Análise Crítica da Escolha de Tecnologias de Tratamento de Esgoto Baseada no Modelo de Streeter-Phelps: Estudo de Caso da ERQ Norte no Rio do Sal, Sergipe / Brasil.

Samuel Santos Melo[1]; Paulo Henrique Rodrigues Lima[2]; Iasmin Hardman Santana[3]; Silas Rodrigues dos Santos[4]; Jackson Vanutty Silva Santana[5]; Ketlyn de Jesus Feitosa[6]; José Carlos Freitas de Sá Filho[7]

RESUMO – Este estudo analisou a escolha de tecnologias de tratamento de esgoto para a Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Norte, em Nossa Senhora do Socorro (SE), por meio da aplicação do modelo de Streeter-Phelps. Foram simulados quatro cenários de tratamento e avaliados seus impactos sobre o oxigênio dissolvido no Rio do Sal. Os resultados mostraram que o aumento da eficiência de remoção da carga orgânica reduz o déficit de oxigênio e acelera a recuperação do corpo hídrico. O sistema de lodos ativados apresentou o melhor desempenho ambiental, porém seus benefícios não justificaram os elevados custos operacionais e energéticos. Nenhum dos cenários garantiu o atendimento integral aos padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, evidenciando o comprometimento ambiental do Rio do Sal.

ABSTRACT– This study analyzed the choice of wastewater treatment technologies for the North Water Quality Recovery Station (ERQ) in Nossa Senhora do Socorro (SE), through the application of the Streeter-Phelps model. Four treatment scenarios were simulated and their impacts on dissolved oxygen in the Rio do Sal were evaluated. The results showed that increasing the efficiency of organic load removal reduces the overload deficit and accelerates the recovery of the water body. The activated sludge system provided the best environmental performance, but its benefits did not justify the high operational and energy costs. None of the plans guaranteed full compliance with the quality standards established by CONAMA Resolution No. 357/2005, highlighting the environmental compromise of the Rio do Sal.

Palavras-Chave – Modelo de Streeter-Phelps; Autodepuração; Tratamento de esgoto; Qualidade da água; Rio do Sal; Recursos hídricos.

[1]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: samuel.ssm@hotmail.com
[2]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: paulohenrique.lima@live.com
[3]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: hardmaniasmin@gmail.com
[4]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: *silasrodriguesnord@gmail.com*
[5]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: *Jacksonengenharia97@gmail.com*
[6]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: *ketly.feitosa@gmail.com*
[7]) Universidade Federal de Sergipe (UFS), E-mail: *carlos.freitassafilho@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

A água, recurso essencial à vida e de inestimável valor econômico devido à sua disponibilidade espacial e temporal limitada, sustenta uma diversidade de atividades humanas essenciais (Hossoda; Tercini; Garcia, 2024). Desde as antigas civilizações as populações se aglomeram nas proximidades dos corpos d'água (Tercini; Méllo Júnior, 2016).

Os rios exercem papel fundamental na absorção e no transporte de efluentes industriais e domésticos, bem como na depuração da carga orgânica proveniente do escoamento superficial de campos agrícolas, estradas e zonas urbanas. A lixiviação e o lançamento direto de efluentes são as principais fontes de poluição da água (Menezes *et al.*, 2015). Em geral, a poluição, a ocupação desordenada e a falta de tratamento de efluentes são as principais causas dos impactos ambientais em rios urbanos. Cargas orgânicas lançadas nos corpos d'água induzem o consumo de oxigênio na água, provocando a mortandade de peixes e outras formas de vida aquática (Tercini; Méllo Júnior, 2016).

Na gestão dos recursos hídricos, o primeiro passo a ser dado para mitigar a situação de degradação é compreender o processo de autodepuração do sistema hídrico (Tercini; Méllo Júnior, 2016). A autodepuração da água é um processo complexo que envolve processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem simultaneamente, permitindo que um rio recupere seu estado natural ao longo de uma certa distância. A depuração compreende diferentes mecanismos, como diluição, sedimentação, reaeração, adsorção, absorção e reações químicas e biológicas (Menezes *et al.*, 2015). Os modelos de qualidade da água são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de medidas de planejamento e gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas.

O precursor dos modelos de qualidade da água mais contemporâneos foi proposto por Streeter e Phelps (1925) e aplicado em um estudo no rio Ohio para aumentar a eficiência das ações de controle da poluição (Bezerra; Mendonça; Frischkorn, 2008). O modelo de Streeter-Phelps resultou no desenvolvimento subsequente de inúmeros modelos numéricos utilizados em aplicações computacionais. Esses modelos, derivados das equações clássicas de Streeter-Phelps, têm sido amplamente utilizados não apenas para avaliar a qualidade da água, mas também para prever danos resultantes da implementação de medidas de gestão de recursos hídricos (Menezes *et al.*, 2015) ou a capacidade de suporte dos rios.

O modelo de Streeter-Phelps é constituído, de forma genérica, por duas equações diferenciais ordinárias: uma modela a oxidação da fração biodegradável da matéria orgânica e outra representa o fluxo de oxigênio decorrente da reaeração atmosférica. Essas equações são denominadas, respectivamente, equação de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e equação de reaeração (Bezerra; Mendonça; Frischkorn, 2008). A partir da interação entre esses processos, o modelo permite estimar a evolução espacial do déficit de oxigênio dissolvido em corpos hídricos receptores, constituindo importante ferramenta para avaliação dos impactos decorrentes do lançamento de efluentes e da capacidade de assimilação dos cursos d'água.

No contexto da gestão ambiental brasileira, essa capacidade preditiva assume especial relevância diante dos instrumentos normativos que regulam a qualidade das águas e o lançamento de efluentes. A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece a classificação dos corpos hídricos e os respectivos padrões de qualidade ambiental, enquanto a Resolução CONAMA nº 430/2011 complementa esse marco regulatório ao definir condições e padrões para o lançamento de efluentes. Para corpos d'água salobros enquadrados como Classe 2, por exemplo, a legislação determina, entre outros critérios, que a concentração de oxigênio dissolvido não seja inferior a 4 mg L^{-1}, parâmetro diretamente relacionado aos processos de autodepuração representados pelo modelo de Streeter-Phelps.

