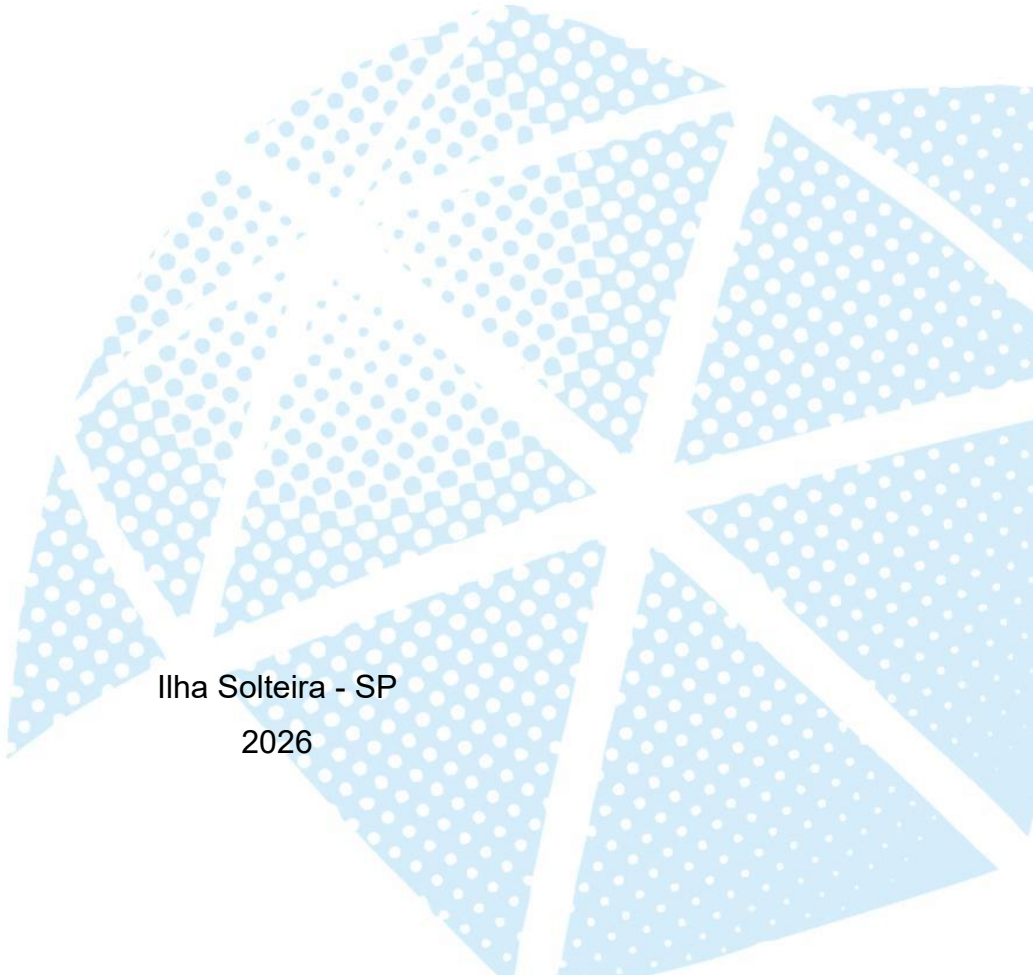
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CELINA RUBIANO DA SILVA

ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE DBO E COT PARA MONITORAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS NO ESTADO DE SÃO PAULO



Ilha Solteira - SP
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

CELINA RUBIANO DA SILVA

ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE DBO E COT PARA MONITORAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestra em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Conforme consta no certificado de aprovação

Orientador(a): Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira

Coorientador(a): Prof. Dr. Fabiana de Oliveira Ferreira

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S586e

Silva, Celina Rubiano da.
Estabelecimento de correlação entre DBO e COT para monitoramento de efluentes sanitários no estado de São Paulo / Celina Rubiano da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
64 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Gestão e Regulação de Recursos Hídricos , 2026

Orientador: Jefferson Nascimento de Oliveira
Coorientadora: Fabiana Oliveira Ferreira
Inclui bibliografia

1. Correlação . 2. Demanda Bioquímica De Oxigênio. 3. Carbono Orgânico Total.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Os resultados obtidos neste trabalho possibilitarão a paulatina substituição da análise de Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO por Carbono Orgânico Total – COT em efluentes sanitários, permitindo maior acurácia de resultados, equiparação com práticas internacionais, redução de resíduos analíticos e menor tempo de análise, com respeito às diversas realidades e velocidades de implementação no território nacional, de modo que a substituição tecnológica não implique, em um primeiro momento, em substituição do parâmetro legal de qualidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The results of this study will enable a gradual transition from Biochemical Oxygen Demand (BOD) to Total Organic Carbon (TOC) analysis in sanitary effluents. This shift ensures greater accuracy, aligns with international standards, reduces analytical waste, and cuts down testing time. Furthermore, it respects the varying implementation speeds and realities across the country, ensuring that technological replacement does not immediately alter legal quality standards.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE DBO E COT PARA MONITORAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTORA: CELINA RUBIANO DA SILVA
ORIENTADOR: JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA
COORIENTADORA: FABIANA DE OLIVEIRA FERREIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, área: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Profa. Dra. THAYRES DE SOUSA ANDRADE (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária / Universidade Federal do Ceará - UFC

Dr. NELSON MENEGON JUNIOR (Participaçao Virtual)
Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB

Ilha Solteira, 28 de julho de 2026.

Dedico este trabalho aos meus pais pela inspiração, meus irmãos pelo exemplo e meus filhos, por cederem parte de nosso tempo juntos para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

À Fabiana de Oliveira Ferreira, Beatriz Durazzo Ruiz, Roberto Xavier de Oliveira e Nelson Menegon Junior pelo apoio na obtenção e interpretação dos dados;

À Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, pelo apoio para realização deste trabalho e cessão dos dados analíticos;

Aos meus colegas do ProfÁgua, que tornaram o processo mais leve;

Aos docentes do Programa ProfÁgua;

Àqueles que dispuseram um pouco de seu tempo para ler e contribuir com a fluidez deste trabalho.O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua apoio técnico científico aportado até o momento..

RESUMO

Em que pese o uso histórico da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) para avaliação da carga orgânica em corpos hídricos e efluentes, atualmente existem metodologias analíticas mais rápidas e eficientes, dentre as quais se destaca o Carbono Orgânico Total (COT). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) já utiliza valores de COT para estimar a DBO em águas superficiais, entretanto, a substituição tecnológica ainda não foi concluída, uma vez que não há relações estabelecidas para efluentes brutos e tratados. Neste contexto, este trabalho buscou estabelecer correlações para estimar a DBO a partir de valores de COT em efluentes de características predominantemente domésticas, com base em série histórica de dados fornecida pela CETESB, de modo a apoiar a continuidade da substituição tecnológica das metodologias analíticas e subsidiar futuras revisões dos parâmetros legais de qualidade da água e dos efluentes. A pesquisa está associada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 (Saúde e Bem-Estar), 6 (Água Potável e Saneamento), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 14 (Vida na Água) e 17 (Parcerias e Meios de Implementação). Os resultados evidenciaram forte correlação entre DBO e COT, possibilitando o ajuste de modelos de regressão do tipo potência para estimativa da DBO a partir de valores medidos de COT. Os modelos obtidos apresentaram coeficientes de determinação de 0,81 para efluentes brutos e 0,72 para efluentes tratados, indicando que o COT é capaz de explicar parcela significativa da variabilidade observada na DBO. Os resultados demonstram o potencial de utilização do COT como ferramenta alternativa para estimativa da DBO em efluentes sanitários, contribuindo para o aprimoramento dos procedimentos analíticos empregados no monitoramento ambiental e fornecendo subsídios técnicos para a ampliação do uso desse parâmetro na avaliação da qualidade das águas e dos efluentes.

Palavras-chave: Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO; Carbono Orgânico Total – COT; correlação.

ABSTRACT

Despite the historical use of Biochemical Oxygen Demand – BOD to estimate organic matter in water and wastewater, there are several technologies more efficient and cleaner, as Total Organic Carbon – TOC, more precise and faster than BOD analysis, potentially supporting decision-making and Water Resources management. The Environmental Agency of São Paulo State – CETESB already uses values of TOC to estimate BOD in water, but there isn't a correlation to estimate BOD and TOC in wastewater. This study evaluated this correlation based on data series from CETESB, aiming for the replacement of BOD with TOC. This project is associated with Sustainable Development Goals 3, 6 ,11, 14 and 17. We verified a strong correlation between BOD and TOC, as verified by other authors. It was possible to establish a regression function to estimate BOD using values of TOC, with $R^2 = 0,81$ for influent and 0,72 for effluent. It shows that the variation of TOC can explain the variation of BOD values in most cases. The potential use of TOC to estimate BOD models supports the development of projects aiming at the expansion of TOC as an appropriate parameter in water quality evaluation.

Keywords: Total Organic Carbon – TOC; Biochemical Oxygen Demand – BOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre os compostos orgânicos considerados nas análises de DBO e COT..... 22
Figura 2 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos..... 26
Figura 3 - Localização das ETEs monitoradas pela CETESB no Estado de São Paulo, sobrepostas à delimitação das UGRHIs..... 28
Figura 4 - Localização das ETEs onde foram realizadas amostragens duplicadas para DBO e COT, sobrepostas à delimitação das UGRHIs..... 30
Figura 5 - Percentual das ETEs fiscalizadas pela CETESB abrangidas neste trabalho, por UGRHI..... 32
Figura 6 - Número de coletas duplicadas de DBO e COT realizadas por ano em ETEs pela CETESB..... 34
Figura 7 - Curvas de densidade de resíduos para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados..... 43
Figura 8 - Sobreposição da curva de regressão sobre os valores medidos para Efluentes Brutos..... 45
Figura 9 - Sobreposição da curva de regressão sobre os valores medidos para Efluentes Tratados..... 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição bruta e relativa das ETEs monitoradas pela CETESB, por UGRHI..... 29
Tabela 2 - Distribuição bruta e relativa das ETEs envolvidas neste trabalho, por UGRHI..... 31
Tabela 3 - Distribuição das tipologias de tratamento de esgotos nas estações envolvidas neste trabalho..... 33
Tabela 4 - Distribuição das tipologias de tratamento de esgotos nas estações monitoradas pela CETESB..... 33
Tabela 5 - Critérios de seleção dos dados..... 36
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos básicos associados aos grupos de dados avaliados..... 40
Tabela 7 - Coeficientes de correlação associados aos grupos de dados avaliados..... 41
Tabela 8 - Coeficientes de determinação para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados..... 41
Tabela 9 - Valores obtidos para Raiz do Erro Quadrático Médio para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados..... 42
Tabela 10 - Coeficientes ajustados para os grupos de dados avaliados..... 44

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**.....	16
2	**REVISÃO DE LITERATURA.**.....	20
3	**MATERIAL E MÉTODOS**.....	26
3.1	Base de dados e área de estudo.....	27
3.2	Caracterização das estações de tratamento.....	32
3.3	Consolidação e tratamento dos dados.....	33
3.4	Configurações e análises.....	36
4	**RESULTADOS E DISCUSSÃO.**.....	38
4.1	Análise exploratória dos dados.....	38
4.2	Estabelecimento de regressão para COT e DBO para efluentes.....	43
4.3	Vantagens e desvantagens da proposta.....	47
5	**CONCLUSÃO**.....	48
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A.....	55

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, a principal fonte de poluição das águas doces superficiais no Brasil está associada a efluentes de natureza doméstica. O início dos aglomerados urbanos e a ocupação humana a partir das margens dos rios, utilizados como fontes de água e escoadores de dejetos não se diferencia do restante do mundo.

Em que pese o esforço institucional associado a diversos planos de saneamento, a coleta e o tratamento de esgoto no Brasil ainda são precários ou inexistentes. A situação é agravada pela extensão geográfica, diversidades topográficas e ecossistêmicas e pelos padrões de ocupação territorial, em que as soluções mais comuns nem sempre são replicáveis em todos os territórios ocupados. Em 2023 estavam registradas nos bancos de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, 3.668 Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ANA, 2025). Destas, ao menos 1.262 estão localizadas no Estado de São Paulo – como se verá neste trabalho – evidenciando a discrepância da cobertura de tratamento com relação à espacialização do território e sua ocupação.

Assim, ainda hoje a carga orgânica oriunda de efluentes de características domésticas é considerada o principal indicador de alteração da qualidade dos corpos hídricos urbanos. Historicamente a avaliação da carga orgânica na massa hídrica é feita a partir da estimativa de Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, metodologia analítica que verifica a quantidade de oxigênio dissolvido em água necessária para a degradação biológica da carga orgânica ali presente. Assim, quanto mais oxigênio é demandado para esta degradação, maior a concentração de poluentes orgânicos biodegradáveis na massa líquida, de modo que valores maiores de DBO indicam maiores cargas orgânicas (Aguilar-Torrejón *et al*., 2023). Há legislações nacional e infranacional que determinam valores máximos de DBO em água bruta, a depender da classe de qualidade do corpo hídrico em análise. Os valores de DBO também são utilizados para composição do Índice de Qualidade de Água – IQA no Brasil, juntamente com outros parâmetros de qualidade (CETESB, 2025).

