacidade instalada.

A carga hidráulica aplicada também exerce influência sobre o comportamento do reator, pois está relacionada ao tempo de detenção hidráulica e à velocidade ascensional do esgoto no

interior da unidade. De acordo com Chernicharo (2007), reatores UASB para esgotos domésticos normalmente operam com tempos de detenção hidráulica entre aproximadamente 6 e 10 horas, dependendo da vazão e das condições de projeto. Reduções excessivas desse tempo podem favorecer o arraste de sólidos e comprometer a retenção da biomassa anaeróbia.

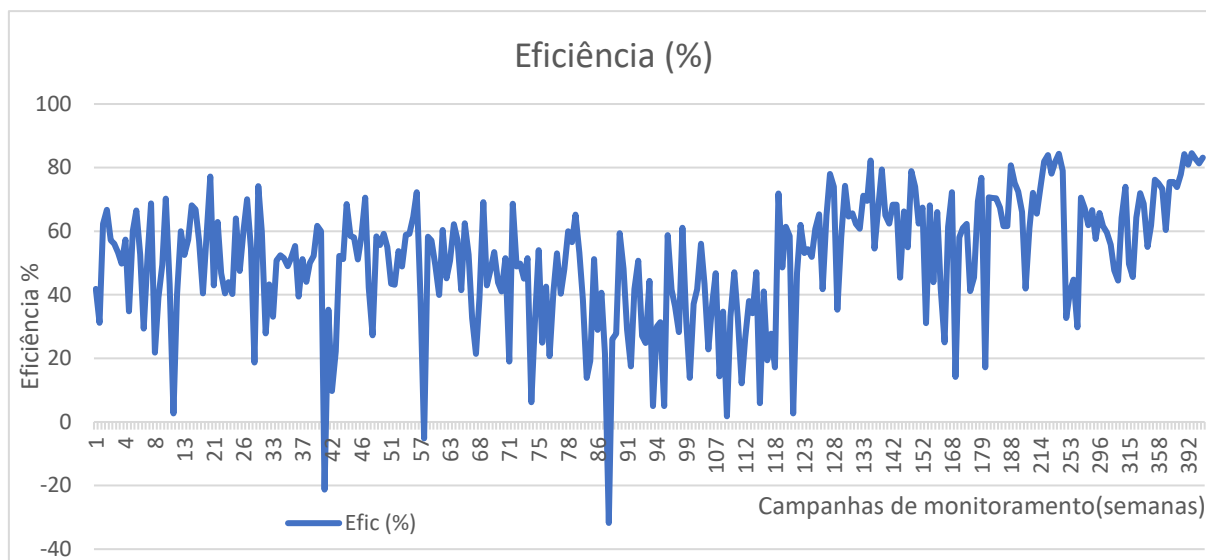
Assim, a carga orgânica volumétrica média estimada para a ETE Uberabinha situou-se abaixo da faixa de referência apresentada por Chernicharo (2007), indicando uma condição média de aplicação de carga inferior aos valores frequentemente considerados em projeto para reatores UASB. Ressalta-se, entretanto, que essa estimativa representa uma condição média histórica de operação de vazão e DQO e, portanto, não representa as oscilações temporais da carga aplicada ao longo da série histórica.

A interpretação desses resultados deve considerar que as concentrações de DQO e o desempenho da ETE podem ser influenciados por múltiplos fatores, como a composição do afluente, as condições hidráulicas, a carga orgânica aplicada, a temperatura, a biomassa e a incerteza analítica. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como uma avaliação integrada do comportamento do sistema, sem estabelecer relações diretas de causa e efeito entre as variáveis analisadas.

5.3 Eficiência de remoção da Demanda Química de Oxigênio e Limite Permitido para Lançamento.

A eficiência de remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi calculada para os 301 registros válidos da série histórica, utilizando as concentrações de DQO do afluente e do efluente obtidas em cada campanha de monitoramento (Figura 10).

Figura 10 – Eficiência de remoção de DQO na ETE Uberabinha.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A eficiência média observada foi de 50,79%, com valores variando entre -31,76% e 84,54%, desvio-padrão de 19,52 pontos percentuais e coeficiente de variação de 38,4% (Tabela 1). Em comparação com a variabilidade observada para a DQO afluente, o maior coeficiente de variação indica que a eficiência de remoção apresentou maior variabilidade relativa do que a concentração de DQO afluente ao longo do período analisado.