Além do atendimento à legislação ambiental, a ampliação da coleta e do tratamento de esgotos está inserida em compromissos globais voltados à sustentabilidade. Nesse contexto, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas estabelece, por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, metas relacionadas à universalização do saneamento e à melhoria da qualidade da água. Destacam-se as metas 6.2, que busca assegurar o acesso universal ao saneamento adequado, e 6.3, que prevê a redução da poluição hídrica e o aumento do tratamento de efluentes, reforçando a necessidade de adoção de tecnologias capazes de conciliar eficiência operacional e proteção ambiental (ONU, 2015) .

Sob essa perspectiva, a escolha da tecnologia de tratamento de esgoto deixa de ser apenas uma decisão de engenharia sanitária e passa a representar um elemento estratégico para o cumprimento de metas legais e ambientais em diferentes escalas. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar criticamente a escolha de tecnologias de tratamento para a Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Norte, localizada em Nossa Senhora do Socorro/SE, por meio da aplicação do modelo de Streeter-Phelps.

2. METODOLOGIA

3.1 Delineamento do Estudo de Caso e Critérios de Seleção da ETE/Corpo Receptor com Base no Modelo de Streeter-Phelps

Este trabalho adota abordagem de estudo de caso com modelagem determinística de qualidade da água, fundamentada no modelo clássico de Streeter-Phelps, para avaliar criticamente a adequação tecnológica de alternativas de tratamento de esgoto sanitário em função de seus efeitos esperados na dinâmica de oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no corpo receptor. Considerando os dados hidrológicos (especialmente séries de vazão) para rios receptores de efluentes de ETEs no estado de Sergipe, estabeleceu-se como critério metodológico a seleção de ETEs cujos lançamentos ocorram em rios com vazão conhecida e publicamente/tecnicamente disponível. Após a primeira triagem, definiu-se como caso principal o lançamento no Rio do Sal, com foco na ERQ Norte, cuja vazão média é de 1.081,00 m³/h, e com tratamento baseado em lagoas de estabilização (anaeróbia + facultativa) e de maturação (polimento).

Diferentemente de avaliações centradas em eficiência energética ou em supressão de etapas específicas (p.ex., remoção de fase anaeróbia), este trabalho direciona o esforço analítico para a coerência entre a tecnologia de tratamento escolhida e a resposta ambiental esperada do rio receptor, expressa por indicadores derivados da curva de depleção e recuperação de OD prevista pelo modelo de Streeter-Phelps. Assim, a “melhor tecnologia” é definida aqui não apenas pela eficiência no tratamento, mas pela sua capacidade de assegurar condições compatíveis com a assimilação de carga orgânica e a manutenção de níveis aceitáveis de OD no corpo hídrico tendo como base a Resolução CONAMA Nº 357 de 2005.

3.2 Construção dos cenários e estratégia comparativa

A avaliação é estruturada por cenários contrastantes, formulados para isolar o efeito da tecnologia de tratamento sobre a carga remanescente e, consequentemente, sobre as curvas de DBO e OD após a mistura no rio. Foram definidos quatro cenários:

Tabela 1. Cenários do estudo

Cenário	Descrição	Interpretação/propósito no estudo	Eficiência
1	Lançamento do esgoto sem tratamento	A carga afluente é integralmente transferida ao corpo receptor.	0%
2	Lançamento do esgoto com o tratamento implantado (sistema de lagoas)	Condição real de operação/arranjo tecnológico vigente, usada como base para a crítica da escolha atual.	68% (baseado nos dados da DESO de 2024)
3	Lançamento do esgoto com tratamento anaeróbio compacto (reator UASB)	Alternativa de menor área, com remoções relevantes de DBO; efluente típico pode influenciar a desoxigenação no rio.	60%
4	Lançamento do esgoto com tratamento aeróbio compacto (reator de Lodos Ativados)	Alternativa de alta remoção de matéria orgânica biodegradável, com potencial de reduzir o déficit de OD no corpo receptor.	90%

Para a construção dos cenários, foram adotadas diferentes eficiências de remoção de DBO representativas das tecnologias avaliadas. No cenário 2, utilizou-se a eficiência média observada para a ERQ Norte a partir dos dados operacionais de 2024. Para os cenários alternativos, foram considerados valores típicos reportados na literatura para sistemas de reatores UASB e lodos ativados, permitindo comparar o desempenho ambiental das diferentes tecnologias sob as mesmas condições hidrodinâmicas e de qualidade da água do corpo receptor.

Em termos operacionais, cada cenário é traduzido em condições de contorno para o modelo (concentração de DBO e OD no ponto de lançamento após mistura), mantendo-se constantes as demais condições hidrodinâmicas e ambientais para assegurar comparabilidade.

3.3 Modelagem Streeter-Phelps

A avaliação dos impactos decorrentes do lançamento dos efluentes da ERQ Norte sobre a qualidade das águas do Rio do Sal foi realizada por meio do modelo clássico de Streeter-Phelps. O modelo descreve o processo de autodepuração em corpos hídricos receptores a partir do balanço entre o consumo de oxigênio dissolvido associado à degradação biológica da matéria orgânica e a reposição de oxigênio promovida pela reaeração atmosférica. Em razão de sua simplicidade conceitual e ampla aplicação em estudos de qualidade da água, o modelo tem sido utilizado para estimar a evolução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e do Oxigênio Dissolvido (OD) após o lançamento de efluentes em rios. Desse modo, a redução da carga orgânica biodegradável ao longo do tempo foi representada pela clássica equação exposta a seguir:

$$C_t = C_s - \left[\frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} \left(e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t} \right) + (C_s - C_0) e^{-K_2 t} \right] \quad (1)$$

Onde,

Ct é a concentração de oxigênio ao longo do tempo (mg/L);
Cs é a concentração de saturação de oxigênio (mg/L);
L0 refere-se à demanda bioquímica remanescente, no ponto de lançamento (mg/L);
D0 é o déficit inicial de oxigênio dissolvido no curso de água (mg/L);
K1 corresponde ao coeficiente de desoxigenação do rio (dia-1);
K2 trata-se do coeficiente de reoxigenação do rio (dia-1).