A determinação da carga orgânica em água e efluentes, entretanto, se mostra desafiadora, uma vez que inclui compostos carbonáceos, bem como outros elementos, tais como nitrogênio, hidrogênio e oxigênio. As análises de DBO, Carbono Orgânico Total – COT e Demanda Química de Oxigênio – DQO, são as metodologias

mais consolidadas para avaliação da carga orgânica em massas líquidas, com crescente uso da análise de COT sobre as demais (Aguilar-Torrejón *et al*., 2023).

As vantagens da utilização da DBO envolvem pouca complexidade de análise, custo operacional relativamente baixo e ampla aceitação técnica. Entretanto, é necessário rigoroso controle de temperatura das amostras por período de 5 dias, que é o tempo mínimo para obtenção de resultados. Além da demora, as análises de DBO apresentam alto grau de incerteza, decorrente da presença de substâncias tóxicas aos microrganismos decompositores da matéria orgânica, o que pode mascarar os resultados e reduzir a segurança dos agentes fiscalizadores na tomada de decisão. Além disso, é recomendada a utilização casada desta com análises de DQO, para melhor interpretação dos resultados (Aguilar-Torrejón *et al*., 2023), elevando custos analíticos.

A análise de DQO é historicamente indicada como boa substituta da DBO (Dubber; Gray, 2010, Aguilar-Torrejón *et al*., 2023), entretanto não se mostra como alternativa ambientalmente adequada, por estar associada à utilização de reagentes corrosivos e tóxicos, tais como dicromato de potássio e ácido sulfúrico, gerando resíduos contaminantes da análise laboratorial.

Atualmente existem outras formas de verificação da carga orgânica na massa líquida que apresentam custos reduzidos e que podem ser substitutas da análise da DBO, dentre as quais destacamos a avaliação de Carbono Orgânico Total – COT. Esta metodologia permite a análise e a obtenção de resultados em 15 minutos, o que eleva a capacidade de processamento de amostras do laboratório, reduz a geração de resíduos durante o processo de análise e apresenta menor nível de incerteza, trazendo mais segurança para a tomada de decisão com base no resultado obtido. Ao contrário das análises de DBO e DQO, a avaliação de COT é considerada mais completa para avaliação da totalidade da matéria orgânica na massa líquida (AGUILAR-TORREJÓN *et al*., 2023), sendo necessária ponderação e critério ao utilizá-lo como parâmetro substitutivo, por ter sensibilidade distinta aos dois anteriores.

Não se deve, deste modo, supor adequada a substituição imediata de uma metodologia por outra, uma vez que é necessário considerar o custo de substituição das tecnologias nos laboratórios existentes, além do impacto que esta alteração traria nas séries históricas de qualidade de água.

Finalmente, a própria legislação não possui valores estabelecidos para carga orgânica a partir de COT, e sim a partir da DBO, sendo necessária uma etapa de

ajuste e adaptação entre as duas tecnologias para que seja possível pensar em alteração nos parâmetros legais estabelecidos.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, empresa pública de fiscalização e monitoramento ambiental do Estado de São Paulo, realiza o monitoramento das águas superficiais em sua área de atuação desde 1974. Atualmente são monitorados 601 pontos de qualidade de água doce superficial no Estado de São Paulo. A fim de melhorar a capacidade de coleta e processamento de amostras, teve início na empresa um movimento para estimar a DBO a partir da COT. Deste modo, desde 2020 a CETESB vem utilizando os resultados de COT para estimar a DBO em águas brutas do Estado de São Paulo (CETESB, 2024).

Apesar desta substituição, a estrutura analítica da DBO nos laboratórios da CETESB não foi reduzida ou desmobilizada, uma vez que há necessidade de sua utilização para avaliação da DBO nos efluentes brutos e tratados dos sistemas de tratamento fiscalizados, sejam efluentes industriais ou sanitários.

Deste modo, a continuidade natural para substituição das metodologias analíticas passa pela verificação da aderência entre DBO e COT também para avaliação da matéria orgânica em efluentes, o que é objeto deste trabalho.

A consolidação das propostas aqui apresentadas possibilitará segurança para a substituição tecnológica, visando à atualização, se necessária, dos parâmetros de qualidade da água nas legislações estaduais e federal.

Este trabalho busca, portanto, validar a existência de correlação entre as variáveis DBO e COT para efluentes sanitários, e de forma específica, estabelecer relação funcional para determinação dos valores de DBO a partir de COT para este tipo de efluente.

Por proporcionar redução no tempo de obtenção de resultados para ações de fiscalização e tomada de decisão relativa a eventos de poluição de recursos hídricos, este trabalho está associado aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS 6 (água potável e saneamento) e 14 (vida na água). Por propor avanços na determinação da carga orgânica em massas líquidas sem a geração de resíduos tóxicos e perigosos decorrentes do processamento das amostras, se relaciona aos ODS 3 (saúde e bem-estar) e 11 (cidades e comunidades sustentáveis), e por propor estratégias intermediárias que possibilitem alteração futura da legislação associada ao monitoramento de carga orgânica na água, se relaciona ao ODS 17 (parcerias e meios de implementação).

O produto decorrente deste trabalho é uma Nota Técnica a ser publicada em conjunto com a CETESB, apresentando os resultados desta dissertação, de modo a possibilitar a ampliação do uso da regressão entre as variáveis COT e DBO por outros órgãos fiscalizadores, redes de monitoramento ambiental e empreendimentos passíveis da realização de planos de automonitoramento de seus efluentes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Poluição pode ser entendida como a degradação de sistemas naturais a partir de fatores externos, geralmente pela inserção de compostos, alterando seu equilíbrio natural. A adição de carga orgânica em água é naturalmente processada pelo corpo receptor através de processo denominado autodepuração, em que o corpo hídrico é capaz de fornecer oxigênio para sua degradação até o restabelecimento do equilíbrio inicial. O comprometimento da qualidade do corpo hídrico ocorre em decorrência do lançamento de dejetos e efluentes além da capacidade de autodepuração do corpo hídrico, muitas vezes em decorrência do crescimento urbano sem planejamento adequado.

Em que pese o avanço no conhecimento sobre poluentes emergentes, hormônios e outros, a principal avaliação dos impactos na qualidade da água pela ocupação humana ainda se dá pela análise da matéria orgânica. Historicamente, esta estimativa é feita por meio da análise de DBO, que visa estimar a quantidade de oxigênio dissolvido em água necessária à degradação de compostos orgânicos, tanto em água bruta quanto em efluentes (tratados ou não).

De forma resumida, a DBO representa o oxigênio consumido para a decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiológica na massa líquida, de modo que matéria orgânica não biodegradável não será detectada por este método analítico (Kuznietsov; Biedunkova, 2024). Por ser dependente da atividade microbiana portanto, de fatores bióticos, os resultados da análise da DBO podem sofrer interferência de aspectos biológicos que impactam a atividade e a quantidade de bactérias na amostra, tais como alterações da população de bactérias na zona de mistura, variação desta população ao longo do tempo e possibilidade de nitrificação. Em decorrência desta dependência e da dificuldade de controle destes processos, o intervalo de confiança e a reprodutibilidade desta metodologia de análise são reduzidos quando comparada a outras (Constable; McBean, 1979). Há críticas ainda quanto ao fato do ensaio contemplar período extenso (5 dias) com controle rigoroso de luminosidade, agitação e temperatura, o que não condiz com a condição natural dos corpos hídricos, de modo que os resultados não apresentariam, de forma adequada, a informação associada à efetiva degradação da matéria orgânica a partir do consumo do oxigênio dissolvido no corpo receptor (Knapik, 2014).

A realização de ensaios de DBO utiliza reagentes tais como sulfatos manganoso ($MnSO_4$) e de magnésio ($MgSO_4$), cloretos de cálcio ($CaCl_2$) e férrico ($FeCl_3$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), álcali-iodeto e tiossulfato de sódio ($Na_2S_2O_3$) (Freitas; Silva Júnior; Longhin, 2015), implicando na necessidade de controle das substâncias químicas utilizadas no processo, bem como neutralização e correto descarte dos efluentes e resíduos gerados durante a análise.

Os principais métodos analíticos para estimar a DBO são Winkler (ou normalizado) e respirométrico, ambos com incerteza associada de 15% (Almeida *et al*., 2017). Em estudo sobre as fragilidades deste tipo de medição, foi verificada diferença percentual de 25% (média) entre amostras equivalentes analisadas pelos dois métodos citados, evidenciando que o método analítico escolhido pode influenciar o resultado de DBO obtido (Almeida *et al*., 2017). Estas diferenças de quantificação são conhecidas e esperadas, mas não há ajuste entre os dois métodos de estimativa de DBO, sendo que a opção por um ou outro método poderia mascarar situações de poluição além dos limites estabelecidos em legislação.

Ainda assim, por ser uma metodologia de análise relativamente simples, a DBO é amplamente utilizada no mundo para compor indicadores de qualidade de água.

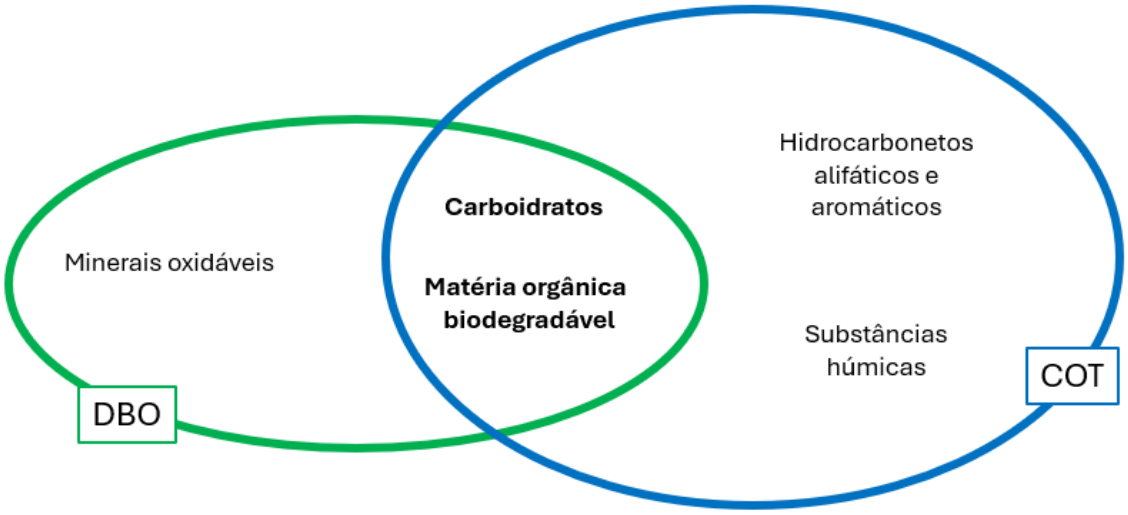
A partir da segunda metade do século XX, o desenvolvimento ou o barateamento de metodologias de análise de medição direta do carbono disponível na amostra líquida possibilitou a redução do tempo necessário para obtenção de resultados envolvendo indicadores da presença de matéria orgânica em água e efluentes.

Ainda que exista movimento pela substituição da DBO pela DQO no monitoramento de efluentes (Dubber; Gray, 2010), há risco de contaminação associado a esta análise, muitas vezes utilizada como etapa preliminar da análise da DBO. Cada análise de DQO pode gerar 150 ml de resíduos (Freitas; Silva Júnior; Longhin, 2015), dentre os quais alguns perigosos, como cromo hexavalente e mercúrio (Dubber; Gray, 2010), tornando a descentralização das análises mais complexa quando se trata da gestão destes resíduos em todas as etapas envolvidas, de armazenamento, transporte e destinação final.

A utilização da análise de COT é considerada promissora desde a década de 1970 (Constable; Mcbean, 1979). A análise representa a produção de CO_2 decorrente da combustão catalítica da matéria orgânica de uma amostra (Kuznietsov; Biedunkova, 2024), obtendo valor de COT a partir da diferença entre o carbono total

e o carbono inorgânico medidos (Shetty; Goyal, 2022). Como se percebe, as análises de DBO e COT são distintas entre si e não avaliam os mesmos constituintes, uma vez que a DBO é uma estimativa indireta (demanda de oxigênio para estimar carga orgânica) e a COT é uma medição direta (mede diretamente os níveis de carbono), cuja distinção é evidenciada na Figura 1.

Figura 1: Comparação entre os compostos orgânicos considerados nas análises de DBO e COT.



Fonte: Adaptado de Thomas e Theraulaz (2007), apud Knapic, 2014

Ainda que exista correlação clara entre COT e DBO, a mera substituição de um parâmetro por outro pode gerar confusão, tendo em vista que conceitualmente as análises avaliam aspectos distintos dos indicadores orgânicos na amostra (Aziz; Tebbutt, 1980).

É importante destacar outras diferenças entre as duas metodologias de análise. A análise de DBO avalia a quantidade de poluentes orgânicos na amostra a partir do consumo de oxigênio para biodegradação da matéria orgânica. Entretanto, como nem toda matéria orgânica é biodegradável, a análise da DBO não consegue estimar a quantidade deste tipo de poluente na amostra (Constable; Mcbean, 1979).

Neste sentido, a análise de COT pode ser considerada vantajosa, pois o resultado obtido representa toda a matéria orgânica da amostra, biodegradável ou não. O resultado também contempla o Carbono Orgânico Dissolvido – COD, responsável pelo transporte de diversos poluentes na massa líquida sem depender do estado de oxidação da matéria orgânica (Knapik *et al*., 2009;Siwiec *et al*., 2018).

