AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE LANÇAMENTOS DE ESGOTO EM CORPOS HÍDRICOS SERGIPANOS A PARTIR DO MODELO DE STREETER-PHELPS: PIAUITINGA E RIO SÃO FRANCISCO

Hellen Karine Sales dos Santos[1]; Kaio Matheus Santos Matos[2] Daniel Moureira Fontes Lima[3]; Elizangela Santos Ferreira[4]; Vânia Elisabete Schneider[5]& Ronaldo Guilherme Santos Lima[6]

RESUMO – O progresso da urbanização e a ampliação dos sistemas de esgotamento sanitário demandam maior rigor no lançamento de efluentes nos recursos hídricos. Neste contexto, este trabalho avaliou os efeitos do lançamento de efluentes tratados por estações de tratamento de esgoto (ETE) sobre a qualidade dos corpos hídricos receptores, em conformidade com os padrões legislativos. A área de estudo englobou as ETEs situadas no estado de Sergipe e os corpos hídricos receptores: o Rio Piauitinga e o Rio São Francisco. Foi aplicado o modelo de Streeter-Phelps, com base na avaliação da demanda bioquímica de oxigênio e da concentração crítica de oxigênio dissolvido no rio receptor. Assim, o modelo mostrou que os efluentes tratados não alteraram significativamente a qualidade do Rio São Francisco, mantendo-o dentro dos padrões de enquadramento legal. Em contrapartida, o Rio Piauitinga apresentou violações dos limites, indicando insuficiência no tratamento dos efluentes e baixa capacidade de diluição do corpo hídrico. Assim, as estações em desconformidade demandam ações de adequação e gestão para assegurar a manutenção da qualidade ambiental e o atendimento à legislação vigente.

ABSTRACT– The advancement of urbanization and the expansion of wastewater collection and treatment systems require stricter control of effluent discharges into water resources. In this context, this study evaluated the effects of effluent discharges from wastewater treatment plants (WWTPs) on the quality of receiving water bodies, in accordance with legislative standards. The study area

[1]) Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (79) 98834-4830, hellensaleseng@gmail.com
[2]) Departamento de Engenharia Civil, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (79) 99644-9823, kaiomatos750@gmail.com
[3]) Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (79) 98890-0335, danielmfl@academico.ufs.br
[4]) Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (79) 99686-0359, eng.ellyferreira@gmail.com
[5]) Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (54) 98166-0614, veschnei@ucs.br
[6]) Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão – Sergipe, Brasil, (79) 99854-3875, ronaldomuri424@gmail.com

comprised WWTPs located in the state of Sergipe, Brazil, and their receiving water bodies: the Piauitinga River and the São Francisco River. The Streeter–Phelps model was applied based on the assessment of biochemical oxygen demand (BOD) and the critical dissolved oxygen concentration in the receiving rivers. The model results indicated that the treated effluents did not significantly affect the water quality of the São Francisco River, which remained within the legal classification standards. In contrast, the Piauitinga River exceeded the established limits, indicating insufficient effluent treatment and a low dilution capacity in the water body. Therefore, the non-compliant treatment plants require corrective and management actions to maintain environmental quality and ensure compliance with current legislation.

Palavras-Chave – Demanda Bioquímica de Oxigênio; Oxigênio Dissolvido; Recursos hídricos.

1 - INTRODUÇÃO

O avanço da urbanização e da coleta de esgoto exige maior controle dos impactos ambientais, uma vez que a manutenção da qualidade da água depende não apenas do tratamento dos efluentes, bem como a capacidade de assimilação do corpo receptor (von Sperling 2005; Chapra *et al.*, 2021; Pereira Junior *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, a Demanda Bioquímica de Oxigênio é um importante indicador da qualidade dos efluentes sanitários em ambientes aquáticos, uma vez que elevadas concentrações podem diminuir o oxigênio dissolvido e pode comprometer o equilíbrio ecológico e o atendimento aos padrões de qualidade (von Sperling, 2005; Brasil, 2005).

Nesse contexto, o modelo clássico de Streeter-Phelps destaca-se como uma das principais metodologias utilizadas em estudos de qualidade da água, especialmente na avaliação dos mecanismos de autodepuração de corpos hídricos após o lançamento de cargas orgânicas pontuais (Wu e Yu, 2021). A partir da aplicação, é possível identificar a condição crítica de oxigenação do corpo hídrico e avaliar se a carga lançada excede a capacidade assimilativa do corpo receptor (Chapra *et al.*, 2021; Mendivil-García *et al.*, 2022).