Por se tratar de um curso d'água sujeito à influência de regimes de maré, foram adotadas premissas conservadoras quanto às concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD) no corpo hídrico receptor, com o objetivo de avaliar sua capacidade de autodepuração por meio da aplicação da modelagem de Streeter-Phelps.

A concentração de DBO_5 do corpo receptor a montante do lançamento foi fixada em 20,0 mg L^{-1}. Segundo Von Sperling (2014), rios com boa qualidade ambiental normalmente apresentam

concentrações de DBO inferiores a 5 mg L^{-1}, enquanto corpos hídricos impactados por lançamentos de origem antrópica podem apresentar valores superiores a 10 mg L^{-1}. Considerando que o Rio do Sal possui características estuarinas e recebe contribuições de esgotos tratados e não tratados provenientes de diversos bairros dos municípios de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro, além de apresentar histórico de degradação da qualidade da água reportado na literatura, os autores optaram por adotar o valor de 20,0 mg L^{-1} como condição representativa para a modelagem. Tal escolha buscou representar um cenário compatível com a realidade de um corpo hídrico submetido a elevada carga orgânica, sem recorrer a valores extremos observados em situações específicas de monitoramento.

Os coeficientes cinéticos utilizados na modelagem foram definidos com base nos intervalos recomendados por Von Sperling (2014) para aplicação do modelo de Streeter-Phelps em rios receptores de esgotos domésticos. Para o coeficiente de desoxigenação k1, foi adotado o valor de 0,17 d^{-1}, compatível com a faixa indicada para cursos d'água que recebem cargas orgânicas biodegradáveis de origem sanitária. Segundo o autor, valores de k1 normalmente variam entre 0,10 e 0,30 d^{-1}, dependendo das características do efluente, da temperatura e das condições ambientais do corpo hídrico.

Para o coeficiente de reaeração k2, adotou-se o valor de 0,60 d^{-1}, conforme utilizado por Skorbiłowicz et al. (2017). Esse coeficiente representa a taxa de reposição de oxigênio dissolvido proveniente das trocas gasosas entre a atmosfera e a superfície da água, constituindo um dos principais parâmetros responsáveis pela recuperação da qualidade do corpo hídrico após o lançamento de cargas orgânicas.

A concentração de saturação de oxigênio dissolvido foi fixada em 6,81 mg/L, correspondente às condições de temperatura de 28 °C e salinidade de 25 PSU (*Practical Salinity Unit*) consideradas na modelagem, sendo esses dados in situ obtidos através de medição no local.

A vazão adotada para o Rio do Sal foi de 244 m^3 s^{-1}, correspondente à condição de enchente durante maré de quadratura. Em ambientes estuarinos, a hidrodinâmica é fortemente influenciada pela propagação da maré, de modo que os fluxos observados refletem não apenas a contribuição fluvial, mas também o deslocamento periódico das massas d'água promovido pelas oscilações de maré. A condição de quadratura foi selecionada por representar uma situação hidrodinâmica mais conservadora para a avaliação da qualidade da água, caracterizada por menores amplitudes de maré, menor renovação hídrica e reduzida capacidade de dispersão de poluentes quando comparada às condições de sizígia. Dessa forma, a adoção dessa condição permite avaliar o comportamento do

sistema sob um cenário de maior vulnerabilidade ambiental, no qual os efeitos do lançamento de efluentes tendem a ser mais pronunciados.

Optou-se por não utilizar vazões de referência tradicionalmente empregadas em estudos de autodepuração de rios, como a Q95, uma vez que tais indicadores são mais adequados a corpos hídricos com regime predominantemente fluvial. No caso do Rio do Sal, a influência estuarina e o controle exercido pelas marés sobre os processos de transporte, mistura e dispersão tornam a utilização de condições hidrodinâmicas representativas mais apropriada para a simulação do comportamento do corpo receptor. Assim, a vazão associada à maré de quadratura foi considerada mais representativa das condições críticas de qualidade da água do que uma vazão estatística de permanência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2, conforme relatórios trimestrais da Companhia de Saneamento de Sergipe - DESO (2024), apresenta os dados operacionais e de qualidade do esgoto utilizados na modelagem para o ano de 2024, incluindo as concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) afluente e efluente, as vazões médias observadas e as temperaturas registradas no sistema. Observa-se significativa variabilidade temporal tanto na carga orgânica afluente quanto na eficiência do tratamento, refletindo as condições operacionais da estação ao longo do período analisado. Esses dados constituíram a base para a definição dos cenários simulados pelo modelo de Streeter-Phelps, permitindo avaliar a influência de diferentes níveis de remoção de matéria orgânica sobre o comportamento do oxigênio dissolvido no corpo receptor e seu atendimento aos padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Tabela 1. Dados brutos do esgoto para o ano de 2024.

	Data	DBO Bruto (mg/L)	DBO tratado (mg/L)	Vazão (m3/s)	Vazão (m3/h)	Afluente	Efluente
1T/24	08/01/2024	145,0	35,5	19,02	1.141,4	32,7	30,9
	05/02/2024	151,0	45,0	18,85	1.131,0	32,1	30,2
	11/03/2024	179,0	55,0	18,85	1.131,0	32,6	31,5
2T/24	15/04/2024	58,0	41,0	17,66	1.059,5	28,8	30
	20/05/2024	239,0	53,0	21,87	1.312,3	30,4	31
	17/06/2024	129,0	36,0	21,92	1.315,0	26,2	26,7
3T/24	15/07/2024	283,0	39,0	22,10	1.325,9	27,3	25,9
	19/08/2024	832,0	49,0	10,05	603,0	28,6	27
	09/09/2024	143,0	59,3	14,57	874,0	29,9	26,6
3T/24	01/10/2024	157,0	58,0	16,67	1.000,0	29,6	27,9
	12/11/2024	220,0	42,0	16,67	1.000,0	31	27
	09/12/2024	549,0	317,0	13,68	821,0	31,6	30,1

Fonte: Companhia de Saneamento de Sergipe (2024).