Essa variabilidade é esperada em sistemas biológicos de tratamento de esgoto operando em escala real. Conforme destaca Marcos von Sperling (2014), a eficiência de reatores anaeróbios do tipo UASB depende da interação entre diversos fatores, como a carga orgânica aplicada, o tempo de detenção hidráulica, a temperatura, a atividade microbológica e as características do afluente. Assim, oscilações nesses fatores podem resultar em diferenças significativas na capacidade de remoção da matéria orgânica entre campanhas de monitoramento.

Embora a eficiência média indique que a estação promoveu remoção de matéria orgânica ao longo da série histórica, a amplitude observada demonstra que esse desempenho não foi uniforme. Em algumas campanhas foram registrados percentuais elevados de remoção, enquanto em outras ocorreram reduções acentuadas da eficiência, refletindo a dinâmica operacional característica de sistemas submetidos a variações naturais de carga e vazão.

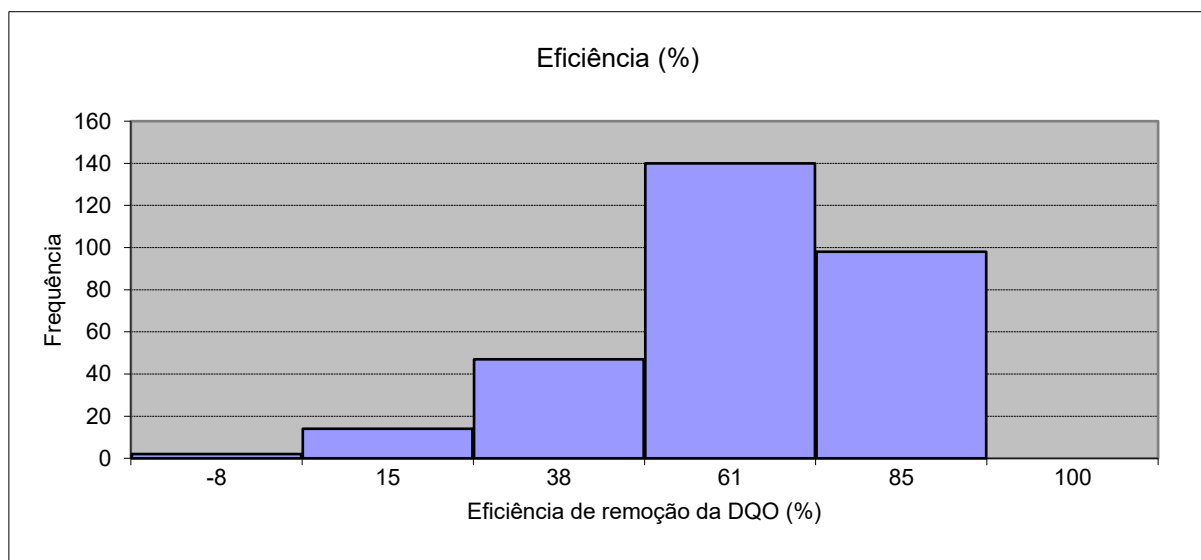
Entre os resultados obtidos, destacam-se os registros de eficiência negativa, situação em que a concentração de DQO determinada no efluente foi superior à observada no afluente. Esses casos foram preservados na base de dados por atenderem aos critérios de validação definidos na metodologia e apresentarem consistência laboratorial.

A ocorrência de valores de DQO e eficiência de remoção que não seguem o comportamento esperado não indica, necessariamente, uma perda permanente de desempenho do tratamento. Em reatores anaeróbios, alterações temporárias nas condições hidráulicas, ressuspensão de sólidos e arraste de biomassa podem influenciar os resultados obtidos (Chernicharo, 2007). Além disso, diferenças entre os momentos de coleta e a variabilidade dos procedimentos analíticos também podem afetar a comparação entre os registros. Como a base histórica não permite identificar a contribuição de cada fator em situações específicas, não foram estabelecidas relações de causalidade.

Em conjunto, os resultados indicam que o desempenho da ETE Uberabinha foi influenciado pelas condições operacionais observadas durante o monitoramento, mantendo capacidade de remoção da matéria orgânica ao longo da série histórica, embora com oscilações compatíveis com a operação de sistemas biológicos em condições reais.

