Capacidade de Autodepuração e Planejamento Territorial de Bacias de Pequeno Porte: O Oxigênio Dissolvido como Indicador para Concessão de Outorga em Aracruz/ES

Kennedy Ribeiro da Silva[1], Fabricia Benda de Oliveira[1]

[1]Universidade Federal do Espirito Santo/Programa de Pós-graduação em Geografia, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 – Vitoria - ES, Brasil, kennedyribeirosilva@gmail.com, fabricia.oliveira@ufes.br

Resumo

A avaliação da capacidade de assimilação e autodepuração do Córrego Piranema, frente à ampliação da ETE Piranema para uma vazão de 65 L/s, foi realizada via modelagem matemática de Streeter-Phelps. Os parâmetros de entrada consideraram os dados hidráulicos locais, vazão de referência Q_{90} de 0,044 m³/h e monitoramento in situ de OD (4,50 mg/L) e DBO (3,15 mg/L). Os resultados demonstraram que a nova carga gerará um pico inicial de DBO de 21,62 mg/L na zona de mistura e uma concentração mínima de OD de 2,40 mg/L no ponto crítico de desoxigenação (sag). Em discussão, evidenciou-se que a concentração de OD mantida acima de 2,00 mg/L atende aos critérios regulatórios vigentes para o enquadramento em Classe 4 (Resolução CONAMA nº 357/2005) e satisfaz o suporte biológico necessário para a transição intermediária à Classe 3. A utilização do OD como indicador norteador para concessão de outorga mostrou-se ambientalmente fundamentada, enquanto a adequação do limite de DBO (≤ 10,0 mg/L) será alcançada progressivamente. Conclui-se que o lançamento pretendido é tecnicamente viável e sustentável a curto prazo, garantindo a autodepuração sem anoxia no canal.

Palavras-chave: Autodepuração; Streeter-Phelps; Outorga hídrica.

Área do Conhecimento: Ciências Humanas - Geografia

Introdução

A expansão urbana desordenada converte áreas naturais em ecossistemas alterados, modificando a dinâmica do ciclo hidrológico e pressionando as redes de drenagem por contaminações pontuais e difusas (MENDES; ALVES, 2019; SARDINHA; CONCEIÇÃO, 2008). Nesse cenário, a descarga de efluentes sanitários introduz altas cargas orgânicas, comprometendo a capacidade de suporte dos corpos receptores (SALES; SANTOS, 2014; VON SPERLING, 2014).

A Bacia do Córrego Piranema insere-se nesse contexto vulnerável, onde o aporte de esgoto altera severamente os parâmetros metabólicos da corrente d'água. A análise espacial do Oxigênio Dissolvido (OD) e da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) torna-se essencial para delimitar a zona de mistura e mensurar o alcance da pluma contaminante ao longo do perfil fluvial (BEZERRA et al., 2008; MENDES; ALVES, 2019).

Para mensurar a resiliência dos recursos hídricos sob estresse antrópico, a modelagem matemática destaca-se como ferramenta central de diagnóstico hidroambiental (SALES; SANTOS, 2014; SARDINHA; CONCEIÇÃO, 2008). O modelo de Streeter-Phelps permite simular os processos simultâneos de desoxigenação e reaeração atmosférica, projetando a variação do déficit de oxigênio frente às oscilações sazonais de vazão (STREETER; PHELPS, 1925; BEZERRA et al., 2008).

A utilidade dessa ferramenta foi demonstrada por Sales e Santos (2014) na avaliação de lançamentos pontuais e difusos ao longo de calhas fluviais. Do mesmo modo, Conceição et al. (2017) ressaltaram a eficácia da simulação técnica no apoio à outorga de efluentes, enquanto Mendes e Alves (2019) validaram a precisão da calibração paramétrica em trechos urbanos sob intensa pressão de contaminação.

A relevância da pesquisa reside na necessidade de preencher lacunas ambientais em bacias de pequeno porte, fornecendo subsídios para a governança hídrica e o planejamento territorial (SARDINHA; CONCEIÇÃO, 2008). A caracterização do oxigênio auxilia no monitoramento da Estação

de Tratamento de Esgoto (ETE) e no cumprimento das diretrizes estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONCEIÇÃO et al., 2017).

Assim, este estudo objetiva avaliar o comportamento espacial e temporal do OD e da DBO no Córrego Piranema após o aporte de efluentes sanitários, utilizando o modelo de Streeter-Phelps, como ferramenta de tomada de decisão para obtenção de outorga.

Metodologia

Caracterização da Área de Estudo e Infraestrutura Existente

O estudo foi desenvolvido no Córrego Piranema (Figura 01), inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Riacho e sob jurisdição do Comitê de Bacia Hidrográfica do Litoral Centro-Norte (CBH-LCN), no município de Aracruz, Espírito Santo.

