

Proposta de índice de qualidade do esgoto sanitário para estações com a tecnologia lagoa de estabilização no município de Fortaleza/CE

- **Data de entrada:** 11/10/2022
- **Data de aprovação:** 06/07/2023

Proposal of a quality index for sanitary sewage for plants with waste stabilization ponds in the municipality of Fortaleza/CE

Helenamara Fonseca Sobrinho de Oliveira^{1*} | Ana Bárbara de Araújo Nunes¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.041>

ORCID ID

Oliveira HFS  <https://orcid.org/0000-0002-2711-8637>

Nunes ABA  <https://orcid.org/0000-0001-5845-6252>

Resumo

As Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), quando monitoradas e avaliadas adequadamente, desempenham papel fundamental na mitigação da escassez hídrica. Contudo, falhas operacionais ou sobrecargas podem resultar em despejos de efluentes que ultrapassam os limites legais, prejudicando os recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo avaliar o tratamento de água residuária de cinco ETEs que utilizam lagoas de estabilização entre 2016 e 2020. Foi empregada a técnica de Análise de Componentes Principais para criar um Índice de Qualidade do Esgoto Sanitário (IQES), classificando as estações em três categorias: insatisfatório, satisfatório e excelente, conforme a conformidade com as legislações ambientais. Dois destaques positivos foram observados, enquanto as demais estiveram abaixo dos padrões estabelecidos. Este estudo ressalta a importância da gestão eficiente das ETEs para preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Avaliação. Atendimento. Legislações. Índice. Lagoas de estabilização.

Abstract

Wastewater treatment plants (WWTPs), with the proper assessment and monitoring of their treatment processes, are important tools for mitigating water scarcity. However, under malfunctions or overloads, these stations can release their effluents in disagreement with the limits established in environmental legislation, thus compromising the health of water resources. This study aimed to build a Sanitary Sewage Quality Index (SSQI) as a tool to directly and objectively analyze effluent quality in relation to compliance with environmental legislation for their release. For this, five WWTPs that use waste stabilization ponds as treatment were chosen for an evaluation of their effluent monitoring data from 2016 to 2020. Principal component analysis was used to build the SSQI. The stations were classified according to compliance with environmental legislation into three classes: unsatisfactory, satisfactory, and excellent. The evaluated stations showed two positive highlights, which were in accordance with the established limits, whereas 60% of the evaluated stations were classified as having an unsatisfactory service.

Keywords: Evaluation. Service. Legislations. Index. Waste stabilization ponds.

¹ Universidade Federal do Ceará – Fortaleza – Ceará – Brasil

* **Autora correspondente:** 31.helena.oliveira.22@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O tratamento das águas residuais é um serviço essencial que resulta em melhorias para a saúde pública, reduzindo a mortalidade, os surtos de doenças e a poluição ambiental (Hughes *et al.*, 2021). Esse tratamento ocorre por meio das estações de tratamento de efluentes (ETEs) presentes em todo o mundo, promovendo condições sanitárias para aproximadamente 5,26 bilhões de pessoas (McCance *et al.*, 2022).

As ETEs são sistemas projetados que, embora resultem em melhorias, podem sofrer de mau funcionamento ou serem sobrecarregados para além de seus limites de projeto ou condições operacionais. Dessa forma, podem liberar descontroladamente água residual não devidamente tratada e ocasionar eventos de poluição no ambiente receptor, afetando as águas superficiais e subterrâneas e o solo (Clemens *et al.*, 2020; Hughes *et al.*, 2021).

Para evitar ou mitigar os impactos significativos decorrentes do lançamento de águas residuais em condições inadequadas, os sistemas de tratamento de efluentes devem ser acompanhados de monitoramento e gerenciamento contínuos. Esses processos devem ser conduzidos a fim de evitar potenciais poluições dos corpos hídricos e gerações de gases de efeito estufa (McCance *et al.*, 2022).

O monitoramento adequado dos processos das ETEs, quando aliado ao tratamento qualitativo de seus dados, pode resultar na construção de índices que auxiliarão a tomada de decisão quanto a saúde do corpo hídrico receptor (Gémar *et al.*, 2018). Há vários estudos que avaliaram índices de ETEs, abrangendo a avaliação e aprimoramento de seus processos, a determinação de indicadores quantitativos de desempenho ambiental das estações e a avaliação da sustentabilidade da qualidade dos efluentes (Çelekli; Şahin, 2021; Liu *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2019).

Nesse contexto, foram selecionadas ETEs localizadas em Fortaleza, Ceará, que operam com a tecnologia de lagoas de estabilização (LEs), visando a utilização de seus dados de monitoramento para a construção de um índice de qualidade do esgoto sanitário (IQES). As LEs são amplamente utilizadas no tratamento de esgoto sanitário no Brasil e têm como objetivo a mineralização do material orgânico presente no esgoto por meio da atividade metabólica de microrganismos (Santos, 2007). A proposta do IQES teve a finalidade de avaliar se os processos envolvidos no tratamento da água residual dessas estações estavam em acordo com as legislações ambientais de lançamento de efluentes. Dessa forma, o índice teria a função de auxiliar a tomada de decisão quanto ao lançamento desses efluentes.