Tabela 2. Dados dos cenários - DBO (mg/L) e OD (mg/L) pela modelagem de Streeter-Phelps.

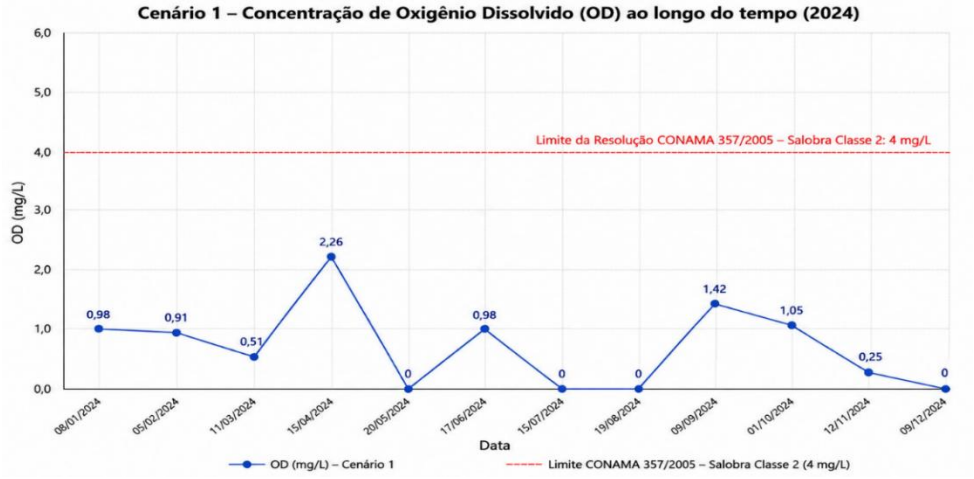
DATA	Qe (m3/s)	DBO Cenário 1 (mg/L)	OD Cenário 1 (mg/L)	DBO Cenário 2 (mg/L)	OD Cenário 2 (mg/L)	DBO Cenário 3 (mg/L)	OD Cenário 3 (mg/L)	DBO Cenário 4 (mg/L)	OD Cenário 4 (mg/L)
08/01/2024	19,02	145,0	0,98	35,5	2,54	58,0	2,22	14,5	2,84
05/02/2024	18,85	151,0	0,91	45,0	2,41	60,4	2,19	15,1	2,83
11/03/2024	18,85	179,0	0,51	55,0	2,27	71,6	2,03	17,9	2,79
15/04/2024	17,66	58,0	2,26	1,0	2,49	23,2	2,73	5,8	2,96
20/05/2024	21,87	239,0	0,00	53,0	2,21	95,6	1,52	23,9	2,68
17/06/2024	21,92	129,0	0,98	36,0	2,49	51,6	2,23	12,9	2,86
15/07/2024	22,10	283,0	0,00	39,0	2,44	113,2	1,22	28,3	2,61
19/08/2024	10,05	832,0	0,00	49,0	2,58	332,8	0,37	83,2	2,32
09/09/2024	14,57	143,0	1,42	59,3	2,68	57,2	2,37	14,3	2,85
01/10/2024	16,67	157,0	1,05	58,0	2,29	62,8	2,23	15,7	2,83
12/11/2024	16,67	220,0	0,25	42,0	2,50	88,0	1,92	22,0	2,75
09/12/2024	13,68	549,0	0,00	317,0	0,00	219,6	0,70	54,9	2,42

4.1. Cenário 1

No cenário que simula o lançamento direto de efluente sem tratamento, a aplicação do modelo de Streeter-Phelps indica redução acentuada das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) na zona de mistura do corpo hídrico, evidenciando a elevada pressão exercida pela carga orgânica lançada sobre a capacidade de assimilação do sistema aquático. Os resultados da série temporal analisada evidenciam que o trecho avaliado não atende aos critérios de enquadramento para águas salobras Classe 2 estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, a qual determina concentração mínima de 4 mg/L de oxigênio dissolvido em qualquer amostra. Em toda a série simulada (tabela 3), os valores de OD permaneceram abaixo desse limite, indicando comprometimento da qualidade ambiental do corpo receptor e potencial prejuízo à manutenção dos processos ecológicos e da biota aquática.

A análise da curva de autodepuração (gráfico 5) evidencia que a elevada carga de matéria orgânica intensifica a atividade microbiológica, gerando taxas de desoxigenação superiores à capacidade natural de reaeração e resultando em déficit persistente de oxigênio. Esse quadro configura estresse ambiental e ultrapassa os padrões legais de qualidade, colocando o rio próximo ou além de sua capacidade de suporte. Os resultados indicam ainda que o processo de recuperação natural é lento, exigindo cerca de 7,6 dias para restabelecer o equilíbrio entre desoxigenação e reaeração. Tal intervalo é considerado elevado em sistemas sujeitos a lançamentos contínuos de esgoto, pois novos aportes orgânicos podem ocorrer antes da recomposição completa, ocasionando efeitos cumulativos e prolongando o déficit de oxigênio. Nessas condições, a autodepuração deixa de atuar como mecanismo efetivo de mitigação, passando a representar apenas uma recuperação parcial diante da magnitude da carga lançada.