Considerando diferentes estações de esgotamento sanitário localizadas no estado de Sergipe, esta pesquisa teve como objetivo analisar as condições de qualidade da água em rios sergipanos, receptores de efluentes, considerando o lançamento de efluentes tratados, utilizando o modelo de Streeter-Phelps para avaliar a dinâmica da DBO e do oxigênio dissolvido.

2 – METODOLOGIA

2.1 - Área de estudo

A área de estudo engloba estações de tratamento de esgoto (ETE) sanitárias localizadas no estado de Sergipe, conforme apresentado na Figura 1.



Figura 1 - Características das estações estudadas.

Fonte: Autores (2026). Legenda: *Marcos Freire II, **Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente.

Nota: A organização e estruturação gráfica da figura contaram com o apoio da ferramenta de inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI).

Os corpos hídricos receptores dessas estações consistem no rio Piauitinga e em um trecho do rio São Francisco, localizado no Baixo São Francisco, ambos considerados rios de água doce, de classe 2, de acordo com Santos *et al*. (2025a) e Barbosa *et al*. (2024), respectivamente.

A bacia do rio Piauitinga localiza-se na bacia hidrográfica do rio Piauí, no Centro-Sul de Sergipe, abrangendo aproximadamente 461,33 km² (Santos *et al*., 2025a). O rio Piauitinga encontra-se entre os 11 principais mananciais abastecedores públicos de água do Estado de Sergipe (IBGE, 2010). Por outro lado, o segmento do rio São Francisco localizado em Sergipe pertence ao Baixo São Francisco, que possui cerca de 214 km de extensão e ocupa 4% da área total da bacia (Farias *et al.*, 2023; Lacerda e Ribeiro, 2025).

Com o objetivo de isolar os efeitos das cargas orgânicas das estações estudadas, assumiu-se que os rios estão a montante dos pontos de lançamento e apresentam qualidade compatível com seu enquadramento legal, desconsiderando-se outras fontes de poluição. Nesse âmbito, a qualidade da água foi avaliada com base no modelo de Streeter-Phelps, amplamente utilizado na análise do oxigênio dissolvido em corpos hídricos submetidos ao lançamento de cargas orgânicas.

2.2 - Parâmetros e condições adotados na aplicação do modelo de Streeter-Phelps

Na aplicação do modelo de Streeter-Phelps, foram considerados os parâmetros necessários à determinação da concentração crítica, adotando-se um cenário mais conservador e a viabilidade legal do lançamento, em conformidade dos lançamentos com a CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005).

Os dados de vazão de esgoto, temperatura e DBO das estações foram obtidos junto à DESO (2024), enquanto as séries hidrológicas de temperatura e vazão dos rios Piauitinga e São Francisco foram extraídas da ANA (2024). A análise considerou dados referentes ao ano de 2024, cuja caracterização estatística foi realizada por meio de diagramas de boxplot. Para a avaliação de condições críticas, foram adotadas vazões mínimas para os corpos hídricos receptores.

Os coeficientes de desoxigenação (K_1) e de reaeração (K_2) foram definidos conforme von Sperling (2005) e corrigidos para a temperatura pela equação de Arrhenius. Para as simulações, a concentração de oxigênio dissolvido no rio (ODr) foi considerada equivalente a 80% da concentração de saturação de oxigênio (Cs), assumindo-se condição de baixa poluição , conforme proposto por Von Sperling (2005). Ainda, adotou-se a concentração mínima inicial de oxigênio dissolvido (OD_0) de 5,0 mg/L no rio, estabelecida para corpos hídricos de Classe 2, conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005). Por fim, considerou-se a DBO em 5 dias a 20 °C ($DBO_{5,20}$) no trecho a montante do lançamento de 5 mg/L, conforme Klein (1962) apud Von Sperling (2005).

2.3 - Variáveis de saída do modelo de Streeter-Phelps

A equação geral da mistura (Equação 1), é utilizada para estimar a concentração de um constituinte após a mistura entre o corpo hídrico receptor e o efluente lançado. Essa relação matemática representa a média ponderada das concentrações, levando em conta as vazões correspondentes de cada um dos fluxos envolvidos na mistura, correspondentes ao rio e ao efluente.

$$Co = \frac{Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

Em que: C0: concentração do constituinte na mistura (mg/L ou g/m³); C1: concentração do constituinte no rio, imediatamente a montante do ponto de mistura (mg/L ou g/m³); C2: concentração do constituinte no esgoto, imediatamente a montante do ponto de mistura (mg/L ou g/m³); e Q1: vazão do rio (L/s ou m³/s); Q2: vazão do esgoto (L/s ou m³/s).