2 METODOLOGIA

2.1 Localização e descrição da área de estudo

As ETEs selecionadas para este estudo estão localizadas na região metropolitana de Fortaleza, no estado do Ceará, e estão inseridas na bacia hidrográfica do rio Cocó. Essa bacia, em termos de esgotamento sanitário, é denominada Grande Bacia do Cocó e possui 24 sub-bacias de esgotamento sanitário (Fortaleza, 2014).

2.2 Estações de tratamento de efluentes e parâmetros selecionados

O sistema de esgotamento sanitário da capital cearense consiste no sistema integrado, que converge os efluentes para a estação de pré-condicionamento de esgoto (EPC), e nos sistemas isolados, que não estão interligados ao sistema integrado e têm como uma das destinações de seus efluentes as lagoas de estabilização (Fortaleza, 2014). Para este estudo, foram selecionadas cinco estações de tratamento de efluentes componentes do sistema isolado que operam com o tratamento de lagoas de estabilização (Tabela 1).

Tabela 1 – Estações de tratamento de efluentes selecionadas.

Tecnologia	Sigla	ETE
Lagoas de estabilização	LE	João Paulo II
		Conjunto Palmeiras
		São Cristóvão
		Tupã Mirim
		José Walter

A Unidade de Negócio Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE), da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), é responsável pelas estações selecionadas. Os dados de qualidade dos efluentes dessas estações para o período de 2016 a 2020 foram solicitados à Cagece pelo portal Ceará Transparente e disponibilizados em forma de relatórios. Em seguida, foram convertidos em planilhas do Excel para tratamento dos dados.

O critério para seleção dos parâmetros, por meio da análise dos relatórios, foi a quantidade de informações em número suficiente para a realização da análise de componentes principais (ACP). Logo, foram selecionados os componentes demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e *Escherichia coli* (E.coli).

Para avaliar os parâmetros presentes nas legislações de lançamento de efluentes, as concentrações de DQO foram convertidas em demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pois este é o parâmetro avaliado nas legislações ambientais. A conversão ocorreu com base em valores da literatura e valores obtidos nos relatórios disponibilizados pela Cagece, que apresentaram algumas análises envolvendo esses parâmetros. Os efluentes são oriundos de tratamento biológico, logo a relação DQO/DBO pode alcançar valores entre quatro e cinco (Von Sperling, 2014). A partir dos dados presentes nos relatórios, a relação se aproximou de quatro, sendo este o valor utilizado para a conversão.

As legislações de lançamento de efluentes que embasaram esta pesquisa foram a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama)

nº 430, de 13 de maio de 2011 (Brasil, 2011), e a Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (Coema) nº 2, de 2 de fevereiro de 2017 (Ceará, 2017).

2.3 Construção do índice de qualidade de esgoto sanitário

O IQES foi construído com a aplicação da ACP, que visa descrever a estrutura de variância e covariância de um conjunto de variáveis ou dimensões por meio de combinações lineares (Karimi; Sadeghnejad; Rezghi, 2021). Há diversos estudos relacionados às ETEs e a aplicação de ACP, que visaram a reconstrução de dados, avaliação das diferenças composicionais no esgoto gerado, dentre outros (Ebrahimi; Gerber; Rockaway, 2017; Newhart *et al.*, 2019).

Os testes de correlação das variáveis foram a primeira etapa da construção, executados por meio da avaliação da matriz de correlação (coeficientes > 0,3), do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ($\geq 0,5$) e do teste de Bartlett (BTS) ($p < 0,05$, estatisticamente significativa). Essa é uma etapa importante para a aplicação da ACP, pois variáveis estatisticamente independentes não geram agrupamentos para a formação de nenhum construto, ou seja, a construção de fatores não faz sentido (Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2010).

Todas as análises estatísticas foram executadas no software Jamovi 1.6. Os dados foram normalizados para redução dos erros, pois a ACP possui sensibilidade. Foram utilizados os valores das médias aritméticas para as análises de comparação e das médias semestrais para cada variável durante o período de análise, a fim de reduzir os ruídos nos conjuntos de dados.

As etapas de aplicação da ACP vão desde a construção da matriz de número de variáveis por número de amostras até o descarte de componentes principais (CPs) menos relevantes, como pode ser visualizado na Figura 1.