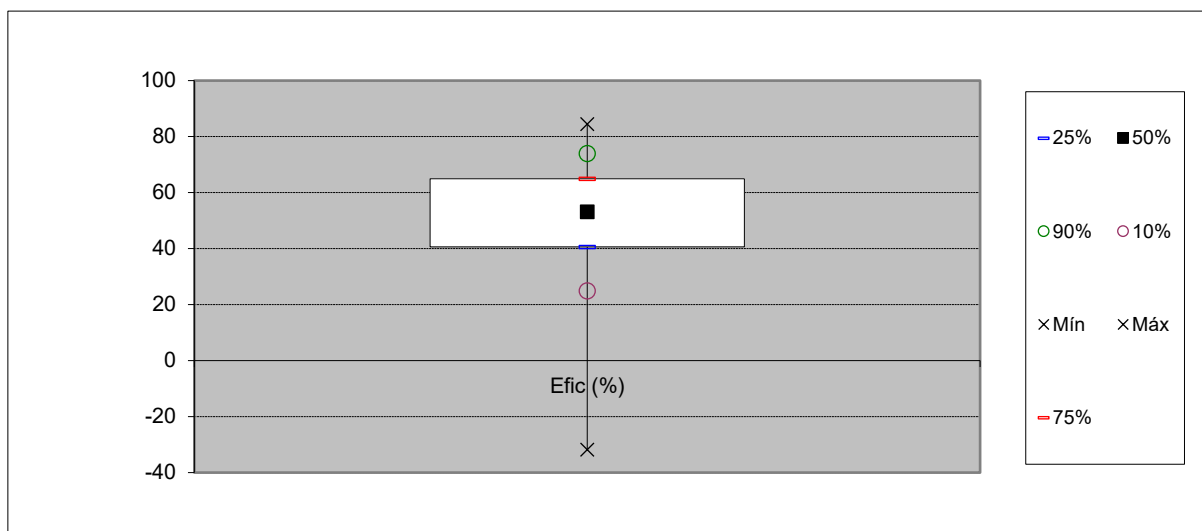
A análise da distribuição da eficiência de remoção complementa a interpretação fornecida pelas estatísticas descritivas, permitindo compreender como o desempenho operacional se distribuiu ao longo das diferentes campanhas de monitoramento.

Figura 11 – Histograma da distribuição de frequência da eficiência



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Figura 12 – Diagramas de caixa da eficiência de remoção de DQO.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Os histogramas evidenciaram concentração predominante dos resultados em faixas intermediárias de eficiência, próximas ao valor médio da série histórica. À medida que os percentuais de remoção se afastaram dessa faixa central, observou-se redução da frequência de ocorrência, indicando que desempenhos muito elevados ou muito reduzidos corresponderam a situações menos frequentes.

Essa distribuição sugere que, apesar das oscilações registradas ao longo do período analisado, a maior parte das campanhas apresentou comportamento operacional relativamente consistente. Assim, os valores extremos devem ser interpretados como eventos específicos do funcionamento da estação e não como representação do desempenho predominante do sistema.

Os diagramas de caixa (*boxplots*) reforçam essa interpretação ao evidenciarem a presença de valores discrepantes, principalmente associados às menores eficiências de remoção. Conforme estabelecido na metodologia, esses registros foram mantidos nas análises por representarem condições efetivamente observadas durante a operação da ETE Uberabinha e não apresentarem indícios de inconsistência laboratorial.

Quando analisadas em conjunto, as distribuições de frequência, os histogramas e os *boxplots* indicam a ocorrência de oscilações e de valores extremos ao longo da série histórica. Como não foram aplicados testes formais de tendência, não é possível afirmar a existência ou a ausência de mudanças permanentes no comportamento operacional somente com base na inspeção gráfica.

Sob a perspectiva da gestão operacional, esse resultado reforça a importância da utilização de séries históricas para avaliação do desempenho de estações de tratamento. Conforme discutido por Metcalf e Eddy (2016), análises baseadas em um conjunto amplo de

observações podem auxiliar na distinção entre eventos ocasionais e o comportamento predominante do sistema, fornecendo subsídios mais consistentes para a tomada de decisões operacionais.