Outro parâmetro relevante é a capacidade de diluição do corpo hídrico, quanto maior esse dado, menores serão os impactos da poluição no rio. Nesse âmbito, a razão de diluição é dada pela Equação 2 (von Sperling, 2005).

$$Razão\ de\ diluição = \frac{Vazão\ do\ rio\ Q_1\left(\frac{m^3}{s}\right)}{Vazão\ do\ esgoto\ Q_2\left(\frac{m^3}{s}\right)} \quad (2)$$

No caso do oxigênio dissolvido, a equação da mistura pode ser reformulada conforme as Equações 3 e 4. Essa expressão representa o déficit de oxigênio dissolvido no rio após a mistura com os esgotos. Visando à segurança metodológica, adotou-se $OD_e = 0$ mg/L.

$$C_o = \frac{Q_r \times OD_r + Q_e \times OD_e}{Q_r + Q_e} \quad (3)$$

$$D_o = C_s - C_o \quad (4)$$

Em que: C_o: concentração inicial de oxigênio, imediatamente após a mistura (mg/L); D_o: déficit inicial de oxigênio, imediatamente após a mistura (mg/L); C_s: concentração de saturação do oxigênio (mg/L); Q_r: vazão do rio a montante do ponto de lançamento dos despejos (m³/s); Q_e: vazão do esgoto (m³/s); OD_r: concentração de oxigênio dissolvido no rio a montante do ponto de lançamento dos despejos (mg/L); e OD_e: concentração de oxigênio dissolvido no esgoto (mg/L).

Por conseguinte, a concentração de DBO_5 é determinada conforme a Equação 5:

$$DBO_5 = \frac{Q_r \times DBO_r + Q_e \times DBO_e}{Q_r + Q_e} \quad (5)$$

Além disso, é necessária a conversão da DBO_5 em DBO última (Equações 6 e 7), uma vez que o modelo de oxigênio dissolvido utiliza a demanda última de oxigênio. Considerando condições

iniciais compatíveis com águas razoavelmente limpas a montante dos pontos de lançamento, conforme von Sperling (2005), adotou-se a DBO_r de 3 mg/L para os rios São Francisco e Piauitinga

$$L_o = DBO_5 \times K_T = \frac{Q_r \times DBO_r + Q_e \times DBO_e}{Q_r + Q_e} \times K_T \quad (6)$$

$$K_T = \frac{DBO_u}{DBO_5} = \frac{1}{1 - e^{-5 \times K_1}} \quad (7)$$

Em que: $DBO_{5}.0$: concentração de DBO_5 imediatamente após a mistura (mg/L); L_o: demanda última de oxigênio logo após a mistura (mg/L); DBO_r: concentração de DBO no rio (mg/L); DBO_e: concentração de DBO no esgoto(mg/L); e K_t: constante de conversão da DBO_5 em DBO última (DBO_u).

O tempo crítico (t_c) corresponde ao instante em que o corpo hídrico atinge a concentração mínima de oxigênio dissolvido e é calculado pela Equação 8.

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \times ln \left\{ \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \frac{(C_s - C_o) \times (K_2 - K_1)}{Lo \times K_1} \right] \right\} \quad (8)$$

Em que: $DBO_{5}.0$: concentração de DBO_5 imediatamente após a mistura (mg/L); L_o: demanda última de oxigênio logo após a mistura (mg/L); DBO_r: concentração de DBO no rio (mg/L); DBO_e: concentração de DBO no esgoto(mg/L); e K_t: constante de conversão da DBO_5 em DBO última (DBO_u).

Dessa forma, consideram-se apenas os valores de OD ao longo do perfil do corpo hídrico. O déficit crítico e a concentração crítica de oxigênio dissolvido são determinados pelas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} \times L_o \times e^{-K_1 \times t_c} \quad (9)$$

$$C_c = C_s - D_c \quad (10)$$

Em que: Dc: déficit crítico de oxigênio (mg/L); K_1: coeficiente de desoxigenação; K_2: coeficiente de reaeração; L_o: demanda última de oxigênio imediatamente após a mistura (mg/L); tc:

tempo crítico, expresso em dias; Cc: concentração crítica de oxigênio (mg/L); e C_s: concentração de saturação de oxigênio (mg/L).

Desse modo, os parâmetros finais para prosseguir com o modelo de Streeter-Phelps são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros finais adotados para a simulação do cenário de lançamento de efluente tratado.