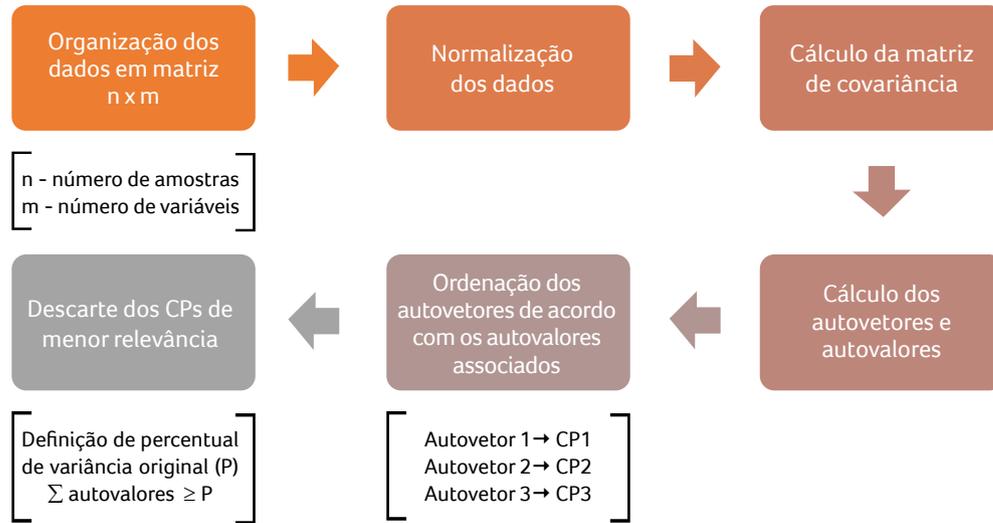


Figura 1 – Etapas da aplicação de ACP.

A extração do número de componentes foi realizada por meio do modelo de análise de fator, que utiliza a variância da combinação linear das variáveis observadas para a realização da extração de fatores (Palácio, 2004). A rotação dos fatores foi ortogonal, do tipo varimax, e buscou minimizar o número de variáveis com altas cargas em cada fator (Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2010).

Por fim, o IQES foi calculado com base no cálculo do índice de qualidade de água (IQA) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb, 2019) e construído por meio do produtório ponderado de seus parâmetros, como pode ser visualizado na Equação 1. Metodologia semelhante a desta pesquisa foi aplicada por Rolim (2016) ao construir seu índice de estado trófico baseado no produtório ponderado de seus parâmetros e com aplicação de ACP.

$$IQES = \prod_i^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Em que:

- q_i – Qualidade da i -ésima variável (valor entre 0 e 100, obtido pela concentração ou medida dos parâmetros);

- w_i – Peso da variável (valor entre 0 e 1); e
- $\sum w_i = 1$.

O peso de cada variável foi calculado de acordo com a Equação 2:

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^L F_l A_l^i}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^L F_l A_l} \quad (2)$$

Em que:

- F – Fatores extraídos para o modelo;
- A_l – Comunalidade de cada variável no fator; e
- L – Número de componentes.

A qualidade das variáveis (q_i) é um número adimensional entre 0 e 100, em que quanto mais próximo de 100 melhor seria a qualidade. Para avaliação da qualidade, foram definidas, para cada parâmetro selecionado, três faixas com base no atendimento da legislação de lançamento, sendo: 0 a 39,9 (insatisfatório); 40 a 69,9 (satisfatório); e 70 a 100 (excelente). A faixa “insatisfatório” consistiu no não atendimento aos parâmetros das legislações ambientais. Para a faixa “satisfatório”, os parâmetros foram atendidos e, finalmente,

para a “excelente”, os parâmetros também foram atendidos e suas concentrações foram significativamente inferiores aos valores das legislações ambientais.

Os limites definidos para cada faixa corresponderam às concentrações dos parâmetros (Tabela 2), que foram interpoladas para gerar uma nota de qualidade. A faixa “insatisfatório” foi construída com base em valores da literatura para o esgoto bruto, nos quais a qualidade do efluente se caracterizaria como não tratado ou tratado inadequadamente (Monteiro, 2009; Santos, 2007; Von Sperling, 2014). Os valores para a faixa “satisfatório” consistiram nos valores exigidos pelas legislações de lançamento. Para a faixa “excelente”, foram utilizadas concentrações inferiores em mais de 80% às concentrações definidas pelas legislações.

Tabela 2 – Faixas para a qualidade das variáveis (q).

Faixa	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	E.Coli (org/100 mL)
0 a 39,9	364 – 121	300 – 150,1	1,50E+04 – 5,01E+03
40 a 69,9	120 – 72,1	150 – 90,1	5,00E+03 – 3,00E+03
70 a 100	72 – 24	90 – 30	3,00E+03 – 1,00E+03

Para as concentrações superiores às limitadas para a faixa zero, suas notas de qualidade foram automaticamente consideradas iguais a zero. Para as concentrações inferiores às definidas para a faixa 100, as notas de qualidade foram, automaticamente, consideradas iguais a 100.