Além da eficiência de remoção da matéria orgânica, avaliou-se a DQO do efluente tratado à luz da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 8, de 21 de novembro de 2022, referência ambiental vigente em Minas Gerais para lançamento direto de efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários. A comparação foi realizada com base nessa norma porque a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, embora estabeleça condições e padrões para o lançamento de efluentes, não fixa limite de concentração para a Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Enquanto a eficiência de remoção representa a capacidade relativa do sistema em reduzir a carga orgânica afluente, a concentração final de DQO expressa diretamente a qualidade do efluente produzido. Embora relacionados, esses indicadores avaliam aspectos distintos do desempenho operacional e, por isso, devem ser interpretados de forma complementar.

Na série analisada, 28 dos 301 resultados de DQO do efluente foram iguais ou inferiores a 180 mg L^{-1} , correspondendo a 9,30% das campanhas. Esse cálculo é apresentado como comparação técnica com a referência vigente e não como declaração de conformidade legal histórica, pois os dados foram produzidos entre 2014 e 2021.

A média de DQO do afluente foi de aproximadamente $779,89 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, indicando que a ETE Uberabinha recebeu esgoto com concentração de matéria orgânica relativamente elevada ao longo da série histórica. Nessas condições, mesmo quando ocorre remoção significativa da matéria orgânica, a concentração remanescente no efluente pode permanecer elevada.

Além disso, reatores anaeróbios do tipo UASB apresentam reconhecida eficiência na remoção de matéria orgânica, porém normalmente produzem efluentes que necessitam de etapa complementar de pós-tratamento para alcançar padrões mais restritivos de qualidade (CHERNICHARO, 2007; VON SPERLING, 2014).

Sob a perspectiva operacional, esse resultado reforça a importância do monitoramento sistemático da qualidade do efluente e da análise anual da eficiência de remoção, conforme o critério alternativo previsto na norma vigente. O acompanhamento contínuo permite identificar períodos críticos e subsidiar decisões voltadas ao aperfeiçoamento da operação da estação.

5.4 Síntese dos resultados

A análise dos dados permitiu caracterizar, de forma descritiva, a variabilidade da DQO, da carga afluente estimada e do desempenho da ETE Uberabinha entre janeiro de 2014 e setembro de 2021. A DQO afluente apresentou variabilidade moderada, enquanto as séries temporais evidenciaram oscilações ao longo do período; a identificação de tendências estatisticamente significativas requer análise específica.

A análise da carga de DQO complementou a avaliação das concentrações, ao considerar conjuntamente a DQO e a vazão afluente. A eficiência média de remoção foi de 50,79%, com variações entre as campanhas e ocorrência pontual de valores negativos, indicando que o desempenho do sistema não foi uniforme durante todo o período analisado.

A comparação com o valor de referência de $180 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ mostrou que 9,30% das campanhas apresentaram concentrações de DQO efluente iguais ou inferiores a esse valor. Entretanto, por se tratar de referência posterior ao período analisado, esse resultado possui caráter comparativo e não representa avaliação de conformidade legal histórica.

De modo geral, a integração das análises estatísticas e temporais permitiu caracterizar a variabilidade da DQO, da carga afluente e do desempenho operacional da ETE Uberabinha, fornecendo uma base histórica para o acompanhamento do sistema e o aperfeiçoamento do monitoramento operacional.

6. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade temporal da carga orgânica afluente à ETE Uberabinha, utilizando a DQO e a vazão como indicadores da qualidade do afluente e a vazão como variável operacional para o cálculo da carga orgânica, a partir de séries históricas do laboratório operacional. Foram também descritos indicadores de desempenho do sistema de tratamento. O PREMEND foi considerado exclusivamente como contexto institucional relacionado ao controle de efluentes não domésticos, pois a base disponível não possibilita avaliar seu efeito específico sobre a variabilidade da carga orgânica.

Os resultados obtidos a partir da análise de 301 registros laboratoriais indicaram que a concentração de DQO afluente apresentou variabilidade moderada ao longo do período estudado. Nos 293 registros que apresentavam dados de vazão, o cálculo da carga de DQO permitiu complementar essa avaliação considerando a massa estimada de matéria oxidável recebida pela estação, com predominância de valores em faixas específicas, embora com ocorrência de eventos extremos pontuais. Esse comportamento evidencia a dinâmica dos

sistemas de esgotamento sanitário em escala real, nos quais a carga afluyente pode variar em função de fatores urbanos, hidráulicos e operacionais.