A infraestrutura sanitária local é operada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Aracruz e conta com redes coletoras, interceptores e estações elevatórias de esgoto (EEE) que direcionam os efluentes domésticos para a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piranema. Atualmente a ETE opera com uma vazão média de 45 L/s, mas projetada a ampliação do sistema para uma vazão de 65 L/s, visando absorver as novas cargas poluidoras e evitar o saneamento individual inadequado ou lançamentos in natura.

Figura 01 – Localização do trecho a ser estudado



Fonte: Própria do autor

Quadro Normativo, Enquadramento Legal e Dados de Qualidade da Água

Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Litoral Centro-Norte da Agencia Estadual de Recursos Hídricos (AGERH, 2026), o Córrego Piranema encontra-se formalmente classificado como Classe 4, conforme as diretrizes da Resolução CONAMA nº 357/2005. As águas dessa classe são destinadas prioritariamente à navegação e à harmonia paisagística, não possuindo limites mínimos estabelecidos para Oxigênio Dissolvido (OD) ou limites máximos restritivos para Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$).

Para a avaliação da qualidade atual do corpo receptor a montante e jusante do ponto de lançamento da ETE Piranema, foram realizadas coletas de água e análises físico-químicas laboratoriais, cujos resultados base apontaram:

- Concentração de Oxigênio Dissolvido no rio (OD_{rio}): 4,50mg/L;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio no rio (DBO_{rio}): 3,15mg/L.

Modelagem Matemática de Autodepuração de Streeter-Phelps

Para avaliar a capacidade de assimilação e autodepuração do Córrego Piranema frente ao cenário futuro de ampliação da ETE Piranema (Q= 65L/s), aplicou-se o modelo clássico de balanço de oxigênio de Streeter-Phelps (1925). O modelo simula dinamicamente a competição entre os processos simultâneos de desoxigenação, ou seja, o consumo de oxigênio pela matéria orgânica via decomposição bacteriana e reaeração atmosférica que é a incorporação de oxigênio pela turbulência do fluxo.

A variação da DBO (L_t) e do déficit de oxigênio (D_t) ao longo do tempo de percurso (t = x/v) ao longo da calha do córrego é regida pelas seguintes equações:

$$L_t = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t} \quad \text{a)}$$

$$D_t = \frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} \cdot \left(e^{-K_1 \cdot t} - e^{-K_2 \cdot t}\right) + D_0 \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad \text{b)}$$

Equação 01 - Formulas para cálculo do déficit de oxigênio no tempo

Resultados e Discussão

A simulação computacional pelo modelo de Streeter-Phelps permitiu modelar o comportamento longitudinal do Oxigênio Dissolvido (OD) no Córrego Piranema, após o lançamento do efluente tratado da ETE Piranema, sob a nova vazão pretendida de 65 L/s.

Os resultados projetados no Gráfico 01, indicam que a introdução do efluente provoca uma queda imediata e progressiva no nível de oxigênio dissolvido a partir da zona de mistura. O ponto crítico de desoxigenação (sag de oxigênio) atinge uma concentração mínima de OD = 2,40 mg/L. A partir desse ponto ao longo do percurso fluvial, os processos de reaeração atmosférica superam a taxa de desoxigenação microbiana, promovendo a paulatina recuperação da qualidade da água.

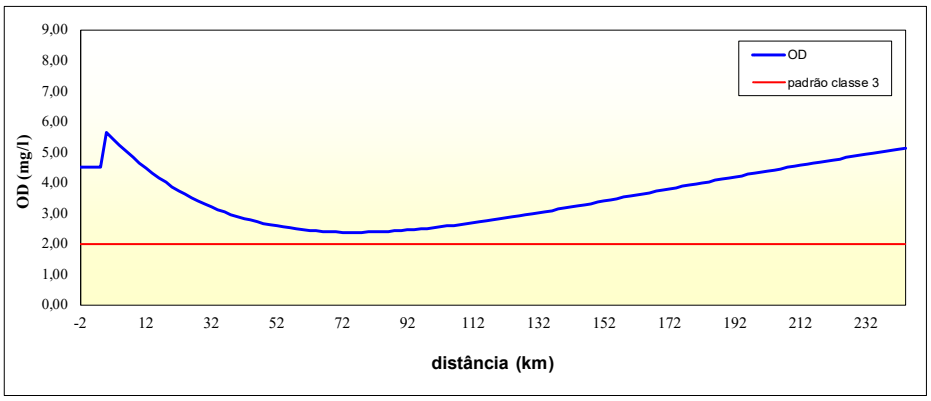


Gráfico 01 – Comportamento do consumo de OD após o lançamento

Considerando a classificação regulatória atual do córrego como Classe 4, cuja diretriz pela Resolução CONAMA nº 357/2005 destina-se precipuamente à navegação e harmonia paisagística sem fixação rigorosa de limites mínimos para OD, a manutenção da concentração acima de 2,00 mg/L evidencia a viabilidade socioambiental do sistema de tratamento de esgoto. Mais do que atender à Classe 4 atual, o valor mínimo atingido 2,40 mg/L, satisfaz os limites críticos de suporte biológico exigidos para Classe 3 (OD ≥ 2,0 mg/L) em condições de vazão crítica de referência Q_{90}.