O IQES buscou avaliar qualitativamente, de forma direta e objetiva, os parâmetros estudados quanto às legislações ambientais de lançamento, apresentando uma metodologia inovadora. O levantamento dos índices relacionados ao esgotamento sanitário não identificou trabalhos semelhantes, pois os estudos encontrados avaliaram a produtividade ou desempenho das estações com base em indicadores relacionados a qualidade, operação e manutenção dos serviços (Lopes *et al.*, 2016; Molinos-Senante; Sala-Garrido; Hernández-

Sancho, 2016; Sabia *et al.*, 2020) ou construíram índices baseados apenas em parâmetros biológicos (Çelekli; Şahin, 2021), ou seja, não tratavam especificamente de parâmetros e do atendimento às legislações envolvidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de componentes principais e construção das equações do índice

Os testes de correlação entre as variáveis foram realizados como etapa inicial da aplicação da ACP, na qual todos indicaram associação entre os parâmetros.

Os parâmetros utilizados nesta pesquisa (DBO, SST e E.coli) também foram selecionados por outros pesquisadores como importantes indicadores da qualidade dos efluentes e para a construção de seus índices. Silva *et al.* (2021) os utilizou para a construção de índice de qualidade de água, e Molinos-Senante, Sala-Garrido e Hernández-Sancho (2016) para a construção de índice de produtividade de ETEs.

A aplicação da ACP gerou resultados que explicaram 66,9% da variação do conjunto de dados para a primeira componente principal (CP1). A partir da avaliação de seus resultados, foi realizada a ponderação das variáveis e construído o IQES, de acordo com a Equação 1, como pode ser visualizado na Equação 3.

$$IQES = q_{DBO}^{0,11} \cdot q_{SST}^{0,29} \cdot q_{E.coli}^{0,60} \quad (3)$$

Em que:

- q – Qualidade da variável.

O modelo com uma componente principal foi adequado para a representação das variáveis de acordo com a ACP, pois apresentou percentuais de explicação consideráveis. Apesar de poucas variáveis serem utilizadas neste estudo, foi possível alcançar tais percentuais e identificar os parâmetros que

mais contribuíram para a definição da qualidade dos efluentes. Estudo realizado por Droese *et al.* (2020), que aplicaram ACP, também promoveu a identificação das variáveis que mais contribuíram, não acarretando a redução do número de variáveis.

3.2 Índice de qualidade do esgoto sanitário

Os IQESs foram devidamente calculados para as ETEs selecionadas. Dentre elas, a ETE Conjunto Palmeiras (Figura 2) foi o destaque positivo, com todos seus parâmetros atendendo às legislações ambientais (Brasil, 2011; Ceará, 2017). Seus valores de IQES estiveram na faixa “excelente” (70 a 100) e apresentaram $IQES_{\text{médio}} = 88$.

Pesquisa realizada por Magalhães (2017) com estações operantes na capital cearense apresentou resultados semelhantes aos alcançados nesta pesquisa, com todas as amostras da estação Conjunto Palmeiras conformes ambientalmente

para o período analisado pelo autor. Rollemberg (2017) também identificou atendimento aos padrões de lançamento durante maior parte do tempo monitorado pelo pesquisador para essa estação. Logo, a ETE Conjunto Palmeiras apresentou resultados para seu IQES coerentes com a qualidade de seus parâmetros e com os estudos realizados com essa mesma estação.

A ETE Tupã Mirim, de maneira geral, foi classificada como “satisfatório” (40 a 69,9), com $IQES_{\text{médio}} = 57$ (Figura 3). No entanto, devido a análises pontuais de E.coli (primeiro semestre de 2018 e segundo semestre de 2019) que não atenderam aos limites de lançamento, alguns IQESs estiveram na faixa “insatisfatório” (zero a 39,9). Essa estação também apresentou resultados coerentes com os IQES gerados, e necessita de investigação sobre as razões que geraram concentrações de E.coli acima dos limites legalmente exigidos.