A determinação de COT é feita a partir de analisadores específicos, em que é medida a quantidade de carbono total e de carbono inorgânico da amostra. Para quantificação do carbono total, parte da amostra passa por processo de combustão e todo o carbono da amostra sofre oxidação, convertendo-se em CO_2. A quantificação do carbono inorgânico é feita por reação com ácido fosfórico, o que converte apenas o carbono inorgânico em CO_2. A diferença entre os valores verificados nas duas medições corresponde ao COT (Fonseca *et al*., 2006).

Destaque-se que não se pretende, através deste trabalho, a substituição da DBO como parâmetro de qualidade, uma vez que já está consolidada enquanto conceito, e existem séries históricas de décadas utilizando dados de DBO, que compõe inclusive diversos indicadores de qualidade de água, como o IQA adaptado pela CETESB, amplamente utilizado no Brasil e que permite a comparação relativamente equitativa da qualidade da água no território nacional (Menezes *et al*., 2010). Entretanto, a estimativa dos valores de DBO a partir de metodologias mais precisas e eficientes possibilita maior processamento de amostras e melhor tempo de resposta para os tomadores de decisão, em especial em episódios críticos de poluição.

A eventual consolidação das correlações entre COT e DBO e substituição gradual de tecnologias pode levar à atualização das normas de qualidade de água. Países como a Ucrânia, Japão, Canadá e Estados Unidos já possuem regramento legal para limites de COT na água bruta e potável (Klymenko; Samsoni-TODOROVA; Savchyna, 2025). A Diretiva 2024/3019/CEE da União Europeia, relativa às normas associadas ao tratamento de águas residuárias urbanas, permite a substituição da análise de DBO por COT quando é estabelecida correlação entre as duas variáveis (CONSELHO DAS COMUNIDADES EUROPEIAS, 2014). O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA vem elaborando a revisão da Resolução CONAMA 430/2011, discutindo, dentre outras propostas, a possibilidade de utilização do COT em substituição à DBO para avaliação da carga orgânica em corpos hídricos e efluentes (CONAMA, 2025).

A utilização de correlações para estimar a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) a partir do Carbono Orgânico Total (COT) não constitui uma abordagem recente, sendo objeto de investigação desde a década de 1960. Inicialmente, os estudos concentraram-se em modelos lineares para descrever a relação entre essas variáveis. Contudo, pesquisas posteriores demonstraram que essa associação

poderia ser representada por diferentes formas matemáticas, incluindo modelos não lineares, capazes de proporcionar melhor ajuste aos dados observados e maior capacidade preditiva. Nesse contexto, Constable e Mcbean (1979) destacaram que a adoção de relações alternativas à linear permitia aumentar a aderência entre as variáveis, ampliando a confiabilidade das estimativas de DBO obtidas a partir de medições de COT.

Ainda que o padrão atual de consumo e produção implique na presença de fármacos, hormônios, microplásticos e outras partículas complexas na composição de efluentes sanitários, é esperado que a melhor representação destes se dê pela caracterização da matéria orgânica. Esta se mostra altamente heterogênea com relação aos compostos ali presentes (Huang; Li; Gu, 2010), sendo desejável que o método analítico escolhido abranja maior quantidade de compostos, critério em que COT é superior à DBO.

Estudo recente verificou ótima correlação entre COT e DQO em água bruta na Ucrânia, evidenciando a potencialidade da utilização de COT como parâmetro de qualidade associado ao carbono (Klymenko; Samsoni-Todorova; Savchyna, 2025), ainda que as características da poluição hídrica na Ucrânia sejam distintas das do Brasil no que se refere à biodegradabilidade do carbono em água.

Já um estudo comparativo para estimar a DBO a partir de DQO, COT e espectroscopia de fluorescência obteve correlação (R) de 0,902 entre COT e DBO, sendo proposta a avaliação das possibilidades de substituição das metodologias analíticas (Christian; Batista; Gerrity, 2017).

No Brasil, mais especificamente no Estado de São Paulo, a CETESB iniciou ainda em 2008, a realização de ensaios de COT juntamente com a análise da DBO. Em 2011 esta análise contemplava toda a rede básica de monitoramento de água doce bruta, contemplando todas as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI do Estado. Foram obtidos dados até 2019, quando se realizou estudo estatístico específico para estabelecer a relação entre os dois parâmetros (CETESB, 2024).

O estudo buscou correlacionar diversas variáveis de qualidade da água bruta, pH, Oxigênio Dissolvido, DBO, OD, Fósforo total, Nitrogênio Kjeldahl, Nitrogênio amoniacal e *E. coli*. A melhor correlação obtida foi entre DBO e COT, possibilitando a identificação de modelo estatístico para estimar a DBO a partir de valores de COT (Bruni; Menegon Junior; Rugue Junior, 2019).

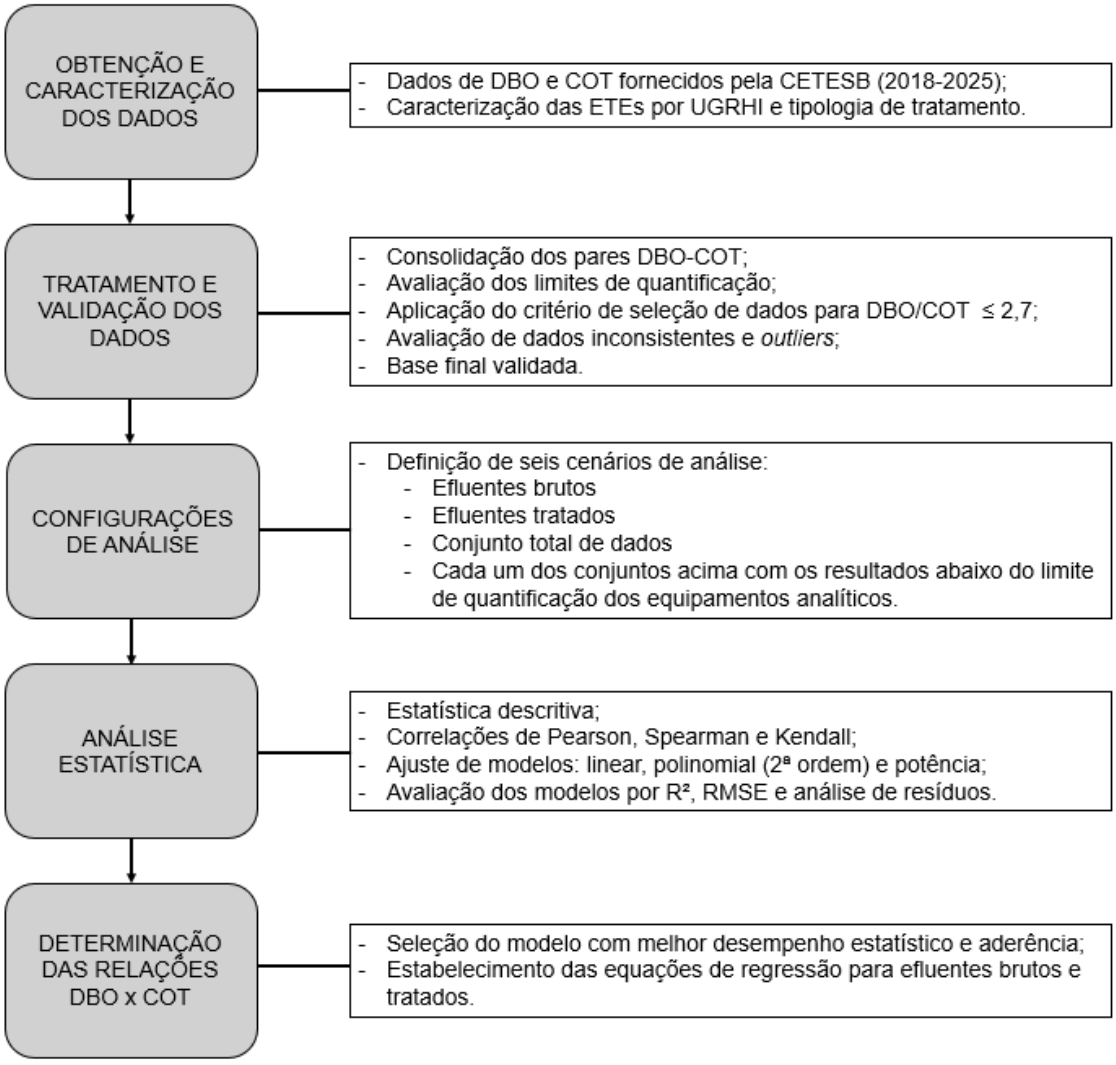
A partir de então, a CETESB vem utilizando esta correlação para estimar os valores de DBO a partir do COT medido, sendo que o modelo atualmente em uso se restringe à água bruta, não sendo aplicado a efluentes (CETESB, 2024).

No que se refere aos custos associados à substituição tecnológica, estudo nacional indicou que mesmo em caso de necessidade de substituição dos equipamentos em laboratórios de pequeno porte (43 amostras/mês), o custo associado à substituição dos equipamentos para estimativa de DBO e DQO por aqueles capazes de verificar o COT é abatido em 14 anos, considerando os reduzidos custos com insumos e hora/técnico para análise de COT, quando comparados às análises de DBO e DQO (Arnesen *et al*., 2018). O mesmo estudo indica que para implantação de um sistema analítico sem estrutura prévia, os custos de implantação para análise de COT são equivalentes aos custos associados à implantação das estruturas para análise de DBO e DQO, sendo factível e desejável a substituição tecnológica proposta, tendo em vista a redução de tempo e custos analíticos, bem como a redução de resíduos, inclusive perigosos, gerados em laboratório.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos adotados nesta dissertação encontram-se sintetizados na Figura 2. Inicialmente, foi realizada a obtenção e caracterização dos dados disponibilizados pela CETESB. Em seguida, os dados passaram por etapas de tratamento e validação, sendo posteriormente organizados em diferentes configurações para análise estatística. Por fim, foram ajustados e avaliados modelos matemáticos visando ao estabelecimento de relações funcionais entre os parâmetros DBO e COT.

Figura 2: Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Autoria própria.

3.1 BASE DE DADOS E ÁREA DE ESTUDO

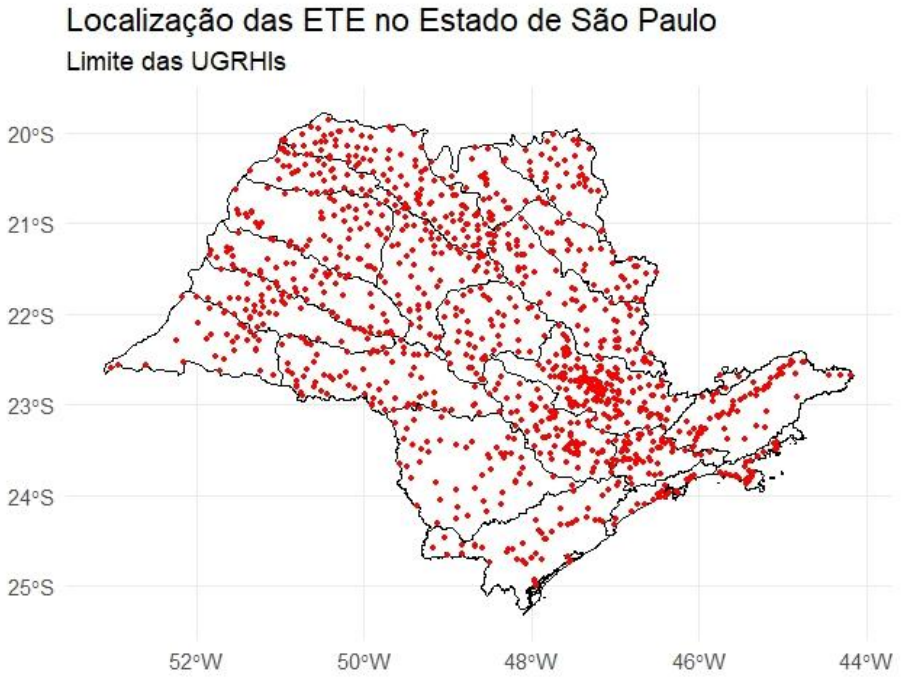
Os dados utilizados neste trabalho foram integralmente obtidos pela CETESB em seus laboratórios acreditados, e gentilmente cedidos para as análises aqui realizadas.

Ainda que os bancos de dados da CETESB contenham dados fornecidos pelas empresas que possuem Plano de Automonitoramento de Efluentes Líquidos – PAEL, foram utilizados apenas os dados gerados em coletas e análises da CETESB, que garante a acreditação das amostragens e análises laboratoriais. Esta escolha também evita a exposição de dados destas empresas para fins não previstos nos planos de automonitoramento, ou seja, os dados utilizados são públicos, permitindo continuidade e reprodutibilidade da proposta aqui apresentada.

Para este trabalho foram considerados dados obtidos em estações de tratamento de esgotos sanitários, ou seja, efluentes sem características predominantemente industriais, ou que atendam minimamente ao estabelecido no Artigo 19-A do Decreto Estadual 8.468/1976 e alterações.

Atualmente são monitoradas pela CETESB 1.262 estações de tratamento de esgotos sanitários – ETEs, devidamente cadastradas nos bancos de dados para realização de coletas demandadas em períodos diversos ao longo do licenciamento dos empreendimentos. Para este trabalho, as estações foram identificadas com relação à sua localização em cada uma das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHIs do Estado de São Paulo. A Figura 3 indica a localização das estações de tratamento de esgotos sanitários monitoradas no Estado de São Paulo.