Figura 1. Cenário 1 - Esgoto “in natura”. Concentração de OD (mg/L) pela modelagem de Streeter-Phelps.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

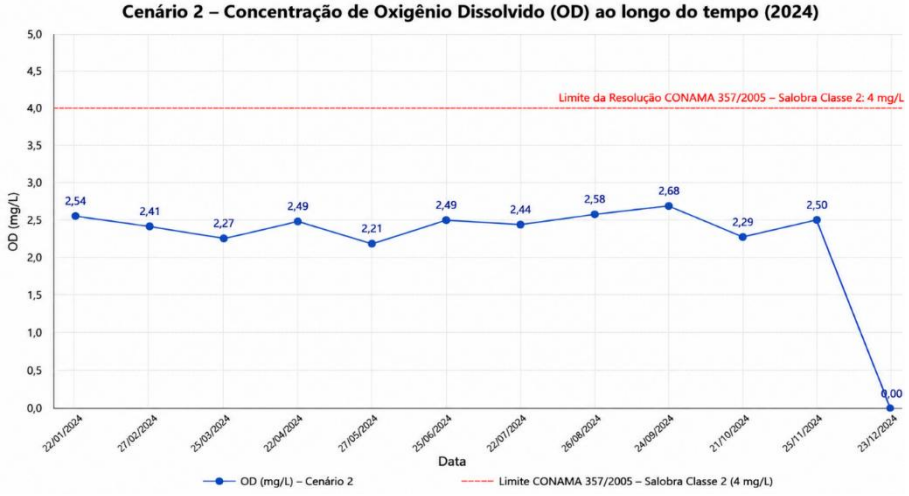
4.2. Cenário 2

Para o cenário que representa a condição real de operação associada ao arranjo tecnológico vigente, a aplicação do modelo de Streeter-Phelps indica uma atenuação expressiva do déficit de oxigênio dissolvido (OD) ao longo do trecho analisado, refletindo os efeitos do tratamento do efluente previamente ao lançamento. A análise da série temporal evidencia que o enquadramento na Classe 2 das águas salobras não é atendido todo o período avaliado, ocorrendo o desenquadramento do parâmetro OD do corpo hídrico receptor. Considerando os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que exige concentrações de OD não inferiores a 4 mg/L em qualquer amostra, os resultados indicam que, embora o sistema atual promova significativa melhoria na qualidade da água em comparação ao cenário sem tratamento, ainda apresenta limitações pontuais, o que fundamenta a análise crítica quanto à sua eficiência e à adequação do arranjo tecnológico adotado.

A partir dos dados operacionais levantados para o período de estudo, foi estimada uma eficiência média de remoção de DBO da ordem de 68%. Embora esse resultado seja compatível com o desempenho esperado para sistemas compostos por lagoas de estabilização e de maturação, a literatura indica que a eficiência desses sistemas pode apresentar elevada variabilidade temporal em função de fatores como temperatura, regime de chuvas, carga afluente, tempo de detenção hidráulica e condições operacionais. Segundo Von Sperling (2017), sistemas de lagoas facultativas associadas a lagoas de maturação normalmente apresentam eficiências de remoção de DBO entre 70% e 90%, dependendo das condições de projeto e operação.

Os resultados da modelagem também indicam que o corpo hídrico necessita de aproximadamente 5,8 dias para completar seu processo de autodepuração, período inferior ao observado no cenário sem tratamento, mas ainda relativamente elevado para um ambiente sujeito a lançamentos contínuos de efluentes. A redução do tempo de recuperação demonstra que a tecnologia atualmente empregada contribui para aliviar a pressão exercida sobre a capacidade de assimilação do rio, permitindo que os mecanismos naturais de reaeração restabeleça mais rapidamente o equilíbrio entre consumo e reposição de oxigênio. Contudo, a persistência de um tempo de autodepuração próximo de seis dias indica que a carga orgânica remanescente após o tratamento ainda exerce influência significativa sobre a dinâmica do oxigênio dissolvido. Logo, a modelagem de Streeter-Phelps evidencia que o tratamento da estação ERQ Norte contribui na melhora da qualidade da água.

Figura 2. Cenário 2 - Condição Real ETE ERQ Norte. Concentração de OD (mg/L) pela modelagem de Streeter-Phelps.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.3. Cenário 3

As lagoas de estabilização e de maturação constituem uma tecnologia robusta e de baixo custo operacional, porém demandam extensas áreas de implantação, apresentam maior suscetibilidade a variações climáticas, dificuldades de controle de odores e menor eficiência volumétrica (RAJAGOPAL *et al.*, 2019).

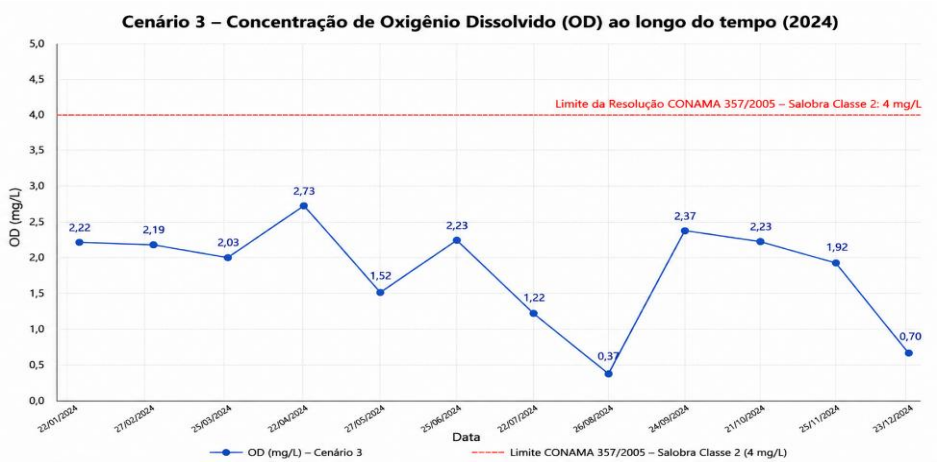
Como alternativa às lagoas anaeróbicas, o cenário 3 simula a implantação do sistema de reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB, em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Esses sistemas apresentam expressivo potencial de viabilidade técnica e econômica, especialmente em municípios com restrição de área disponível, que não é o caso do objeto de estudo, porém, necessita de maior controle operacional. RAJAGOPAL *et al.*(2019) cita que os reatores UASB apresentam eficiências nas remoções de DBO entre 55% e 75% para esgoto doméstico, além disso, o UASB permite a recuperação energética por meio da produção de biogás e gera menores quantidades de lodo excedente, reduzindo custos de manejo e disposição final.