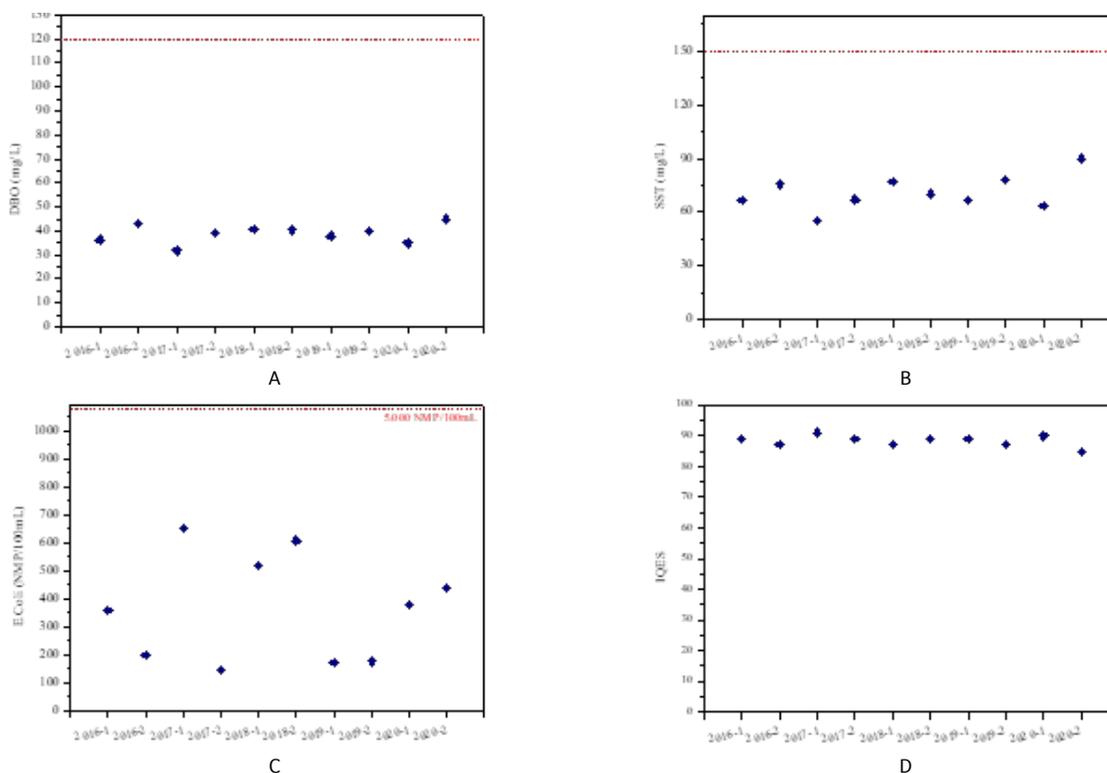


Figura 2 – Concentração média dos parâmetros DBO (A), SST (B) e E.coli (C) e IQES (D) para a ETE Conjunto Palmeiras.

Legenda: Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental.

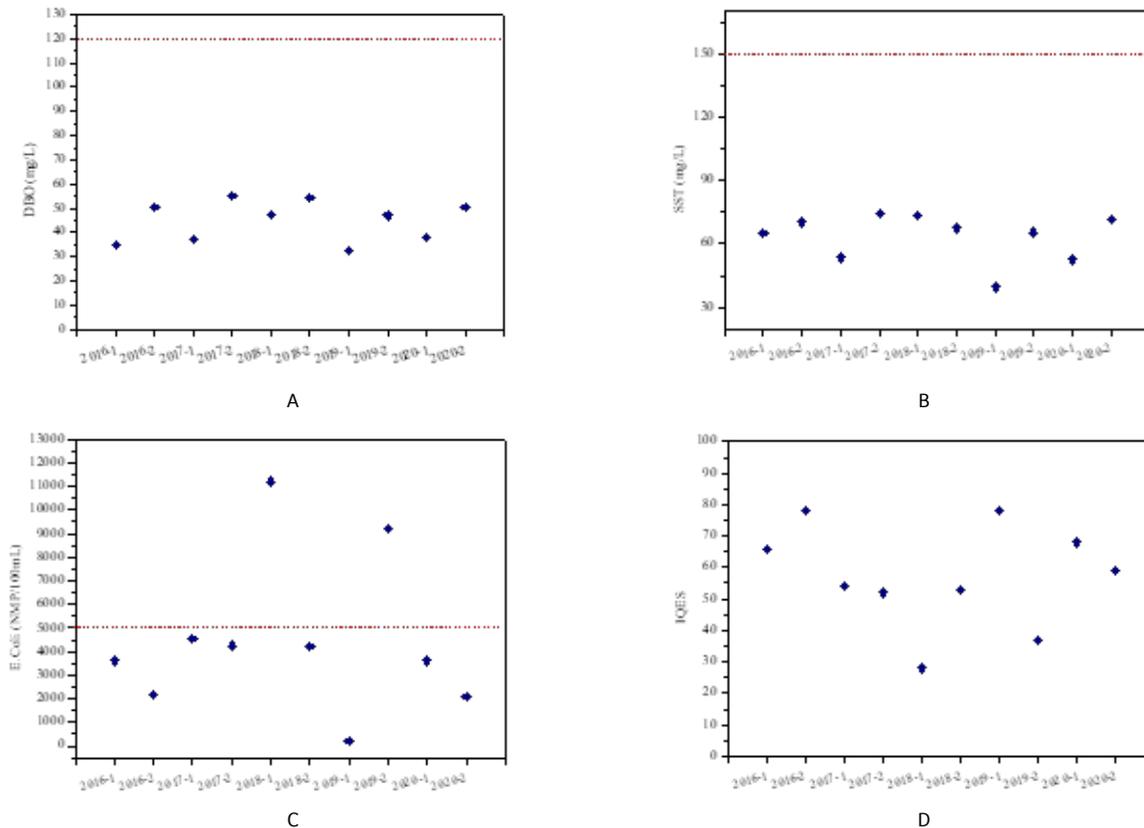


Figura 3 – Concentração média dos parâmetros DBO (A), SST (B) e E.coli (C) e IQES (D) para a ETE Tupã Mirim.