Figura 3: Localização das ETEs monitoradas pela CETESB no Estado de São Paulo, sobrepostas à delimitação das UGRHIs.



Fonte: Autoria própria, a partir de dados do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP) e CETESB.

Ainda que existam estações e monitoramento por todo o território do Estado de São Paulo, a quantidade de estações varia de acordo com a distribuição demográfica, escassez hídrica e desenvolvimento econômico regional. A Tabela 1 evidencia a distribuição das estações de tratamento de esgotos sanitários monitoradas no Estado de São Paulo por UGRHI.

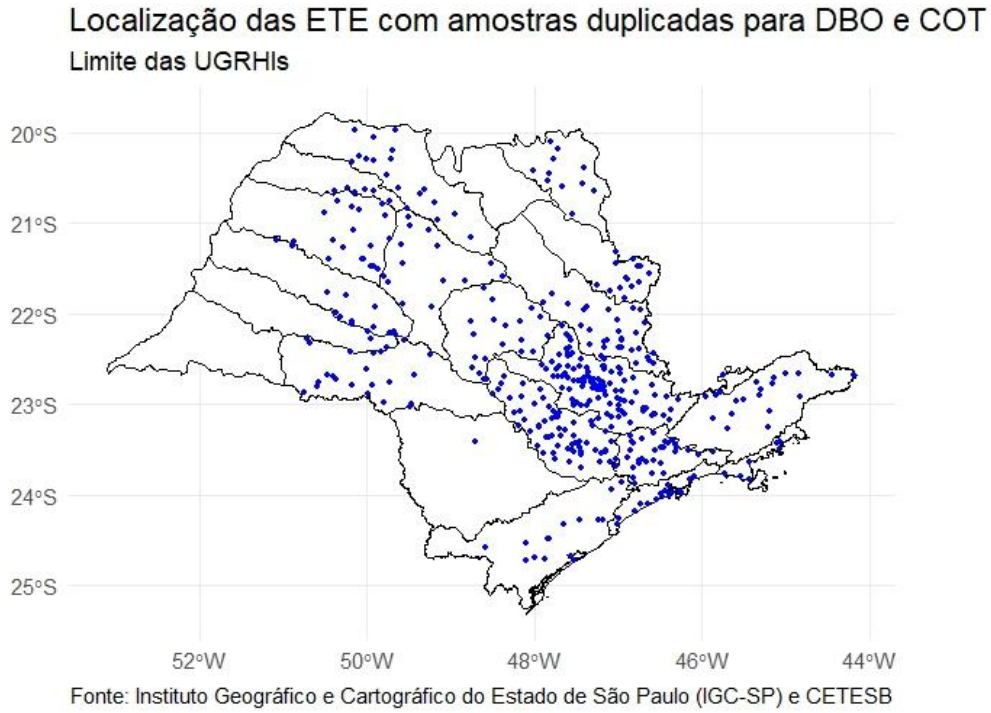
Tabela 1: Distribuição bruta e relativa das ETEs monitoradas pela CETESB, por UGRHI.

UGRHI	ETEs monitoradas	%
1 - MANTIQUEIRA	3	0,24%
2 - PARAÍBA DO SUL	69	5,47%
3 - LITORAL NORTE	29	2,30%
4 - PARDO	38	3,01%
5 - PIRACICABA/CAPIVARI/JUNDIAÍ	206	16,32%
6 - ALTO TIETÊ	49	3,88%
7 - BAIXADA SANTISTA	24	1,90%
8 - SAPUCAÍ/GRANDE	41	3,25%
9 - MOGI GUAÇU	77	6,10%
10 - SOROCABA/MÉDIO TIETÊ	87	6,89%
11 - RIBEIRA DE IGUAPE/LITORAL SUL	48	3,80%
12 - BAIXO PARDO/GRANDE	29	2,30%
13 - TIETÊ/JACARÉ	49	3,88%
14 - ALTO PARANAPANEMA	55	4,36%
15 - TURVO/GRANDE	105	8,32%
16 - TIETÊ/BATALHA	61	4,83%
17 - MÉDIO PARANAPANEMA	66	5,23%
18 - SAO JOSÉ DOS DOURADOS	37	2,93%
19 - BAIXO TIETÊ	59	4,68%
20 - AGUAPEÍ	52	4,12%
21 - PEIXE	44	3,49%
22 - PONTAL DO PARANAPANEMA	34	2,69%
Total	1262	100,00%

Fonte: Autoria própria.

Para este trabalho, foram considerados inicialmente os dados de 1.967 amostras duplicadas, ou seja, amostras do mesmo local, dia e horário, para as quais foram verificados os valores de COT e DBO. Os dados foram obtidos pela CETESB, em 441 ETEs que fazem parte do universo de estações monitoradas indicadas pela Tabela 1. A Figura 4 indica as estações de tratamento de esgotos sanitários nas quais foram realizadas as coletas duplicadas.

Figura 4: Localização das ETEs onde foram realizadas amostragens duplicadas para DBO e COT, sobrepostas à delimitação das UGRHIs.



Fonte: Autoria própria, a partir de dados do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP) e CETESB.

A distribuição das ETEs com amostragens duplicadas para DBO e COT (Figura 4) é distinta da distribuição das ETEs monitoradas pela CETESB no Estado de São Paulo (Figura 3). A distinção se deve a fatores associados aos períodos de monitoramento, equipamentos disponíveis nos laboratórios de análise e demanda pela realização das coletas. A Tabela 2 evidencia a distribuição das estações de tratamento de esgotos sanitários envolvidas neste estudo (isto é, as ETEs da Figura 4), por UGRHI.

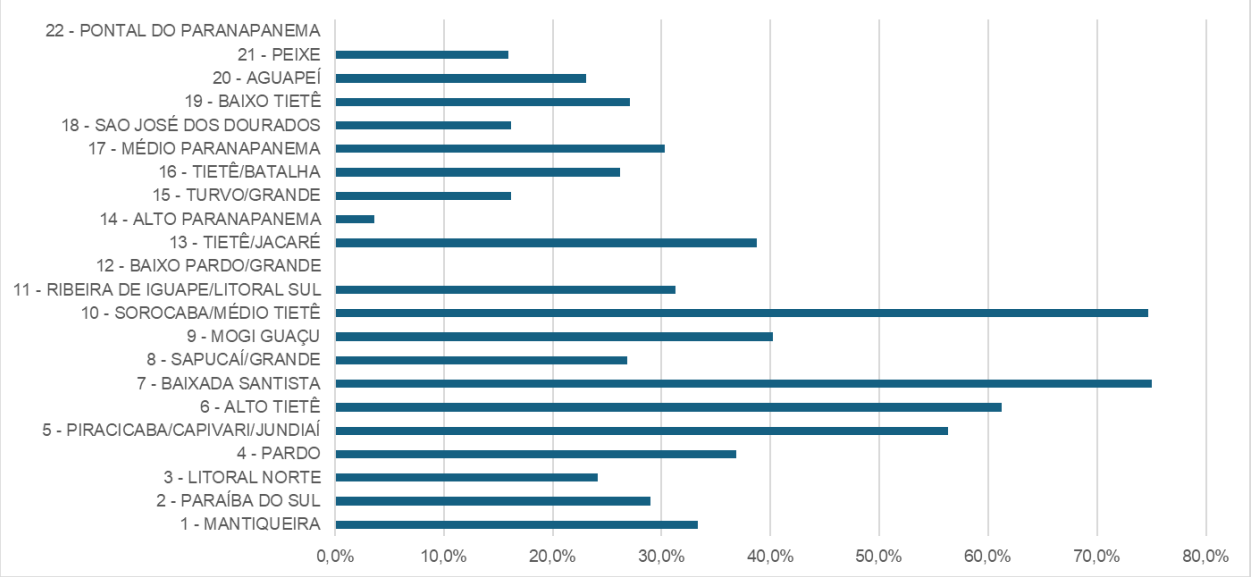
Tabela 2: Distribuição bruta e relativa das ETEs envolvidas neste trabalho, por UGRHI.

UGRHI	ETEs deste estudo	%
1 - MANTIQUEIRA	1	0,23%
2 - PARAÍBA DO SUL	20	4,54%
3 - LITORAL NORTE	7	1,59%
4 - PARDO	15	3,40%
5 - PIRACICABA/CAPIVARI/JUNDIAÍ	115	26,08%
6 - ALTO TIETÊ	30	6,80%
7 - BAIXADA SANTISTA	18	4,08%
8 - SAPUCAÍ/GRANDE	11	2,49%
9 - MOGI GUAÇU	28	6,35%
10 - SOROCABA/MÉDIO TIETÊ	62	14,06%
11 - RIBEIRA DE IGUAPE/LITORAL SUL	15	3,40%
12 - BAIXO PARDO/GRANDE	0	0,00%
13 - TIETÊ/JACARÉ	22	4,99%
14 - ALTO PARANAPANEMA	4	0,91%
15 - TURVO/GRANDE	18	4,08%
16 - TIETÊ/BATALHA	14	3,17%
17 - MÉDIO PARANAPANEMA	20	4,54%
18 - SAO JOSÉ DOS DOURADOS	5	1,13%
19 - BAIXO TIETÊ	21	4,76%
20 - AGUAPEÍ	11	2,49%
21 - PEIXE	4	0,91%
22 - PONTAL DO PARANAPANEMA	0	0,00%
Total	441	100%

Fonte: Autoria própria.

A comparação entre a distribuição das ETEs por UGRHI no conjunto total de unidades e naquelas abrangidas pelas coletas analisadas neste estudo indica diferenças na representatividade geográfica, evidenciando que a amostra não reproduz integralmente a distribuição espacial observada no universo de ETEs consideradas. Isso se deve basicamente à demanda pelas amostragens, com maior esforço amostral em bacias de maior densidade demográfica, bem como à capacidade de processamento dos laboratórios envolvidos e sua disponibilidade de equipamentos analíticos para cada período. Deste modo, algumas UGRHIs tiveram maior representação relativa na geração dos dados que embasam este trabalho, conforme pode ser verificado na Figura 5, em que fica evidenciado que duas UGRHIs não contribuíram no fornecimento dos dados utilizados neste estudo (UGRHIs 12 e 22), enquanto outras tiveram mais de 70% de suas ETEs contempladas na coleta de dados duplicados de DBO e COT (UGRHIs 7 e 10).

Figura 5: Percentual das ETEs fiscalizadas pela CETESB abrangidas neste trabalho, por UGRHI.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez que as condições gerais dos efluentes tratados nas ETEs contempladas neste trabalho são equivalentes, independentemente da localização geográfica, entendemos não haver prejuízo à representatividade da análise aqui desenvolvida, porque as características gerais dos efluentes sanitários em ambientes urbanos é semelhante em todas as regiões geográficas do Estado, sendo relevante destacar que 20 das 22 UGRHIs do Estado de São Paulo estão contempladas pelos dados aqui utilizados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO

Para melhor entendimento do contexto geral das estações contempladas neste trabalho, foram verificados os dados disponibilizados pela CETESB sobre os sistemas de tratamento (primário, secundário, terciário ou emissário submarino) de cada estação. As informações estavam disponíveis para 412 das estações indicadas na Figura 3. Para as 29 estações restantes, foi necessário buscar os dados de licenciamento de cada estação, de modo a verificar a tipologia de tratamento envolvida, ou ainda a averiguação de imagens de satélite das estações de tratamento para identificação visual da tipologia de tratamento, o que pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3: Distribuição das tipologias de tratamento de esgotos nas estações envolvidas neste trabalho

Tipo de tratamento	Estações	%
Primário	10	2,27%
Secundário	419	95,01%
Terciário	7	1,59%
Pré condicionamento	5	1,13%
Total	441	100,00%

Fonte: Autoria própria.