No que se refere ao desempenho do tratamento, observou-se eficiência média de remoção da DQO de 50,79%, com ampla variação entre as campanhas de monitoramento. Embora a estação tenha apresentado capacidade de remoção da matéria orgânica ao longo da série histórica, o desempenho não se manteve uniforme entre as campanhas, evidenciando variação no comportamento do sistema ao longo do período analisado.

A análise temporal foi exploratória e não incluiu testes formais de tendência ou de mudança estrutural; portanto, não permite afirmar a presença ou a ausência de tendência estatisticamente significativa.

A vazão apresentou menor variabilidade relativa que a DQO, enquanto as associações lineares entre a vazão, as concentrações de DQO e a eficiência de remoção foram fracas. Esses resultados indicam que a vazão, isoladamente, não apresentou associação linear relevante com essas variáveis, devendo outros fatores ser considerados na interpretação do comportamento do sistema.

Como análise complementar, observou-se que 9,30% das campanhas apresentaram concentração de DQO igual ou inferior ao valor de referência de $180 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ estabelecido pela DN COPAM/CERH-MG nº 8/2022. Como a série histórica analisada é anterior à publicação dessa norma, esse resultado não caracteriza, por si só, uma avaliação de conformidade legal histórica.

De forma geral, a integração entre estatística descritiva, análise da distribuição dos dados e séries temporais permitiu caracterizar a variabilidade da carga orgânica afluyente e o comportamento operacional da ETE Uberabinha de maneira mais abrangente do que a análise baseada exclusivamente em valores médios, evidenciando a ocorrência de eventos extremos e a predominância de determinadas faixas de concentração ao longo da série histórica.

A incorporação da análise da carga de DQO constituiu um dos principais avanços deste estudo, por possibilitar uma avaliação complementar à análise baseada exclusivamente na concentração. Essa abordagem permitiu integrar a influência da vazão e da concentração na caracterização da carga orgânica afluyente, fornecendo uma interpretação mais representativa das condições operacionais da ETE Uberabinha e ampliando o potencial de utilização das séries históricas como ferramenta de apoio à gestão operacional.

As conclusões devem ser interpretadas considerando as limitações do estudo, especialmente a utilização de dados provenientes de uma única estação e a indisponibilidade de

informações que permitissem identificar individualmente a contribuição de fontes específicas de efluentes não domésticos ou avaliar os efeitos do PREMEND.

Por fim, conclui-se que o uso de séries históricas provenientes do monitoramento operacional constitui uma ferramenta tecnicamente relevante para a avaliação descritiva de sistemas de tratamento de esgotos. Além de contribuir para a caracterização da variabilidade temporal da ETE Uberabinha, a integração entre dados de concentração, vazão e carga orgânica demonstrou o potencial dessas informações para subsidiar o acompanhamento do desempenho operacional, a identificação de eventos extremos e o aperfeiçoamento de estratégias de monitoramento e gestão de sistemas públicos de esgotamento sanitário, podendo ainda servir de base para futuras pesquisas em estações com características semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2021.
- BAZÍLIO, Ana Paula. **A efetividade do Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos à promoção da segurança hídrica ecossistêmica do Rio Uberabinha em Uberlândia**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia.
- BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, atualizada pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 2007.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes Não Domésticos – PREMEND**. Uberlândia, 2025.
- FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2015.
- JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental; Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação Normativa Conjunta **COPAM/CERH-MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Disponível em: <https://siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto** – visão geral. Brasília: Ministério das Cidades, 2023.
- UBERLÂNDIA. **Construção da estrutura do novo reator da ETE Uberabinha avança**. Uberlândia: Prefeitura Municipal de Uberlândia, 27 out. 2023. Disponível em: [Portal da Prefeitura de Uberlândia](#). Acesso em: 3 jul. 2026.
- UBERLÂNDIA. **Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE)**. *Dmae inova no tratamento de esgoto e investe em tecnologia sustentável*. Uberlândia, 22 abr. 2025. Disponível em: [Portal da Prefeitura de Uberlândia](#). Acesso em: 10 jul. 2026.
- VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.