Legenda: Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental.

Os destaques negativos foram as ETES João Paulo II, São Cristóvão e José Walter. Para a estação João Paulo II, os parâmetros DBO e SST atenderam aos limites na maioria das análises, porém as concentrações para o parâmetro E.coli estiveram em desacordo com os limites da legislação, gerando índices na faixa “insatisfatório”. Ainda, devido às concentrações consideravelmente acima dos limites, alguns índices gerados foram iguais a zero, com o $IQES_{médio} = 0,0$ (Figura 4).

Visando compreender a situação em que a estação se encontrava, questionamentos foram levantados para a supervisora da UNMTE¹, que

esclareceu, por meio de informação verbal prestada, ser uma estação de fim de plano, ou seja, que recebe uma vazão superior à projetada, além de apresentar falhas identificadas no tratamento e contribuições de ligações clandestinas de esgoto.

A ETE São Cristóvão (Figura 5) também apresentou concentrações acima dos limites para todos os parâmetros estudados, gerando IQESs na faixa “insatisfatório”, com $IQES_{médio} = 0,0$. Magalhães (2017) também registrou resultados de DQO acima do legalmente permitido para essa estação, o que também foi verificado para a estação José Walter, com $IQES_{médio} = 3,0$.

¹ O contato com a supervisora ocorreu via e-mail, na qual foi enviada lista com os nomes das ETES analisadas na pesquisa.

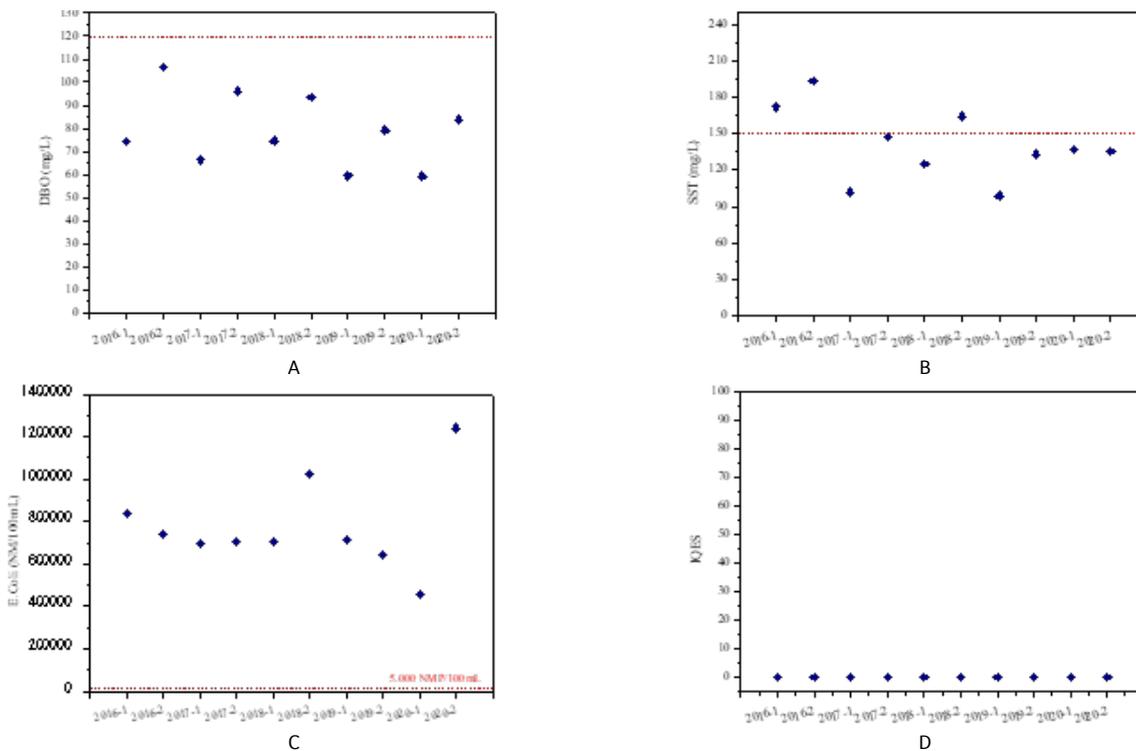


Figura 4 – Concentração média dos parâmetros DBO (A), SST (B) e E.Coli (C) e IQES (D) para a ETE João Paulo II.

Legenda: Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental.