Em comparação com os dados relativos a todas as estações de tratamento de efluentes sanitários monitoradas pela CETESB, verifica-se que a distribuição entre os sistemas de tratamento no Estado de São Paulo pode ser considerada semelhante, com mais de 80% das estações monitoradas com tratamento de nível secundário, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Distribuição das tipologias de tratamento de esgotos nas estações monitoradas pela CETESB

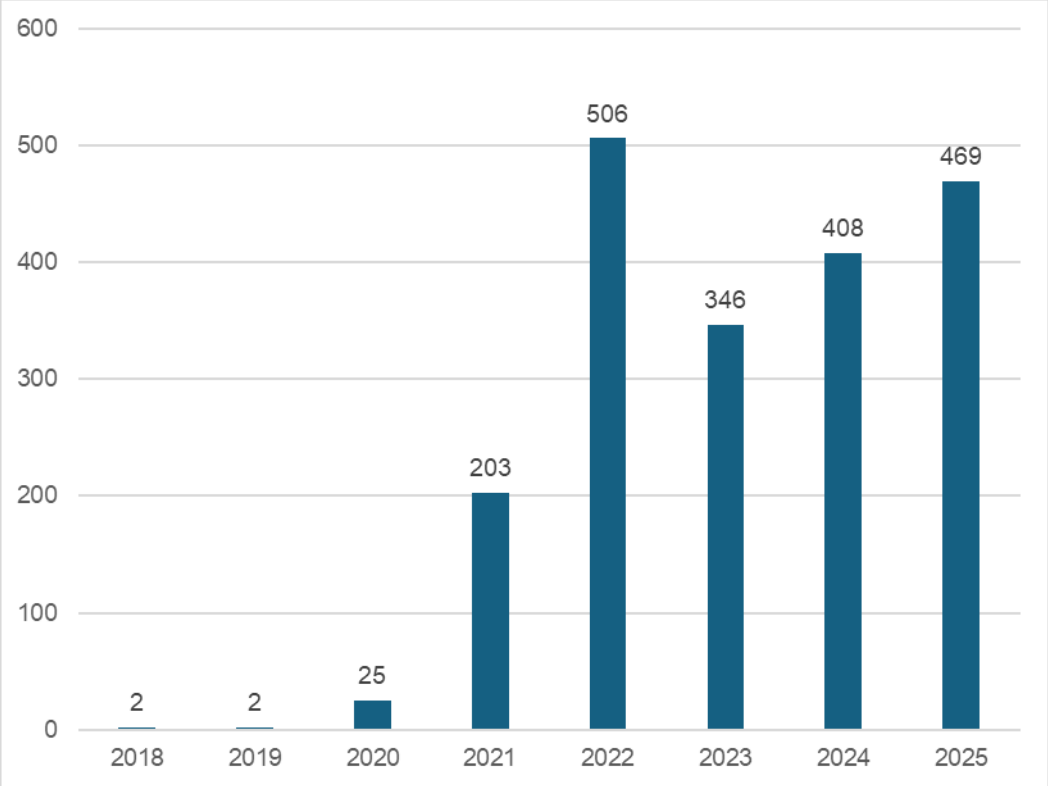
Tipo de tratamento	Estações	%
Primário	15	1,19%
Secundário	1041	82,49%
Terciário	12	0,95%
Pré condicionamento	8	0,63%
Sem informação	186	14,74%
Total	1262	100%

Fonte: Autoria própria.

3.3 CONSOLIDAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

As coletas foram realizadas pela CETESB entre 2018 e 2025, a fim de acumular dados para o estabelecimento da correlação que é objeto deste trabalho. As análises realizadas pela CETESB apresentam incertezas de 1,6% para COT e 10,6% para DBO (CETESB, 2024). A distribuição das coletas realizadas a cada ano pode ser verificada na Figura 6.

Figura 6: Número de coletas duplicadas de DBO e COT realizadas por ano em ETEs pela CETESB.



Fonte: Autoria própria.

A consolidação da estratégia se deu entre 2021 e 2022, alcançando patamar de 506 amostras em 2022, indicando esforço institucional significativo no período pós-pandemia. Em 2023 houve redução das coletas, com retomada paulatina nos anos seguintes. A queda percebida em 2023 pode ser explicada por se tratar de ano de mudança de gestão institucional, período de tomada de decisões e que poderia, a princípio, justificar a redução percebida. A retomada das coletas nos anos seguintes evidenciaria deste modo que a estratégia institucional foi mantida, no sentido de reforçar e dar continuidade às ações institucionais para a substituição analítica proposta neste trabalho. Os dados foram analisados conforme a situação de tratamento (efluente bruto ou tratado), tendo em vista a diferença na composição da matéria orgânica em cada uma das situações.

Foi realizada análise exploratória dos dados de COT e DBO com amostragens duplicadas nas 441 ETEs da Tabela 3 utilizando a ferramenta estatística Rstudio (Equipe Posit, 2025), considerando formas de seleção de dados propostas para verificação de eventuais diferenças estatísticas.

Os dados também foram avaliados tendo em vista a existência de resultados abaixo dos limites de quantificação (LQ) dos equipamentos para medição de COT (1 mg/l) e estimativa de DBO (2 mg/l, 3 mg/l ou 5 mg/l, a depender do laboratório), de modo que as análises estatísticas também consideraram a manutenção e a remoção dos resultados abaixo dos limites de quantificação.

Foi estabelecido um critério de aceitação de dados associado à razão DBO/COT para cada par de dados. A princípio, as diferenças de valores entre DBO e COT podem se dar pela forma como o carbono orgânico se encontra na amostra. A análise de DBO não é sensível ao carbono refratário (estável) detectado pelo ensaio de COT e cujo resultado pode ser elevado pela degradação de compostos como sulfetos ou nitrogenados. O carbono refratário não é passível de biodegradação pelas bactérias que consomem oxigênio e permitem estimar os valores de DBO, de modo que não é percebido neste ensaio. Entretanto, o carbono orgânico, refratário ou não, é percebido no ensaio de COT.

Nesse contexto, Knapik (2014) indica que a razão DBO/COT pode ser próxima de 1 quando há maior proporção de carbono lábil (passível de degradação) na amostra; que pode ser inferior a 1 (COT>DBO) quando houver maior proporção de carbono refratário na amostra e que pode ser superior a 1 (DBO>COT) em situações em que a análise de DBO contabilizar o consumo de oxigênio para degradação de outras substâncias.

Em termos de balanço de massas, tanto para a respiração celular (associada ao ensaio de DBO) quanto para a combustão (associada ao ensaio de COT), a reação para degradação de um átomo de carbono envolve dois átomos de oxigênio, restando balanço de massas na proporção de 32 g de O_2 para 12 g de C (massa molar C=12 g/mol, O=16 g/mol). Deste modo, se toda a matéria orgânica da amostra for lábil, a proporção de O_2 consumido para degradação do carbono é aproximadamente 2,67. SIWIEC *et al*., (2018) obtiveram razão DBO/COT entre 1,247 e 3,368 em estudo com 44 amostras, citando valores típicos variando entre 1,8 e 2,5 para o resultado da razão.

Assim, com base na relação estequiométrica do balanço de massas, para este trabalho foram considerados os valores em que a razão DBO/COT é menor ou igual a 2,7, com exclusão de 178 dos 1.967 pares de dados iniciais (considerados resultados de erros analíticos), restando 1.789 pares de dados, sendo 810 para efluentes brutos e 979 para efluentes tratados. Ainda que tenham sido removidos 9,05% dos dados iniciais, a quantidade de dados para estabelecimento da relação

funcional entre as variáveis é superior a outros estudos com o mesmo objetivo: Kuznietsov; Biedunkova (2024) utilizaram 48 amostras; Siwiec *et al*. (2018), 44 amostras; Dubber; Gray (2010), 11 amostras.

3.4 CONFIGURAÇÕES E ANÁLISES

Os dados foram organizados em 6 configurações distintas, para avaliação da variação do comportamento estatístico em cada condição, para identificação do melhor ajuste entre as variáveis, conforme pode ser verificado na Tabela 5. Os identificadores serão usados ao apresentar os resultados deste estudo.

Tabela 5 – Critérios de seleção dos dados

Situação de tratamento	Seleção de dados	Identificador
Efluente bruto	Sem filtro	bruto
	Acima de LQ	bruto_LQ
Efluente tratado	Sem filtro	tratado
	Acima de LQ	tratado_LQ
Todos os efluentes	Sem filtro	todos
	Acima de LQ	todos_LQ

Fonte: Autoria própria.

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente RStudio (Equipe Posit, 2025). Inicialmente, foi conduzida uma análise exploratória dos dados, contemplando estatísticas descritivas como valores mínimos e máximos, média, desvio padrão e coeficiente de variação, com o objetivo de caracterizar a distribuição e a variabilidade dos conjuntos avaliados.

A associação entre DBO e COT foi investigada por meio dos coeficientes de correlação de Pearson, Spearman e Kendall. A utilização conjunta dessas métricas permitiu avaliar tanto relações lineares quanto associações monotônicas entre as variáveis, além de verificar a sensibilidade dos resultados à presença de valores extremos.

Posteriormente, foram ajustados modelos matemáticos do tipo linear, polinomial de segunda ordem e potência, visando identificar a estrutura funcional mais adequada para estimar a DBO a partir dos valores de COT. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio dos coeficientes de determinação (R^2), da significância

estatística das regressões (p-valor), da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e da análise da distribuição dos resíduos.

A seleção do modelo final considerou de forma integrada os indicadores estatísticos obtidos, buscando maximizar a capacidade explicativa da regressão, minimizar os erros de predição e garantir coerência física aos resultados. Adicionalmente, foi avaliada a aplicabilidade prática das equações geradas, priorizando modelos que evitassem estimativas negativas de DBO e apresentassem potencial de utilização em diferentes faixas de concentração de COT.

Visando assegurar a reprodutibilidade dos procedimentos estatísticos e dos resultados apresentados nesta dissertação, o script computacional utilizado para o tratamento e análise dos dados, desenvolvido no ambiente RStudio, é disponibilizado no Apêndice A. Para o desenvolvimento da análise estatística, foram utilizadas as seguintes bibliotecas, disponíveis para instalação no RStudio: *readxl; minpack.lm; nlraa; ggplot2.*

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Como já indicado no item 3, as 1.789 amostras com dados de DBO e COT que atendem ao critério de seleção de dados foram divididas em 06 grupos, de modo a identificar algum tipo de ganho estatístico ou distinção entre os conjuntos, tendo em vista a composição distinta da matéria orgânica nos efluentes bruto e tratado.

A Tabela 6 evidencia menores coeficientes de variação para os grupos relativos ao efluente bruto, representando maior homogeneidade entre as amostras, o que é condizente com a característica geral dos efluentes brutos sanitários nas áreas urbanizadas, que não tendem a variar muito no que se refere à concentração de carga orgânica para usos sanitários. Os grupos de amostras relativas aos efluentes tratados apresentam maior coeficiente de variação, o que se justifica pela grande variação entre os sistemas de tratamento, desde sistemas simples como lagoas facultativas até sistemas terciários com filtros de membrana, denominados estações produtoras de água de reuso.

Importante destacar que a legislação vigente estabelece redução mínima da carga orgânica dos efluentes tratados em termos percentuais para possibilitar seu lançamento em corpo hídrico, o que permite, a princípio, o lançamento de cargas orgânicas em diversas concentrações, desde que atingida a redução mínima no tratamento e sem comprometer o enquadramento do corpo receptor (CONAMA, 2011), sendo fator determinante para a maior variação dos dados associados aos efluentes tratados.

Importante destacar que houve pouca alteração dos parâmetros estatísticos básicos para uma mesma tipologia de efluente (bruto, tratado ou todos) quando aplicado o critério de utilização de dados com ou sem atingimento do limite de quantificação dos equipamentos. A pouca alteração se deve à remoção de poucos dados quando utilizados apenas aqueles acima do limite de quantificação das análises, correspondendo a 0,25% dos dados para efluente bruto, 7,25% para efluentes tratados e 4,08% dos dados para a análise que contemplou todos os efluentes.

De modo geral, a correlação de Spearman trouxe melhores resultados, por ser aplicável a correlações não lineares e menos sensível aos outliers (Field; Miles; Field,

2012), comuns nesta amostragem em decorrência da grande variabilidade de dados. Como evidenciado na Tabela 7, para os dados de efluentes brutos o melhor coeficiente de correlação é o de Pearson, o que pode se justificar pela maior homogeneidade dos dados para efluentes brutos, com características predominantemente semelhantes. Os valores dos Coeficientes de Correlação de Pearson e Spearman para todos os grupos de dados analisados são iguais ou superiores a 0,85, evidenciando forte correlação entre as variáveis, abrindo caminho para o estabelecimento de relação funcional entre elas.

Foram testadas relações funcionais lineares, polinomiais e de potência entre as variáveis, com verificação dos melhores ajustes através da avaliação dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos. Novamente, foi percebida semelhança entre os valores obtidos para cada situação de efluente (bruto, tratado ou todos) quando separados os grupos gerais ou acima do limite de quantificação das análises.

A Tabela 8 apresenta os coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas diversas seleções de dados e nas relações funcionais testadas. Pode-se verificar que os valores têm pouca variação entre si quando se avalia a relação linear, polinomial ou expressa com potência entre as variáveis evidenciando que, de modo geral, a variação dos valores de COT é suficiente para explicar alterações nos valores de DBO. O menor valor do coeficiente de determinação se deu para o efluente tratado, novamente sob influência da variação entre os níveis de tratamento associados a cada uma das estações monitoradas pela CETESB.

Tendo em vista que não se evidenciou diferença nos parâmetros de correlação e coeficiente de determinação quando avaliados os conjuntos de dados contemplando os grupos gerais ou acima do limite de quantificação das análises, serão utilizados os conjuntos de dados relativos a todos os dados para efluentes brutos, tratados e nas duas situações de tratamento. Esta opção não compromete os resultados do trabalho e permitiria, a princípio, a aplicação da regressão estabelecida mesmo para valores mínimos de COT.