No aspecto de viabilidade econômica, embora o investimento inicial do UASB seja geralmente superior ao de lagoas anaeróbias, a redução da área ocupada pode ser vantajosa em regiões urbanizadas, onde o valor do terreno constitui um parcela significativa do custo total do empreendimento. Estudos de revisão indicam que a elevada eficiência volumétrica dos reatores UASB, associada ao baixo consumo energético quando comparado a sistemas aeróbios

convencionais, resulta em custos operacionais competitivos e maior sustentabilidade de longo prazo. Adicionalmente, a possibilidade de aproveitamento energético do metano produzido contribui para a redução dos custos globais de operação da estação (Nnaji, 2014). Araújo e Santos (2022) estima custos de CAPEX per capita igual a R$ 111,25 por habitante e de OPEX anual per capita igual R$ 16,02 por habitantes por ano, para ETEs de tecnologia de reatores UASB, com pós-tratamento de lodo ativado, modalidade convencional, e sistema de aproveitamento de biogás.

A adoção do reator UASB como alternativa às lagoas de estabilização e de maturação requer avaliação crítica de suas limitações operacionais. Os efluentes produzidos frequentemente apresentam concentrações residuais de DBO entre 60 e 120 mg L^{-1}, porém apresenta baixa remoção de nutrientes e organismos patogênicos, exigindo unidades complementares de pós-tratamento para atendimento aos padrões de lançamento mais restritivos. Assim, do ponto de vista da modelagem de autodepuração baseada em Streeter-Phelps, a escolha do UASB mostra-se equivalente ao sistema atualmente empregado na ETE, tanto na redução da carga orgânica lançada no corpo receptor quanto no período de autodepuração do rio. Contudo, a viabilidade final depende da relação entre ganhos ambientais, disponibilidade de área, custos de implantação e de operacionalização, além da necessidade de pós-tratamento (Mungray; Murthy; Tirpude, 2010).

Figura 3. Cenário 3 - considerando uma eficiência na remoção de DBO de 60%. Concentração de OD (mg/L) pela modelagem de Streeter-Phelps.



4.4. Cenário 4

Os resultados obtidos para o cenário 4 demonstram que a adoção do sistema de lodos ativados proporciona a melhor resposta ambiental entre as alternativas avaliadas, refletida na redução do tempo de autodepuração do Rio do Sal para aproximadamente 5,1 dias. Quando comparado aos cenários de lançamento

sem tratamento, ao sistema atualmente em operação e à alternativa baseada em reatores UASB, observa-se que a maior eficiência de remoção de matéria orgânica do processo aeróbio resulta em menor carga de DBO remanescente no efluente lançado, reduzindo significativamente o déficit de oxigênio dissolvido ao longo do trecho modelado.

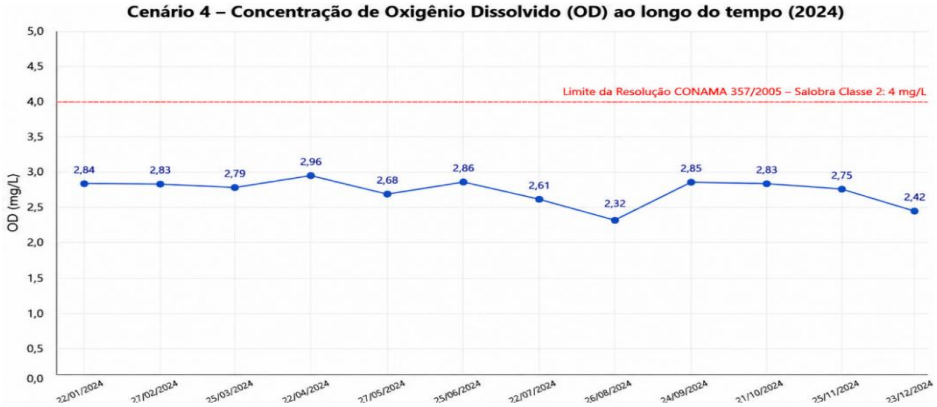
Sob a perspectiva do modelo de Streeter-Phelps, a diminuição do tempo de recuperação do corpo hídrico evidencia que os processos naturais de reaeração passam a superar mais rapidamente os processos de desoxigenação, permitindo o restabelecimento das condições de equilíbrio em um intervalo inferior ao observado nos demais cenários. Esse comportamento indica uma melhora da capacidade de autodepuração do Rio do Sal e uma maior resiliência do corpo hídrico receptor frente aos impactos decorrentes do lançamento de efluentes.

Entretanto, embora o ganho ambiental seja claramente evidenciado pela redução do tempo de autodepuração para 5,1 dias, a análise integrada dos aspectos técnicos e econômicos sugere que a adoção da tecnologia de lodos ativados pode não representar a alternativa mais vantajosa para o contexto específico da ERQ-Norte. A melhoria obtida na recuperação do corpo hídrico, quando comparada ao cenário atual, é relativamente modesta diante do expressivo aumento dos custos de implantação, operação e manutenção associados ao sistema aeróbio.

Segundo Von Sperling (2014), o consumo energético dos sistemas de lodos ativados pode representar mais de 50% dos custos operacionais da estação, enquanto lagoas anaeróbias ou facultativas apresentam demanda energética praticamente nula. Como a área disponível não constitui uma restrição relevante para o empreendimento e o sistema existente já promove redução significativa da carga orgânica lançada, os benefícios adicionais observados na modelagem não parecem suficientes para compensar o aumento do consumo energético, a necessidade de operação especializada e os custos relacionados ao gerenciamento do lodo excedente.