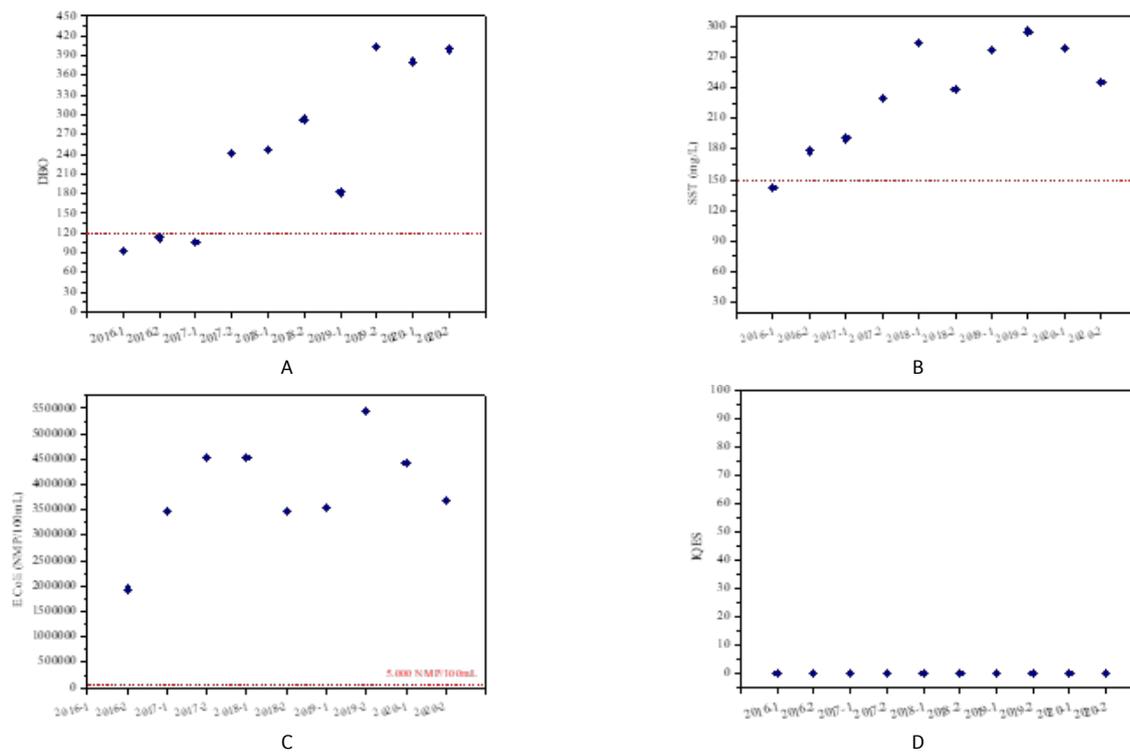


Figura 5 – Concentração média dos parâmetros DBO (A), SST (B) e E.Coli (C) e IQES (D) para a ETE São Cristóvão.

Legenda: Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental.

Segundo informação verbal prestada pela supervisora da UNMTE, a ETE São Cristóvão recebeu despejos dos caminhões limpa fossa da cidade de Fortaleza, apesar de não ter sido projetada para tal finalidade. Esse excedente à sua capacidade possivelmente é o que contribui para uma baixa qualidade do efluente gerado. A ETE José Walter, de acordo com a supervisora, se encontra em reforma visando a ampliação de seu tratamento, mas as melhorias ainda não estão em operação total, logo há comprometimento da qualidade do efluente da estação.

De maneira geral (Figura 6), as ETEs Conjunto Palmeiras e Tupã Mirim foram os destaques positivos, com resultados coerentes às análises de seus parâmetros e o atendimento das legislações ambientais. Os destaques negativos foram as estações João Paulo II, São Cristóvão e José Walter, com índices na faixa do insatisfatório, indicando problemas nos processos envolvidos em seus tratamentos e exigindo atenção dos profissionais para a avaliação de tais processos.

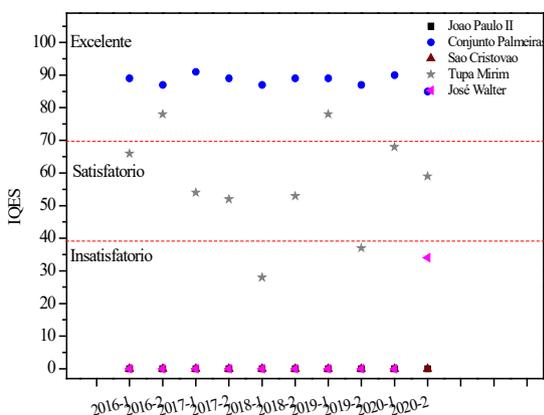


Figura 6 – IQES das estações avaliadas.

Legenda: Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental.

4 CONCLUSÕES

O IQES, proposto neste trabalho, atendeu ao objetivo da pesquisa, pois analisou de forma objetiva e direta os efluentes de todas as ETEs avaliadas. A análise da qualidade desses efluentes ocorreu

de maneira coerente com o atendimento aos parâmetros estudados às legislações ambientais de lançamento. Para a construção do índice, a aplicação de ACP, apesar de realizada com poucas variáveis, foi adequada.

A maioria das estações estudadas (60%) não atendeu aos limites de lançamento, lançando efluentes com concentrações capazes de prejudicar a saúde do corpo hídrico receptor. No entanto, houve destaques positivos entre as ETEs, com índices na faixa do excelente (20%) e do satisfatório (20%) em relação ao atendimento da legislação ambiental.