Tabela 6: Parâmetros estatísticos básicos associados aos grupos de dados avaliados

Parâmetro	COT	DBO
Todos os efluentes		
Número de amostras	1789	1789
Mínima	1,70	2,00
Média	114,39	170,76
Máxima	3100,00	3280,00
Desvio Padrão	158,13	223,34
Coeficiente de variação	1,38	1,31
Todos os efluentes - LQ		
Número de amostras	1716	1716
Mínima	1,70	2,00
Média	118,70	177,87
Máxima	3100,00	3280,00
Desvio Padrão	160,04	225,31
Coeficiente de variação	1,35	1,27
Efluente bruto		
Número de amostras	810	810
Mínima	4,40	2,00
Média	185,95	308,99
Máxima	3100,00	3280,00
Desvio Padrão	184,36	245,97
Coeficiente de variação	0,99	0,79
Efluente bruto - LQ		
Número de amostras	808	808
Mínima	4,40	2,00
Média	184,38	309,75
Máxima	3100,00	3280,00
Desvio Padrão	184,38	245,79
Coeficiente de variação	0,99	0,79
Efluente tratado		
Número de amostras	979	979
Mínima	1,70	2,00
Média	55,19	56,39
Máxima	1800,00	2820,00
Desvio Padrão	99,23	110,59
Coeficiente de variação	1,80	1,96
Efluente tratado - LQ		
Número de amostras	908	908
Mínima	1,70	2,00
Média	58,44	60,52
Máxima	1800,00	2820,00
Desvio Padrão	102,30	113,80
Coeficiente de variação	1,75	1,88

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Coeficientes de correlação associados aos grupos de dados avaliados

Situação	Seleção de dados	Identificador	Coeficiente de correlação		
			Pearson	Spearman	Kendall
Efluente bruto	Todos	bruto	0,89	0,86	0,69
	Acima de LQ	bruto_LQ	0,89	0,86	0,69
Efluente tratado	Todos	tratado	0,85	0,87	0,68
	Acima de LQ	tratado_LQ	0,85	0,86	0,67
Todos os efluentes	Todos	todos	0,89	0,94	0,79
	Acima de LQ	todos_LQ	0,89	0,94	0,79

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Coeficientes de determinação para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados

Situação	Seleção de dados	Identificador	Coeficiente de determinação (R^2)		
			Linear	Polinomial	Potência
Efluente bruto	Todos	bruto	0,79	0,81	0,81
	Acima de LQ	bruto_LQ	0,79	0,81	0,81
Efluente tratado	Todos	tratado	0,72	0,72	0,72
	Acima de LQ	tratado_LQ	0,72	0,72	0,72
Todos os efluentes	Todos	todos	0,80	0,82	0,81
	Acima de LQ	todos_LQ	0,79	0,82	0,81

Fonte: Autoria própria.

Kuznietsov e Biedunkova (2024) obtiveram coeficiente de determinação (R^2) equivalente a 0,85 na determinação da DBO a partir de valores de COT e temperatura da água no Rio Styr, na Ucrânia, em pontos associados ao lançamento de efluentes de usina nuclear, entretanto a relação pretendida necessitava de duas variáveis independentes para estimar a DBO.

Dubber e Gray (2010) realizaram análises para estabelecer regressão entre DBO e COT considerando a situação de tratamento do efluente. Para efluentes brutos, foi obtido R^2 equivalente a 0,963, entretanto para efluentes tratados o coeficiente de determinação foi de 0,333. A relação entre as variáveis foi estabelecida, naquela ocasião, com base em 11 coletas realizadas em estações de tratamento de efluentes de Dublin (Irlanda), com contribuição de efluentes industriais em maior ou menor grau em cada estação, o que pode ter impactado os resultados e a capacidade de explicação entre as variáveis. Os autores alcançaram regressão polinomial entre as

variáveis, com termo independente (coeficiente) equivalente a 23,7, de modo que para valores baixos de COT necessariamente a DBO seria elevada, ou seja, o intervalo de aplicação da regressão atingida na ocasião era limitado.

Para este trabalho, os coeficientes de determinação (R^2) para regressão polinomial ou do tipo potência são semelhantes, de maneira que a opção foi pela utilização de regressão do tipo potência, o que permite maior intervalo para utilização dos dados, uma vez que não haveria um valor constante máximo ou mínimo para estabelecimento da DBO a partir dos valores de COT.

Tal opção se justifica ainda pela obtenção dos menores valores da raiz do erro quadrático médio para este tipo de regressão do que para as lineares e polinomiais avaliadas neste trabalho, apresentados na Tabela 9. Ainda que a análise dos erros tenha apresentado valores próximos entre si, é possível identificar que os menores valores estão associados aos conjuntos de dados sem seleção pelo limite de quantificação. Uma vez que a raiz do erro quadrático médio é uma métrica que avalia a distância entre o valor calculado e o valor medido, os menores valores para este erro são desejáveis para o modelo pretendido.

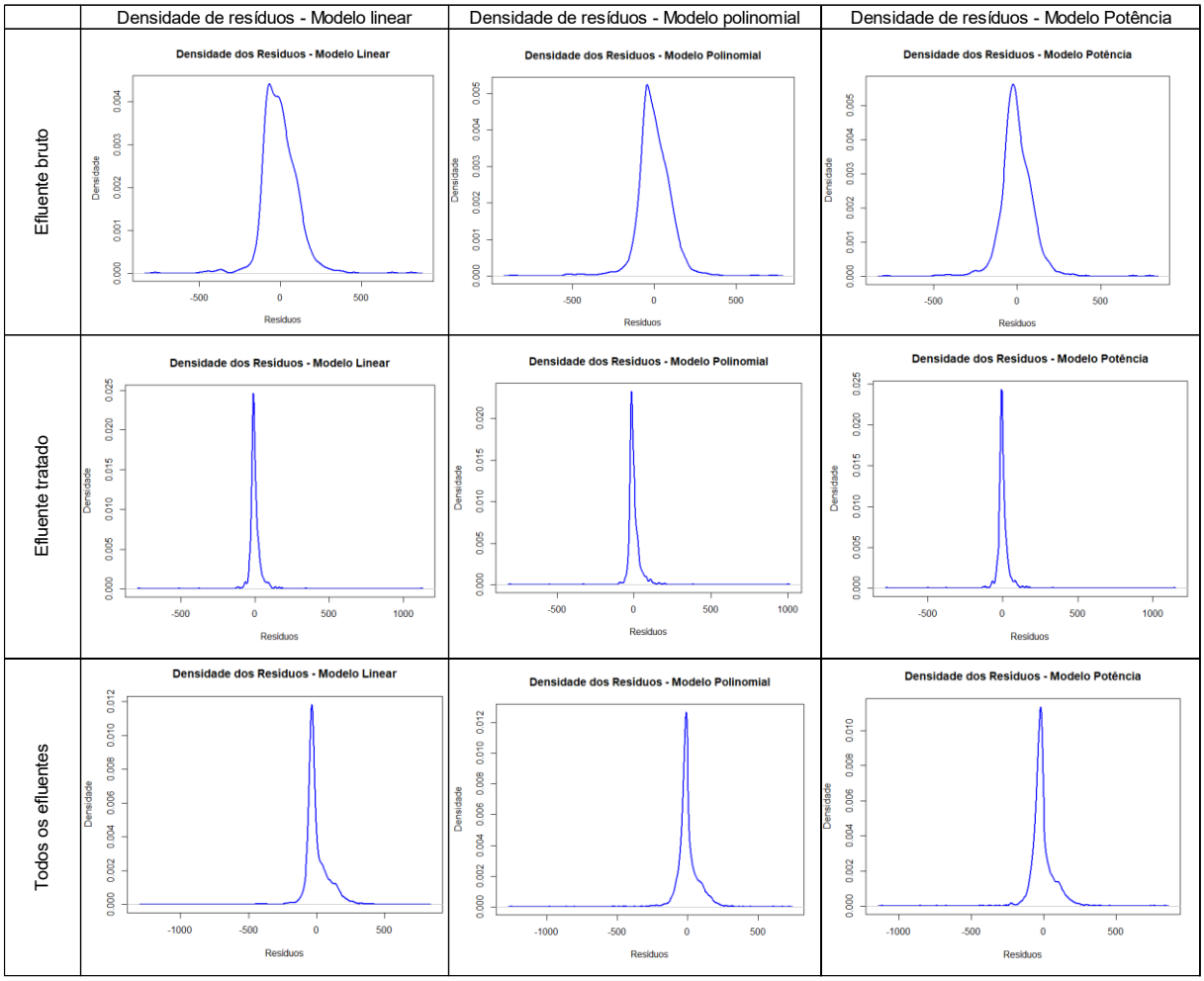
Tabela 9: Valores obtidos para Raiz do Erro Quadrático Médio para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados

Situação	Seleção de dados	Identificador	Raiz do erro quadrático médio		
			Linear	Polinomial	Potência
Efluente bruto	Todos	bruto	112,10	107,26	104,70
	Acima de LQ	bruto_LQ	112,14	107,35	104,83
Efluente tratado	Todos	tratado	58,57	58,12	58,53
	Acima de LQ	tratado_LQ	60,64	60,04	60,63
Todos os efluentes	Todos	todos	100,47	93,70	92,84
	Acima de LQ	todos_LQ	102,20	95,57	94,57

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 apresenta a pouca variação da raiz do erro quadrático médio entre os três tipos de correlação avaliados para cada grupo de efluentes, o que é condizente com as métricas avaliadas até o momento, sendo importante destacar que a maior área sob a curva dos gráficos de densidade de resíduos ocorre para o efluente bruto, onde, de fato, a raiz do erro quadrático médio é maior.

Figura 7: Curvas de densidade de resíduos para relações funcionais entre as variáveis nos grupos avaliados



Fonte: Autoria própria.

4.2 ESTABELECIMENTO DE REGRESSÃO PARA COT E DBO PARA EFLUENTES

A análise exploratória dos dados indicou que, de forma condizente com as métricas avaliadas, os índices de correlação e coeficientes de determinação são adequados para todos os conjuntos de dados. Uma vez que há grande variação entre os efluentes brutos e tratados no que se refere aos poluentes orgânicos removidos durante o tratamento, que dependem não apenas dos compostos constituintes do efluente, mas também da tipologia de tratamento utilizada, recomendamos a utilização de duas relações funcionais, sendo uma destinada aos efluentes brutos e outra aos efluentes tratados.

Houve opção, como já indicado, pelo uso de regressão do tipo potência, sem que existam perdas na qualidade do modelo, tendo em vista a manutenção dos índices de correlação e coeficientes de determinação entre os modelos avaliados.

Os dados avaliados neste trabalho apresentaram, assim, resultados adequados considerando a seguinte estrutura:

$$DBO = \alpha\ (COT)^{\beta}$$

Há vantagem na opção pela estrutura apresentada, de aplicação mais simples por conter menos variáveis e cálculo pouco extenso. O modelo possui estrutura de potência, equivalente ao modelo que já vem sendo utilizado pela CETESB para estimar a DBO a partir de valores de COT em água bruta, facilitando a incorporação da estrutura na rotina técnica dos laboratórios analíticos. Os coeficientes α e β foram ajustados para efluentes brutos e tratados, cujos valores e coeficientes de determinação são apresentados na Tabela 10.

Deste modo, a estrutura da regressão alcançada neste estudo, em formato de potência, permite estimar valores de DBO a partir de COT pela alteração dos valores dos coeficientes α e β a depender da utilização proposta. Se água bruta, devem ser utilizados os coeficientes indicados pela CETESB, (2024) e em caso de efluentes sanitários, sugerimos uso dos coeficientes da Tabela 10 para utilização em efluentes brutos ou tratados.

Tabela 10: Coeficientes ajustados para os grupos de dados avaliados

	Efluente bruto	Efluente tratado
α	4,52	1,17
β	0,818	0,97
R^2	0,814	0,72

Fonte: Autoria própria.

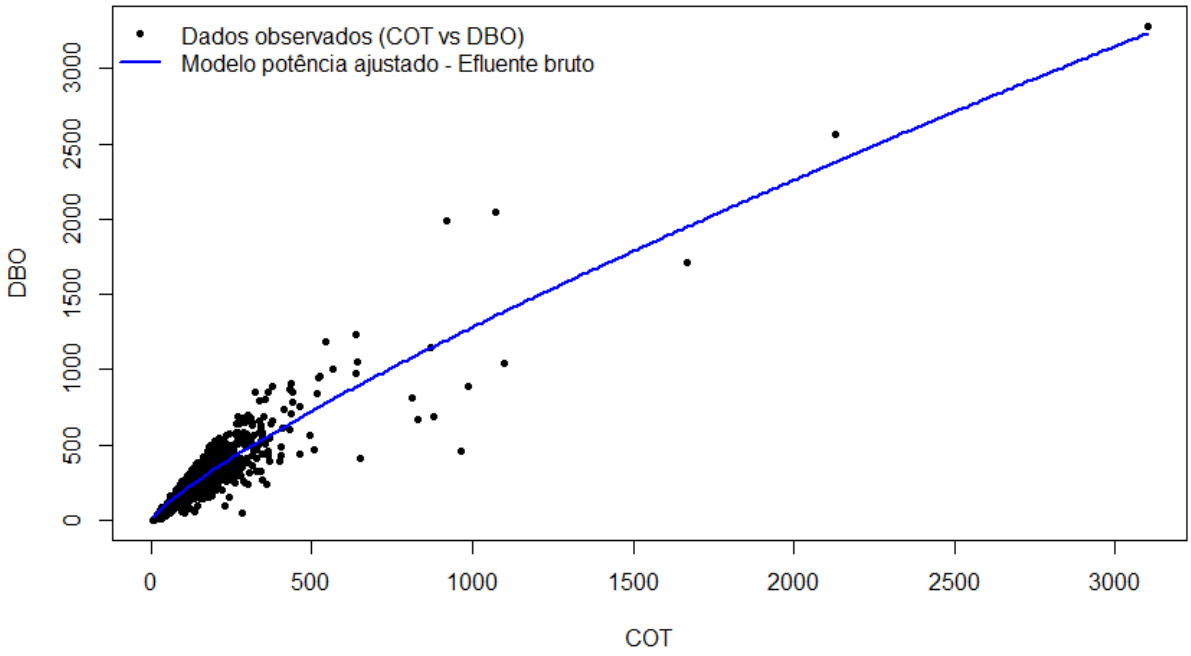
As curvas de regressão para efluentes brutos e tratados foram ajustadas sobre as nuvens de pontos dos dados observados (Figuras 8 e 9), evidenciando bom ajuste geral. Em avaliação aos outliers, não foi identificada motivação ou erro de medição

que justificasse sua remoção, tendo em vista a aparente compatibilidade entre os valores de DBO e COT coletados, de modo que os outliers foram mantidos.