Dessa forma, embora o sistema de lodos ativados evidencie desempenho ambiental superior e reduza o tempo de autodepuração do rio para pouco mais de cinco dias, a avaliação de viabilidade indica que os ganhos incrementais de qualidade da água podem não justificar os investimentos adicionais requeridos, tornando a alternativa menos atrativa sob a ótica da relação custo-benefício para as condições específicas do estudo de caso.

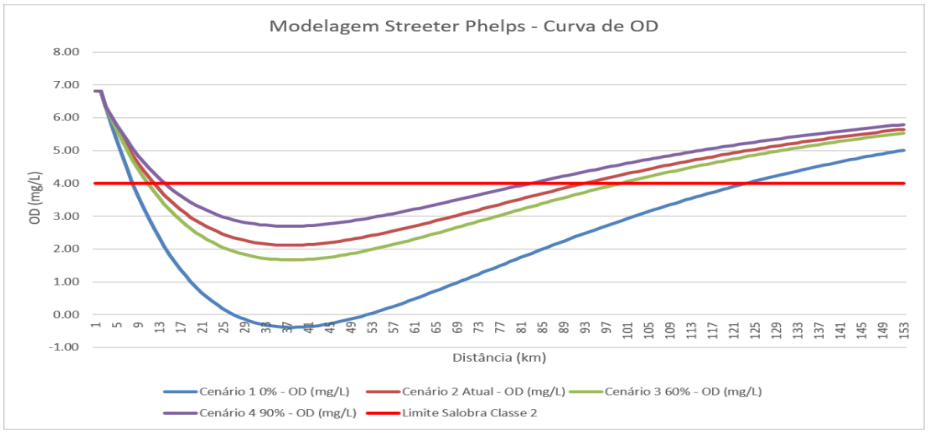
Figura 4. Cenário 4 - considerando uma eficiência na remoção de DBO de 90%. Concentração de OD (mg/L) pela modelagem de Streeter-Phelps.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.5. Curva de Depleção

Figura 5. Curva de Depleção de OD para os cenários modelados



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Considerando o limite mínimo de 4 mg/L estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salobras Classe 2, verificou-se que todos os cenários apresentaram desenquadramento em algum trecho do rio, conforme demonstrado na Figura 5. Entretanto, a extensão da zona impactada diminuiu à medida que aumentou a eficiência do tratamento, reduzindo tanto a distância quanto o

tempo necessários para a recuperação da qualidade da água. Adotando-se a velocidade média do rio de 0,19 m/s, equivalente a aproximadamente 16,4 km/d, foram estimadas as distâncias e os tempos necessários para o retorno às condições de enquadramento.

Tabela 3 – Distância e tempo estimados para recuperação do enquadramento do corpo hídrico (OD ≥ 4 mg/L)

Cenário	Distância (km)	Tempo (dias)
Cenário 1 – Sem tratamento (0%)	124	7,6
Cenário 2 – Atual	95	5,8
Cenário 3 – Remoção de 60%	99	6,0
Cenário 4 – Remoção de 90%	84	5,1

Os resultados demonstram que o aumento da eficiência de remoção da carga orgânica reduz a intensidade do déficit de oxigênio e acelera o processo de recuperação do corpo receptor. O cenário com remoção de 90% apresentou o melhor desempenho, reduzindo em aproximadamente 40 km a extensão da zona de desenquadramento quando comparado ao lançamento sem tratamento. Embora nenhum dos cenários tenha evitado completamente a ocorrência de concentrações inferiores ao limite legal, observou-se uma melhora progressiva das condições de qualidade da água à medida que aumenta a eficiência do tratamento.

Os resultados obtidos devem ser analisados à luz das condições ambientais já observadas no Rio do Sal. Estudos desenvolvidos na bacia e em seu estuário apontam um quadro recorrente de degradação da qualidade da água, associado principalmente ao lançamento de esgotos domésticos e à ocupação urbana desordenada, com registros de não conformidades para parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ou demanda química de oxigênio (mais adequado para ambientes com alta salinidade), coliformes termotolerantes e oxigênio dissolvido (SANTOS, 2014; KIKUCHI et al., 2016).

Embora rios com boa qualidade ambiental apresentem tipicamente concentrações de DBO inferiores a 5 mg L^{-1} (VON SPERLING, 2014), as evidências disponíveis indicam que o Rio do Sal já se encontra submetido a elevadas cargas orgânicas, situação que reduz sua capacidade de assimilação de novos lançamentos e dificulta a manutenção dos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação. Nesse contexto, a melhoria das condições ambientais do rio demanda ações integradas de gestão e saneamento, envolvendo o poder público, os órgãos ambientais, os prestadores de serviços de saneamento e os empreendimentos privados que contribuem para a carga poluidora da bacia, incluindo a concessionária responsável pela ERQ Norte. Somente por meio de esforços coordenados de ampliação da coleta e tratamento de esgotos, controle de lançamentos e recuperação ambiental será possível promover a melhoria gradual da qualidade da água e a preservação dos usos múltiplos desse importante corpo hídrico.