Por meio de questionamentos realizados à supervisora da UNMTE, foi esclarecido que as estações que estiveram em desacordo com a legislação ambiental possuem particularidades, e que, para sua maioria, é possível identificar problemas relacionados à falta de manutenção e operação de seus sistemas.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Resumo: Oliveira HFS, Nunes ABA; **Metodologia:** Oliveira HFS, Nunes ABA; **Resultados e Discussão:** Oliveira HFS, Nunes ABA; **Conclusões:** Oliveira HFS, Nunes ABA.

6 REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução COEMA n. 2, de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE n.º 154, de 22 de julho de 2002 e n.º 111, de 5 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE n.º 151, de 25 de novembro de 2002. **Diário Oficial do Estado**, Fortaleza, 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

- ÇELEKLI, A.; ŞAHIN, G. Bio-assessment of wastewater effluent conditions with algal pollution and multivariate approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 310, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127386>
- CLEMENS, M. *et al.* Groundwater protection under water scarcity; from regional risk assessment to local wastewater treatment solutions in Jordan. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 706, p. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136066>
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Apêndice D. Índices de qualidade das águas**. São Paulo: Cetesb, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2020/09/Apendice-D-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- DROSE, A. *et al.* Utilização de métodos estatísticos multivariados no monitoramento de qualidade da água da Lagoa Mirim. **Meio Ambiente (Brasil)**, Recife, v. 2, n. 4, p. 58-67, 2020. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/69>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- EBRAHIMI, M.; GERBER, E. L.; ROCKAWAY, T. D. Temporal performance assessment of wastewater treatment plants by using multivariate statistical analysis. **Journal of Environmental Management**, London, v. 193, p. 234-246, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.027>
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opiniao Pública**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0104-62762010000100007>
- FORTALEZA. Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. **Plano municipal de saneamento básico de Fortaleza**. Fortaleza: Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente, 2014.
- GÊMAR, G. *et al.* Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: the role of costs, pollutant removal efficiency, and greenhouse gas emissions. **Environmental Impact Assessment Review**, Nova York, v. 69, p. 24-31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.11.007>
- HUGHES, J. *et al.* Impacts and implications of climate change on wastewater systems: a New Zealand perspective. **Climate Risk Management**, [S. l.], v. 31, p. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100262>
- KARIMI, A. M.; SADEGHNEJAD, S.; REZGHI, M. Well-to-well correlation and identifying lithological boundaries by principal component analysis of well-logs. **Computers & Geosciences**, Nova York, v. 157, 2021.
- LIU, H. *et al.* A comprehensive index for evaluating and enhancing effective wastewater treatment in two industrial parks in China. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 230, p. 854-861, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.134>
- LOPES, W. S. *et al.* Determinação de um índice de desempenho do serviço de esgotamento sanitário. Estudo de caso: cidade de Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p1-10>
- LUO, L. *et al.* A novel index of total oxygen demand for the comprehensive evaluation of energy consumption for urban wastewater treatment. **Applied Energy**, Barking, v. 236, p. 253-261, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.101>
- MAGALHÃES, A. M. C. **Proposta de metodologia multicriterial para priorização de intervenção em ETEs segundo análise da vulnerabilidade socioambiental: estudo de caso em Fortaleza/CE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/29080/7/2017_dis_amcmagalh%c3%a3es.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.
- MCCANCE, W. *et al.* Decoupling anthropogenic vs. natural impacts at a wastewater treatment plant situated on acid sulfate soils. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 821, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153357>
- MOLINOS-SENANTE, M.; SALA-GARRIDO, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Development and application of the Hicks-Moorsteen productivity index for the total factor productivity assessment of wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, n. 4, p. 3116-3123, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.114>
- MONTEIRO, C. R. L. **Análise da eficiência e confiabilidade em 56 estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana de Fortaleza**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16482/1/2009_dis_crlmonteiro.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.
- NEWHART, K. B. *et al.* Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: a review. **Water Research**, Oxford, v. 157, p. 498-513, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.030>
- PALÁCIO, H. A. Q. **Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu, Ceará**. 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/18155/1/2004_dis_haqpalacio.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.
- ROLIM, H. O. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia de Banabuiú, estado do Ceará**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível

em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/22558/1/2016_tese_horolim.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

ROLLEMBERG, S. L. S. **Avaliação do potencial de reúso dos efluentes gerados nas ETEs operadas pela Cagece em Fortaleza-CE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/26943/1/2017_dis_slsrollemborg.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

SABIA, G. *et al.* Energy saving in wastewater treatment plants: a methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking. **Energy Conversion and Management**,

Amsterdam, v. 220, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113067>

SANTOS, A. B. **Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2007.

SILVA, M. I. *et al.* Assessment of groundwater quality in a Brazilian semiarid basin using an integration of GIS, water quality index and multivariate statistical techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 598, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126346>

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2014.