As Figuras 8 e 9 apresentam a sobreposição das curvas de regressão ajustadas aos pares de dados observados de COT e DBO para efluentes brutos e tratados. Em ambos os casos, observa-se uma associação positiva entre as variáveis, indicando que o aumento das concentrações de carbono orgânico total tende a ser acompanhado por maiores valores de demanda bioquímica de oxigênio. De modo geral, as curvas ajustadas representam adequadamente a tendência central dos dados observados, corroborando os resultados obtidos nas análises de correlação e regressão.

Embora sejam observadas algumas observações extremas, estas não apresentam comportamento incompatível com a relação geral entre COT e DBO. Além disso, não foram identificadas evidências de inconsistências analíticas ou erros de medição que justificassem sua exclusão. Dessa forma, optou-se pela manutenção desses valores na base de dados, preservando a representatividade das diferentes condições operacionais e características dos efluentes avaliados.

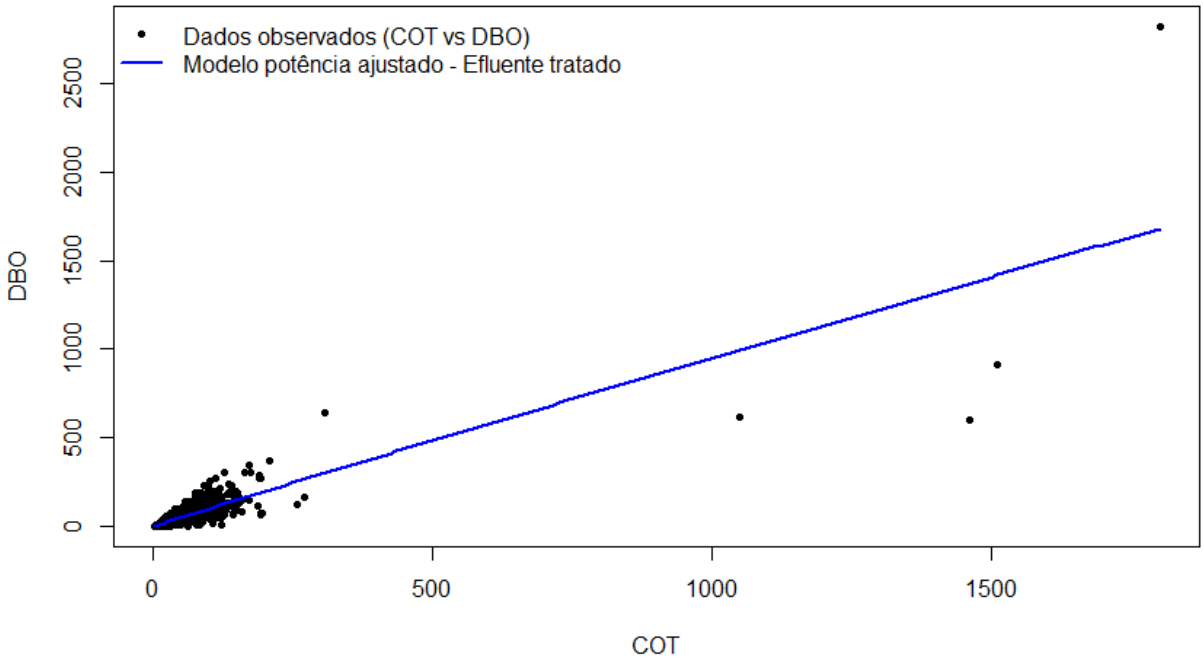
Figura 8: Sobreposição da curva de regressão sobre os valores medidos para Efluentes Brutos



Fonte: Autoria própria.

Para os efluentes brutos (Figura 8), observa-se que a maior parte das observações se concentra nas faixas inferiores de COT e DBO, apresentando distribuição relativamente próxima à curva ajustada. Entretanto, à medida que os valores de COT aumentam, verifica-se ampliação da dispersão dos dados em torno da regressão, indicando que valores semelhantes de COT podem estar associados a diferentes concentrações de DBO. Ainda assim, a tendência geral entre as variáveis permanece claramente definida ao longo de toda a faixa de concentrações analisada.

Figura 8: Sobreposição da curva de regressão sobre os valores medidos para Efluentes Tratados



Fonte: Autoria própria.

Para os efluentes tratados (Figura 9), também se observa aumento da dispersão dos dados nas faixas mais elevadas de COT. Entretanto, esse comportamento é mais pronunciado do que aquele observado para os efluentes brutos, resultando em maior espalhamento dos pontos em torno da curva de regressão e, consequentemente, em menores coeficientes de determinação. Assim, verifica-se que a variação dos valores de COT apresenta menor capacidade de explicar a variabilidade observada nos valores de DBO para os efluentes tratados. Uma explicação possível para esta situação se dá pelo fato de que existem

possibilidades de composição dos tratamentos mais comuns com etapas de polimento, capazes de remover de maneira distinta hidrocarbonetos e substâncias húmicas, que são compostos não percebidos na análise de DBO, porém detectados na análise de COT.

4.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PROPOSTA

Dentre os desafios para a substituição tecnológica pela medição de COT em substituição à DBO, o custo associado às trocas de equipamentos e calibração pode ser considerado o mais marcante. A decisão pelo melhor modelo a ser utilizado na avaliação do COT, se analisador manual ou automatizado, bem como a quantidade de acessórios vinculados ao equipamento influenciam diretamente seu custo, com ampla gama de valores para custeio e manutenção. Ainda que exista equivalência nos custos de implantação de equipamentos para medição de COT e DBO em algumas regiões do país (Arnesen *et al*., 2018), a substituição tecnológica deve ser avaliada e planejada de modo a proporcionar maior ganho ambiental.

Tal ganho se configura na maior vantagem da substituição proposta, tendo em vista a maior capacidade de processamento de amostras, redução de incertezas, melhorando a resposta a eventos de poluição e eliminação de resíduos tóxicos, em especial nos laboratórios em que a análise de DBO está associada à de DQO.

Uma vez que as análises de DBO e COT não consideram exatamente os mesmos compostos na massa líquida, a substituição imediata de uma análise pela outra poderia se apresentar como um problema na composição de séries históricas e na comparação de resultados, tendo em vista que não é factível a substituição imediata e integral das análises. Este trabalho visa justamente contornar este desafio através do estabelecimento de relação funcional que permita a utilização de uma variável ou outra, possibilitando a comparação de dados históricos e regionais com segurança, até que a substituição tecnológica se consolide.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto e análises estatísticas associadas permitiu confirmar, para quantidade de dados bastante robusta com relação a outros estudos, a existência de forte correlação entre as variáveis DBO e COT para efluentes de características domésticas.

Também, foi possível estabelecer relação funcional para determinação dos valores de DBO a partir de COT para este tipo de efluente, sendo recomendada a utilização de coeficientes distintos para cada situação de tratamento, se efluente bruto ou tratado.

A relação funcional, elaborada a partir de dados de ampla gama de sistemas de tratamento, não apresentou restrições de intervalos numéricos para sua aplicação, tampouco associadas às condições do efluente para utilização da relação, ainda que tenham sido desenvolvidas regressões distintas para efluentes brutos e tratados.

A relação funcional estabelecida neste trabalho permitirá a eliminação de resíduos perigosos decorrentes da análise de DQO, etapa necessária para estimar a DBO, proporcionando ganho ambiental na gestão de resíduos, em especial em laboratórios menos integrados em termos logísticos, seja por dificuldade de acesso ou localizados em áreas remotas. Também há ganho no processamento de amostras, tendo em vista a redução do tempo de análise e minimização das incertezas, quando comparadas as análises de COT e DBO.

Além disso, o estabelecimento de relação funcional entre as variáveis permite substituição tecnológica gradativa, sem que ocorram perdas na análise e comparação de resultados.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam boa correlação entre as variáveis, entretanto o coeficiente de determinação entre elas para o efluente tratado é inferior ao obtido para efluente bruto, evidenciando que a variação dos valores de COT é menos capaz de explicar variações nos valores de DBO para efluentes tratados.

Para continuidade da proposta de substituição analítica, há necessidade de obtenção de mais dados para efluentes de características industriais, de modo a possibilitar o desenvolvimento de relações funcionais entre COT e DBO também para este tipo de efluente, considerando as diversas tipologias no que se refere à sua composição geral. Ainda assim, este trabalho apresenta contribuições para avanço na

proposta de estimar, com segurança, valores de DBO a partir dos valores obtidos para COT.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A título de contribuição com outros trabalhos a serem desenvolvidos associados à temática da relação entre COT e DBO, entendemos que são caminhos viáveis:

Avaliação da relação entre as variáveis em tipologias e níveis distintos de tratamento, verificando se há influência da tipologia de tratamento do efluente sanitário sobre a relação entre COT e DBO;

Desenvolvimento de modelos preditivos multivariados, verificando se a inclusão de outros parâmetros analíticos juntamente com o COT alteram a acurácia da estimativa dos valores de DBO, buscando melhorar a capacidade preditiva dos modelos, especialmente para efluentes tratados.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **RELATÓRIO CONJUNTURA DOS RECURSOS HÍDRICOS – 2025**. Brasília. Disponível em: https://conjuntura-2025.webflow.io/. Acesso em: 15 ago. 2026.

AGUILAR-TORREJÓN, Jazmín Alhelí; BALDERAS-HERNÁNDEZ, Patricia; ROA-MORALES, Gabriela; BARRERA-DÍAZ, Carlos Eduardo; RODRÍGUEZ-TORRES, Israel; TORRES-BLANCAS, Teresa. Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and, TOC in water—An overview through time. **SN Applied Sciences**, *[S. l.]*, v. 5, n. 4, 2023. DOI: 10.1007/s42452-023-05318-7.

ALMEIDA, ELLEN; KOZAK, Caroline; PRADO, Luciane; FERNANDES, Cristóvão. Reflexões e fragilidades sobre a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em rios. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, *[S. l.]*, v. 14, n. 1, p. 9–9, 2017. DOI: 10.21168/rega.v14e9.

ARNESEN, Allan Saddi; SILVA LIMA, Fabiana Aparecida; LOTITO, Danieli Melissa Rodrigues; SILVA, Priscilla Leandro; ROVERI, Flávia. **AVALIAÇÃO DA ADOÇÃO DO PARÂMETRO CARBONO ORGÂNICO TOTAL EM SUBSTITUIÇÃO À DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE CORPOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS**. São Paulo.

AZIZ, J. A.; TEBBUTT, T. H. Y. SIGNIFICANCE OF COD, BOD AND TOC CORRELATIONS IN KINETIC MODELS OF BIOLOGICAL OXIDATION. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 14, p. 319–324, 1980. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90077-9. Acesso em: 3 jul. 2025.

BRUNI, A. C.; MENEGON JUNIOR, N.; RUGUE JUNIOR, A. C. **Estudo estatístico da relação funcional entre os parâmetros DBO5 e COT em corpos d´agua do Estado de São Paulo**. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/12/2020/09/Estudo-estatistico-da-relacao-funcional-entre-os-parametros-DBO-e-COT-em-corpos-d%C2%B4agua-do-Estado-de-Sao-Paulo.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.

CETESB. **NOTA TÉCNICA Assunto: Substituição da DBO pelo COT na Rede Básica de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais**. São Paulo. 2024.

CETESB. **RELATÓRIO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS INTERIORES DO ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2025/12/Metodologia-para-Avaliacao-das-Aguas-Interiores.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026.

CHRISTIAN, Evelyn; BATISTA, Jacimaria R.; GERRITY, Daniel. Use of COD, TOC, and Fluorescence Spectroscopy to Estimate BOD in Wastewater. **Water Environment Research**, *[S. l.]*, v. 89, n. 2, p. 168–177, 2017. DOI: 10.2175/106143016x14504669768976.

CONSELHO DAS COMUNIDADES EUROPEIAS. Diretiva 2024/3019/CEE. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=OJ:L_202403019. Acesso em: 15 ago. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução CONAMA 430. Este documento pode ser verificado no endereço eletrônico http://www.in.gov.br/autenticidade.html , pelo código 00012011051600089 Documento assinado digitalmente conforme MP n o-2.200-2 de 24/08/2001, que institui a Infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira-ICP-Brasil. **Diário Oficial da União**, 16 maio. 2011. Disponível em: http://www.in.gov.br/autenticidade.html.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Processo: 02000.001228/2024-28 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. 2025. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=processo&id=2677. Acesso em: 6 nov. 2025.

CONSTABLE, T. W.; MCBEAN, E. R. BOD/TOC correlations and their application to water quality evaluation. **Water Air Soil Pollut 11**, *[S. l.]*, p. 363–375, 1979. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00296593.