Cabe ressaltar que a ERQ Norte encontra-se em processo de ampliação de sua capacidade operacional, com previsão de incremento significativo da vazão de esgoto tratada e lançada no corpo receptor. Entretanto, para fins de modelagem, foram adotados exclusivamente os dados operacionais oficialmente disponibilizados pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) para o ano de 2024, correspondentes à condição efetivamente observada durante o período analisado. Essa opção metodológica buscou assegurar a aderência dos resultados a informações monitoradas e verificáveis. Destaca-se, contudo, que o aumento da vazão afluente à estação poderá resultar em cargas orgânicas superiores às consideradas neste estudo, especialmente caso a expansão da capacidade não seja acompanhada por ganhos equivalentes de eficiência de tratamento. Nessa perspectiva, os resultados apresentados podem ser considerados conservadores, sendo recomendável a realização de estudos complementares após a entrada em operação da ampliação, de modo a reavaliar a capacidade de assimilação do Rio do Sal frente às novas condições de lançamento.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a escolha da tecnologia de tratamento de esgoto para a Estação Recuperadora de Qualidade (ERQ) Norte deve considerar não apenas a eficiência na remoção de cargas poluidoras, mas também aspectos econômicos e operacionais. Embora o cenário com tratamento por lodos ativados tenha apresentado o melhor desempenho ambiental, reduzindo significativamente a extensão da zona impactada pelo lançamento de efluentes, os benefícios adicionais não se mostraram suficientes para justificar os elevados custos operacionais e energéticos associados a essa tecnologia. Além disso, nenhum dos cenários avaliados foi capaz de garantir o atendimento integral ao limite mínimo de 4 mg/L de oxigênio dissolvido estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 ao longo de todo o Rio do Sal, evidenciando que o curso hídrico já se encontra afetado por um quadro persistente de degradação ambiental e elevada carga orgânica.

Nesse contexto, conclui-se que a recuperação da qualidade das águas do Rio do Sal não depende exclusivamente da adoção de sistemas de tratamento mais eficientes, mas requer uma estratégia integrada de gestão ambiental e saneamento. Medidas como a ampliação da rede de coleta de esgoto, o controle de lançamentos clandestinos e a recuperação ambiental da bacia hidrográfica são fundamentais para a melhoria efetiva das condições do rio. Junto a isso, a aplicação do modelo de Streeter-Phelps mostrou-se uma importante ferramenta de planejamento e apoio à tomada de decisão, permitindo a simulação dos impactos decorrentes de diferentes cenários de tratamento e fornecendo subsídios técnicos para a definição de soluções mais adequadas à realidade local. Dessa forma, os

resultados indicam que investimentos isolados em tecnologias aeróbias compactas de alto custo não são a alternativa mais viável para o Rio do Sal, reforçando a necessidade de uma abordagem sistêmica e integrada para a gestão dos recursos hídricos da região.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Anderson Barbosa; SANTOS, André Bezerra dos. Análise econômica e ambiental da adoção de reatores UASB como alternativa de rota tecnológica para os futuros sistemas centralizados de Fortaleza, Ceará. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 357–364, abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Dados fluviométricos da Estação Propriá (Código: 49705000). Série histórica de vazões e níveis de 2024. Brasília, DF: ANA: HidroWeb, 2024. Disponível em: snirh.gov.br. Acesso em: 3 jun. 2026.

BEZERRA, Iury Steiner de Oliveira; MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro; FRISCHKORN, Horst. Autodepuração de cursos d´água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 249–255, jun. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63. Disponível em: https://conama.mma.gov.br. Acesso em: 3 jun. 2026.

CAPA DO PROCESSO Nº 8701/2024-REL.ETES-DESO. ASSUNTO DO PROCESSO: Relatório de automonitoramento da ETEs referente ao 1º trimestre de 2024. INTERESSADO: SUES Aracaju, 29 de abril de 2024
CAPA DO PROCESSO Nº 15514/2024-REL.ETES-DESO. ASSUNTO DO PROCESSO: Relatório de automonitoramento da ETEs referente ao 4º trimestre de 2024. INTERESSADO: SUES Aracaju, 2 de agosto de 2024.

CAPA DO PROCESSO Nº 22327/2024-REL.ETES-DESO. ASSUNTO DO PROCESSO: Relatório de automonitoramento da ETEs referente ao 3º trimestre de 2024. INTERESSADO: SUES. Aracaju, 6 de novembro de 2024.

CAPA DO PROCESSO Nº 1648/2025-REL.ETES-DESO. ASSUNTO DO PROCESSO: Relatório de automonitoramento da ETEs referente ao 4º trimestre de 2024. INTERESSADO: SUES Aracaju, 28 de janeiro de 2025.

HOSSODA, Dário Hachisu; TERCINI, João Rafael Bergamaschi; GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnecarrère. Integrated modeling of quality and quantity for water resources management: case study in the Upper Paranapanema Basin. **RBRH**, v. 29, 2024.

NNAJI, Chidozie Charles. A review of the upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 22, p. 4122–4143, 1 jun. 2014.

MENEZES, Joao Paulo Cunha de *et al.* Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of a small tropical urban stream. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 4, p. 748–757, dez. 2015.

MUNGRAY, Arvind Kumar; MURTHY, Z. V. P.; TIRPUDE, Ashwin J. Post treatment of up-flow anaerobic sludge blanket based sewage treatment plant effluents: A review. **Desalination and Water Treatment**, v. 22, n. 1, p. 220–237, 1 out. 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 5 jun. 2026.

RAJAGOPAL, Rajinikanth; CHOUDHURY, Mahbuboor Rahman; ANWAR, Nawrin; GOYETTE, Bernard; RAHAMAN, Md. Saifur. **Influence of pre-hydrolysis on sewage treatment in an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: a review**. *Water*, Basel, v. 11, n. 2, art. 372, 2019. DOI: 10.3390/w11020372. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w11020372. Acesso em: 5 jun. 2026

SANTOS, Tâmara Tatiana Souza. Dinâmica do oxigênio dissolvido no estuário do rio do Sal/Sergipe. 2014. Dissertação (Mest in rado em Ciências) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.

TERCINI, João Rafael Bergamaschi; MÉLLO JÚNIOR, Arisvaldo Vieira. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. **RBRH**, v. 21, n. 2, p. 338–346, jun. 2016.

KIKUCHI, Mark Douglas Sussumu; MENDONÇA, Luciana Coelho; MENDES, Ludmilson Abritta. Aplicação do Índice de Qualidade da Água (IQA) no Rio do Sal, Sergipe. In: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 13., 2016, Aracaju. *Anais [...]*. Porto Alegre: ABRHidro, 2016.

VON SPERLING, Marcos**. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2014.
VON SPERLING, Marcos. **Lagoas de estabilização**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.