Parâmetro	**Rio São Francisco**	**Rio Piauitinga**
Vazão (m^3/s)	2.846,00	2,09
Temperatura da água (°C)	25	27
OD (mg/L)	8,40	8,10
ODr (mg/L)	6,72	6,48
K_2 corrigido (dia^{-1})	0,42	0,35
K_1 corrigido (dia^{-1})	0,25	

Fonte: Autores (2026).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, são apresentados os resultados de vazão, DBO do esgoto tratado e da modelagem pelo modelo de Streeter-Phelps. Os valores destacados em vermelho indicam discordância em relação aos padrões adotados de $DBO_{5,20}$: máximo permitido de 5 mg/L e Cc mínima permissível de 5 mg/L.

Tabela 2 - Parâmetros finais do modelo de Streeter-Phelps para o efluente tratado das ETEs.

Corpo hídrico	-		Piauitinga		São Francisco	
Estação /Parâmetro	Qe* (m^3/h)	DBOe** (mg/L)	$DBO_{5,20}$ (mg/l)	Cc (mg/l)	$DBO_{5,20}$ (mg/l)	Cc (mg/l)
ERQ Norte	1.074,92	44,83	8,19	3,72	3,00	6,53
ERQ Oeste	150,41	65,43	4,23	5,62	3,00	6,53
ETE Sobrado	6,51	84,58	3,06	6,12	3,00	6,53
ERQ Sul	1.021,89	60,83	10,11	2,93	3,01	6,53

ETE Barra dos Coqueiros	165,25	50,60	4,01	5,70	3,00	6,53
ETE Brejo Grande	4,60	44,00	3,02	6,13	3,00	6,53
ETE Canindé (Cidade)	62,18	30,72	3,23	6,03	3,00	6,53
ETE Canindé (Prainha)	1,77	28,24	3,01	6,14	3,00	6,53
ETE Dores	109,73	20,15	3,24	6,01	3,00	6,53
ETE Itabaiana	150,23	11,13	3,16	6,02	3,00	6,53
ETE Lagarto	65,46	29,79	3,22	6,03	3,00	6,53
ETE Pacatuba	3,53	51,33	3,02	6,13	3,00	6,53
ETE Propriá	90,93	48,01	3,52	5,91	3,00	6,53
ETE Rosa Elze	69,14	28,67	3,29	6,00	3,00	6,53
ETE São Francisco	9,00	14,37	3,02	6,13	3,00	6,53
ETE Orlando Dantas	54,45	9,67	3,04	6,11	3,00	6,53

Fonte: Autores (2026). Legenda: *Vazão de esgoto. **DBO do efluente tratado.

Para o Rio Piauitinga, observa-se que os valores de $DBO_{5,20}$ e Cc das estações ERQ Norte e ERQ SUL não atenderam aos critérios legislativos. Tal vulnerabilidade é corroborada por Santos *et al*. (2025a), que salientam a capacidade limitada de diluição da bacia do Rio Piauitinga e a necessidade de metas graduais de enquadramento para a gestão dos lançamentos. Além disso, a ERQ Sul apresentou a condição mais crítica do estudo, na qual a $DBO_{5,20}$ resultou em uma intensa queda da concentração crítica de oxigênio. Nesse âmbito, registros de oxigênio inferiores a 3,0 mg/L trazem preocupação ecológica, visto que superam a tolerância de grande parte das espécies aquáticas, além de favorecerem processos de degradação anaeróbia e mau odor (von Sperling, 2014).

Para o Rio São Francisco, observou-se que todos os lançamentos simulados mantiveram-se em conformidade legislativa com a $DBO_{5,20}$, em torno de 3,00 mg/L, e com Cc estável em 6,53 mg/L. Tal conduta uniforme retrata a elevada capacidade de diluição e a magnitude da vazão desse corpo receptor em relação às vazões de projeto das ETEs. Dessa forma, o impacto da carga orgânica nestes pontos torna-se insignificante, o que demonstra que o ecossistema apresenta alta resiliência assimilatória.

Sob a perspectiva socioambiental, a preservação da qualidade das águas do Baixo São Francisco é fundamental, pois esse trecho abriga diversas comunidades tradicionais cuja subsistência e cultura

dependem da integridade ecológica e sanitária dessas águas. Como ilustração, nas margens do rio em Sergipe, predominam comunidades de pescadores artesanais (Santos *et al.*, 2025b). Se eventos semelhantes à ERQ Sul acontecerem adjacentes a essas comunidades, a queda do oxigênio afetaria diretamente a subsistência proveniente da pesca artesanal local.

A partir dos demais resultados dentro da normativa, evidencia-se que a eficiência de tratamento das ETEs atendeu aos parâmetros analisados da Resolução Conama ao resguardar o corpo receptor. Ao passo que, o Rio Piauitinga mostrou-se com capacidade assimilatória para absorver esses efluentes sem comprometer sua qualidade ambiental.