DUBBER, Donata; GRAY, Nicholas F. Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, *[S. l.]*, v. 45, n. 12, p. 1595–1600, 2010. DOI: 10.1080/10934529.2010.506116. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10934529.2010.506116. Acesso em: 6 nov. 2025.

EQUIPE POSIT. **RStudio: Ambiente de Desenvolvimento Integrado para R**. Boston, MAPosit Software, PBC, , 2025.

FIELD, Andy; MILES, Jeremy; FIELD, Zoë. **Discovering statistics Using R**. [s.l: s.n.].

FONSECA, J. C. L.; SILVA, M. R. A.; BAUTITZ, I. R.; NOGUEIRA, R. F. P.; MARCHI, M. R. R. Avaliação da confiabilidade analítica das determinações de COT. **Eclética Química**, *[S. l.]*, v. 31, número 3, p. 47–52, 2006.

FREITAS, Priscila Ramos; SILVA JÚNIOR, Édio Damasceno Da; LONGHIN, Sandra Regina. Caracterização dos resíduos químicos gerados em laboratório de análises ambientais. **Estudos**, *[S. l.]*, v. 42, n. 4, p. 433–448, 2015.

HUANG, Man Hong; LI, Yong Mei; GU, Guo Wei. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater. **Desalination**, *[S. l.]*, v. 262, n. 1–3, p. 36–42, 2010. DOI: 10.1016/j.desal.2010.05.037.

KLYMENKO, N. A.; SAMSONI-TODOROVA, O. O.; SAVCHYNA, L. A. Reasonability of Using the Total Organic Carbon Content in Water Supply Sources and Potable Water as a Water Quality Indicator. **Journal of Water Chemistry and Technology**, *[S. l.]*, v. 47, n. 1, p. 81–90, 2025. DOI: 10.3103/s1063455x25010096.

KNAPIK, Heloise Garcia. **ORGANIC MATTER CHARACTERIZATION AND MODELING IN POLLUTED RIVERS FOR WATER QUALITY PLANNING AND MANAGEMENT**. 2014. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2014.

KNAPIK, Heloise Garcia; FERNANDES, Cristóvão V. S.; DE AZEVEDO, Júlio César R.; FRANÇA, Marianne S.; PORTO, Mônica Ferreira do Amaral. DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM ÁGUAS NATURAIS: Estudo de caso do Rio Iguaçu. *Em*: XVIII SIMPÓSIO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2009, **Anais** [...]. [s.l: s.n.]

KUZNIETSOV, Pavlo M.; BIEDUNKOVA, Olha O. Multivariate regression studies for the investigation of the COD, BOD, and TOC concentrations in the water of the Styr River within the zone of influence of the power plant discharge. **Water Practice and Technology**, *[S. l.]*, v. 19, n. 4, p. 1412–1426, 2024. DOI: 10.2166/wpt.2024.075.

MENEZES, Juliana Magalhães; PRADO, Rachel Bardy; SILVA JÚNIOR, Gerson Cardoso Da; SANTOS, Rodrigo Tavares Dos. Índices de Qualidade de Água: métodos e aplicabilidade. In: PRADO, Rachel Bardy; TURETTA, Ana Paula Dias; ANDRADE, Aluísio Granato de (org). Manejo e Conservação do SOLO e da ÁGUA no Contexto das Mudanças Ambientais. *Em*: Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/859117/manejo-e-conservacao-do-solo-e-da-agua-no-contexto-das-mudancas-ambientais. Acesso em: 31 jul. 2025.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976 e alterações. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**: seção 1, São Paulo, SP, 09 SET 1976. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10406.htm. Acesso em: 07/04/2026.

SHETTY, Akhil; GOYAL, Ajay. Total organic carbon analysis in water – A review of current methods. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 65, p. 3881–3886, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.173.

SIWIEC, Tadeusz; RECZEK, Lidia; MICHEL, Magdalena M.; GUT, Beata; HAWER-STROJEK, Paulina; CZAJKOWSKA, Justyna; JÓŹWIAKOWSKI, Krzysztof; GAJEWSKA, Magdalena; BUGAJSKI, Piotr. Correlations between organic pollution indicators in municipal wastewater. **Archives of Environmental Protection**, *[S. l.]*, v. 44, n. 4, p. 50–57, 2018. DOI: 10.24425/aep.2018.122296.

APÊNDICE A

```
# PROJETO CORRELAÇÃO COT E DBO


# 1-CARREGAR BIBLIOTECAS
#-----------------------------------------------------

library(readxl)
library(minpack.lm)
library(nlraa)
library(ggplot2)


#2- LEITURA DA PLANILHA

# DADOS FILTRADOS COT DBO

dadosbrutos=read_xlsx("INSERIR   ENDEREÇO   DO   ARQUIVO",
sheet=2)


# verificar tipo do objeto
class(dadosbrutos)

# transformar em vetor numérico
dados = as.numeric(unlist(dadosbrutos))

# transformar em matriz
matriz = matrix(data = dados,nrow = 810,ncol = 2,byrow =
FALSE)

# nomear colunas
colnames(matriz) = c("COT", "DBO")


#3- ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

# COT

# MÉDIA
media_COT = mean(matriz[,1])
print(media_COT)

# MEDIANA
mediana_COT = median(matriz[,1])
print(mediana_COT)

# VARIÂNCIA
variancia_COT = var(matriz[,1])
```

```
print(variancia_COT)

# DESVIO PADRÃO
desvio_padrao_COT = sd(matriz[,1])
print(desvio_padrao_COT)

# COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
coef_var_COT = desvio_padrao_COT/media_COT
print(coef_var_COT)

# HISTOGRAMA
hist(
  matriz[,1],
  xlab = "COT",
  ylab = "Frequência",
  main = "Histograma para valores de COT",
  xlim = c(0,500),
  ylim = c(0,100),
  breaks = 100,
  col = "gray"
)

# TESTE DE NORMALIDADE
normalidade_COT = shapiro.test(matriz[,1])

print(normalidade_COT)

#NOTA
# No teste de Shapiro-Wilk a interpretação é:
# hipótese nula: H0 os dados são normais;
# H1 os dados não são normais;


# DBO
#=====================================================

# MÉDIA
media_DBO = mean(matriz[,2])
print(media_DBO)

# MEDIANA
mediana_DBO = median(matriz[,2])
print(mediana_DBO)

# VARIÂNCIA
variancia_DBO = var(matriz[,2])
print(variancia_DBO)

# DESVIO PADRÃO
desvio_padrao_DBO = sd(matriz[,2])
print(desvio_padrao_DBO)
```

```
# COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
coef_var_DBO = desvio_padrao_DBO/media_DBO
print(coef_var_DBO)

# HISTOGRAMA
hist(
  matriz[,2],
  xlab = "DBO",
  ylab = "Frequência",
  main = "Histograma para valores de DBO",
  xlim = c(0,500),
  ylim = c(0,50),
  breaks = 100,
  col = "gray"
)

# TESTE DE NORMALIDADE
normalidade_DBO = shapiro.test(matriz[,2])

print(normalidade_DBO)


#-----------------------------------------------------
# CORRELAÇÕES
#-----------------------------------------------------

# CORRELAÇÃO PEARSON
R_PEARSON = cor(matriz,method = "pearson")

print(R_PEARSON)

# TESTE DE SIGNIFICÂNCIA
teste_pearson = cor.test(
  matriz[,1],
  matriz[,2],
  method = "pearson"
)

print(teste_pearson)

# CORRELAÇÃO SPEARMAN
R_SPEARMAN = cor(matriz,method = "spearman")

print(R_SPEARMAN)

# CORRELAÇÃO KENDALL
R_KENDALL = cor(matriz,method = "kendall")

print(R_KENDALL)
```

```
#-----------------------------------------------------
# GRÁFICO DE DISPERSÃO
#-----------------------------------------------------

plot(matriz,type = "p",pch = 16,col = "blue",main =
"Dispersão entre COT e DBO")


#-----------------------------------------------------
# REGRESSÃO LINEAR
#-----------------------------------------------------

Linear = lm(DBO ~ COT,data = dadosbrutos)

summary(Linear)

Linear$coefficients

# R² MODELO LINEAR
R2_linear = summary(Linear)$r.squared

print(R2_linear)

# AIC MODELO LINEAR
AIC_linear = AIC(Linear)

print(AIC_linear)


#-----------------------------------------------------
# REGRESSÃO POLINOMIAL
#-----------------------------------------------------

Polinomial1 = lm(
  formula = DBO ~ COT + I(COT^2),
  data = dadosbrutos
)

summary(Polinomial1)

Polinomial1$coefficients

print(Polinomial1)

# R² MODELO POLINOMIAL
R2_polinomial = summary(Polinomial1)$r.squared

print(R2_polinomial)

# AIC MODELO POLINOMIAL
```

```
AIC_polinomial = AIC(Polinomial1)

print(AIC_polinomial)


#------------------------------------------------------
# MODELO NÃO LINEAR - POTÊNCIA
#------------------------------------------------------

valores_iniciais <- list(
  A = 2.28,
  B = 0.961
)

exp2 = nlsLM(
  DBO ~ A*COT^B,
  data = dadosbrutos,
  start = valores_iniciais
)

# resumo do ajuste
summary(exp2)

# imprimir modelo
print(exp2)

# R² MODELO POTÊNCIA
R2_potencia = unlist(R2M(exp2))[1]

print(R2_potencia)

# AIC MODELO POTÊNCIA
AIC_potencia = AIC(exp2)

print(AIC_potencia)


#------------------------------------------------------
# COMPARAÇÃO DOS MODELOS
#------------------------------------------------------

AIC(
  Linear,
  Polinomial1,
  exp2
)


#------------------------------------------------------
# RESÍDUOS
#------------------------------------------------------
```

```
# resíduos modelo linear
residuos_linear = residuals(Linear)

# resíduos modelo polinomial
residuos_polinomial = residuals(Polinomial1)

# resíduos modelo potência
residuos_potencia = residuals(exp2)


#-----------------------------------------------------
# HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS
#-----------------------------------------------------

hist(
  residuos_linear,
  main = "Histograma dos Resíduos - Modelo Linear",
  xlab = "Resíduos",
  col = "gray",
  breaks = 40
)

hist(
  residuos_polinomial,
  main = "Histograma dos Resíduos - Modelo Polinomial",
  xlab = "Resíduos",
  col = "gray",
  breaks = 40
)

hist(
  residuos_potencia,
  main = "Histograma dos Resíduos - Modelo Potência",
  xlab = "Resíduos",
  col = "gray",
  breaks = 40
)


#-----------------------------------------------------
# DENSIDADE DOS RESÍDUOS
#-----------------------------------------------------

plot(
  density(residuos_linear),
  main = "Densidade dos Resíduos - Modelo Linear",
  xlab = "Resíduos",
  ylab = "Densidade",
  lwd = 2,
  col = "blue"
```

```
)

plot(
  density(residuos_polinomial),
  main = "Densidade dos Resíduos - Modelo Polinomial",
  xlab = "Resíduos",
  ylab = "Densidade",
  lwd = 2,
  col = "blue"
)

plot(
  density(residuos_potencia),
  main = "Densidade dos Resíduos - Modelo Potência",
  xlab = "Resíduos",
  ylab = "Densidade",
  lwd = 2,
  col = "blue"
)


#-----------------------------------------------------
# RMSE
#-----------------------------------------------------

# RMSE MODELO LINEAR
RMSE_linear = sqrt(mean(residuos_linear^2))

print(RMSE_linear)

# RMSE MODELO POLINOMIAL
RMSE_polinomial = sqrt(mean(residuos_polinomial^2))

print(RMSE_polinomial)

# RMSE MODELO POTÊNCIA
RMSE_potencia = sqrt(mean(residuos_potencia^2))

print(RMSE_potencia)


#-----------------------------------------------------
# TABELA COMPARATIVA DOS MODELOS
#-----------------------------------------------------

comparacao_modelos = data.frame(

  Modelo = c(
    "Linear",
    "Polinomial",
    "Potência"
```

```
  ),

  R2 = c(
    R2_linear,
    R2_polinomial,
    R2_potencia
  ),

  AIC = c(
    AIC_linear,
    AIC_polinomial,
    AIC_potencia
  ),

  RMSE = c(
    RMSE_linear,
    RMSE_polinomial,
    RMSE_potencia
  )
)

# arredondar resultados
comparacao_modelos[,2:4] = round(
  comparacao_modelos[,2:4],
  4
)

# mostrar tabela
print(comparacao_modelos)

#####################################################
#-----------------------------------------------------
# GRÁFICO - MODELO POTÊNCIA
#-----------------------------------------------------

# grade de COT
COT_grid = seq(
  min(dadosbrutos$COT),
  max(dadosbrutos$COT),
  length.out = 200
)

# parâmetros do modelo
A = coef(exp2)["A"]
B = coef(exp2)["B"]

# curva ajustada
fit = A * COT_grid^B


#-----------------------------------------------------
```

```
# GRÁFICO
#-----------------------------------------------------

plot(dadosbrutos$COT,dadosbrutos$DBO,pch   =   20,col   =
"black",xlab = "COT",ylab = "DBO")

lines(COT_grid, fit, col = "blue", lwd = 2)
legend("topleft",
       legend = c("Dados observados (COT vs DBO)",
                  "Modelo  potência  ajustado  -  Efluente
bruto"),
       col = c("black", "blue"),
       pch = c(20, NA),
       lty = c(NA, 1),
       lwd = c(NA, 2),
  bty = "n")
```