4 – CONCLUSÃO

A pesquisa conjunta desses dois corpos hídricos permite avaliar como as mesmas cargas orgânicas podem acarretar comportamentos ambientais distintos de acordo com as características hidrológicas e ambientais de cada rio. Sendo assim, a avaliação associada entre carga orgânica lançada, vazão do rio e padrões de enquadramento podem se tornar uma ferramenta para o monitoramento contínuo dos corpos hídricos.

O modelo de Streeter-Phelps revelou que o efluente tratado pelas ETEs em questão não impactou a ponto de alterar a qualidade do Rio São Francisco, o que coincide com os parâmetros do enquadramento legal. Ao passo que o Rio Piauitinga mostrou-se vulnerável, registrando violações críticas de $DBO_{5,20}$ e Cc nos pontos ERQ Norte e ERQ Sul, devido à insuficiência de tratamento e à escassez de vazão de diluição nessa bacia. Destarte, a fim de garantir o enquadramento legal e a preservação ecológica, as estações em desconformidade demandam melhorias imediatas na eficiência de remoção orgânica ou a aplicação de diretrizes de enquadramento transitório.

REFERÊNCIAS

ANA (2024). HidroWeb: sistema de informações hidrológicas. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília – DF.

BARBOSA, P.S.; CARVALHO, P.G.S.; AMORIM, M.C.C. (2023). "*Water quality in part of the Submiddle San Francisco region due to seasonality and land use and occupation*". International Journal of River Basin Management 21(4), pp. 617-624.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília – DF, 18 mar. 2005.

CHAPRA, S.C.; CAMACHO, L.A.; McBRIDE, G.B. (2021). "*Impact of Global Warming on Dissolved Oxygen and BOD Assimilative Capacity of the World's Rivers: Modeling Analysis*". Water 13, 2408.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE SERGIPE - DESO (2024). *Relatório de automonitoramento das ETEs de 2024*. DESO, Aracaju – SE.

FARIAS, C.W.L.A.; VIANA, J.F.S.; MIRANDA, R.Q.; SILVA, S.F.; VASCO, G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; GALVINCIO, J.D. (2023). "*Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT*". Revista Brasileira de Geografia Física 16(3), pp. 1621-1628.

LACERDA, S.; RIBEIRO, M. (2022). "*Arqueologia como ação política colaborativa em comunidades tradicionais: remeiros, beiradeiros e sua relação com o patrimônio arqueológico no Submédio São Francisco*". Revista Tarairiú 1(20).

MENDIVIL-GARCÍA, K.; AMABILIS-SOSA, L.E.; SALINAS-JUÁREZ, M.G.; PAT-ESPADAS, A.; RODRÍGUEZ-MATA, A.E.; FIGUEROA-PÉREZ, M.G.; ROÉ-SOSA, A. (2022). "*Climate change impact assessment on a tropical river resilience using the Streeter-Phelps dissolved oxygen model*". Frontiers in Environmental Science 10, art. 903046.

OPENAI. ChatGPT. Versão GPT-5.5. San Francisco: OpenAI, 2026. Disponível em: https://chatgpt.com.

PEREIRA JUNIOR, A.; MIRANDA, A.F.M.; BARROS, E.D.A.; SARDINHA, A.S. (2021). "*Self-depuration capacity in a lotic environment based on the mathematical model of Streeter-Phelps in northeastern Pará*". Research, Society and Development 10(5).

SANTOS, A.N.; MACÊDO, A.P.B.A.; SOUZA, R.G.; FERNANDES, M.R.M.; SCHNEIDER, E.H.M.; ROCHA, J.C.S. (2025a). "*Proposta de enquadramento transitório e obtenção de vazão de diluição na bacia do rio Piauitinga/SE*". Scientia Plena 21, 119918.

SANTOS, W.M.F.; SANTOS, R.K.P.; SILVERIO, A.M.; CUNHA, M.C.C. (2025b). "*Comunidades tradicionais no Submédio e Baixo São Francisco e os saberes sobre a qualidade de água tradicional*" in Anais do I Simpósio do PRODEMA, pp. 7-10.

VON SPERLING, M. (2005). "*Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos"*. Editora UFMG, Belo Horizonte – MG.

VON SPERLING, M. (2014). "*Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*". UFMG, Belo Horizonte – MG.

WU, J.; YU, X. (2021). "*Numerical Investigation of Dissolved Oxygen Transportation through a Coupled SWE and Streeter–Phelps Model*". Mathematical Problems in Engineering, 2021.