Comportamento análogo foi observado por Sardinha e Conceição (2008) no Ribeirão do Meio (SP), onde a aplicação do modelo de Streeter-Phelps demonstrou que a eficiência no tratamento de efluentes sanitários urbanos permitiu manter a autodepuração do canal sem que o OD atingisse condição de anaerobiose. Da mesma forma, Conceição et al. (2017), ao analisarem a capacidade de suporte do Rio

Piranhas-Açu (RN), destacaram que o monitoramento do poço crítico de oxigênio constitui o parâmetro decisivo para a concessão de outorgas de lançamento, uma vez que a manutenção de níveis mínimos de OD > 2,0 mg/L previne episódios de mortandade de peixes e degradação trófica severa.

O perfil espacial da Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$), modelado para o efluente tratado da ETE Piranema com DBO de saída de 30,00 mg/L e eficiência de remoção de 90 % sobre o esgoto bruto de 300,00 mg/L, é apresentado no Gráfico 2.

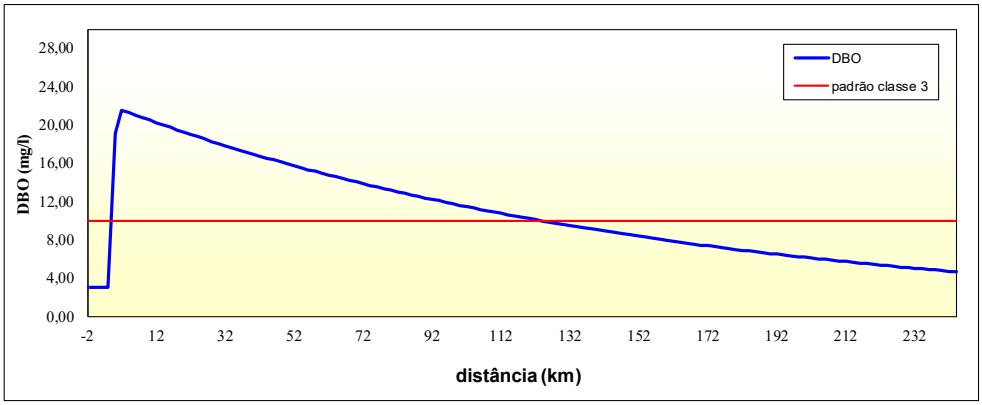


Gráfico 02 – Comportamento do consumo de DBO após o lançamento

Analisando a diluição e a cinética de degradação orgânica, constata-se que a concentração de DBO eleva-se para um valor de 21,62 mg/L na zona de mistura imediatamente a jusante da ETE. A partir deste ponto, observa-se o caimento exponencial característico da estabilização da matéria orgânica carbonácea pela ação microbiana heterotrófica.

Embora o pico de 21,62 mg/L supere o limite teto estipulado de 10,00 mg/L para rios de Classe 3 (CONAMA 357/2005), ressalta-se que o enquadramento vigente do córrego é de Classe 4, para o qual a legislação não estabelece teto máximo restritivo para este parâmetro.

Resultados semelhantes quanto ao comportamento da carga orgânica na zona de mistura foram relatados por Mendes e Alves (2019) no Rio Meia Ponte (GO). Os autores verificaram que a contribuição de efluentes tratados em rios de pequeno e médio porte gera picos elevados de DBO na zona de diluição inicial, exigindo extensão territorial substancial para que o processo de autodepuração restabeleça as concentrações prévias do rio. Ademais, Sales e Santos (2014) demonstraram que rios submetidos a vazões de referência baixas (Q_{90}) apresentam menor capacidade de diluição imediata, tornando imprescindível o planejamento temporal e a modernização progressiva das ETEs para adequação às metas futuras das bacias.

Conclusão

Dessa forma, é possível concluir que a área da presente pesquisa é classificada como Estádio Inicial de Regeneração da Mata Atlântica, por possuir as seguintes características:

- A ampliação da vazão de efluente para 65 L/s mantém a concentração mínima de Oxigênio Dissolvido em 2,40 mg/L no ponto crítico de desoxigenação;
- A utilização do Oxigênio Dissolvido como indicador norteador para a emissão da outorga mostra-se tecnicamente fundamentada e ambientalmente viável. Embora o pico de DBO na zona de mistura alcance 21,62 mg/L, pois o parâmetro OD reflete de forma direta o efeito real da degradação orgânica no meio aquático, garantindo que o ecossistema não entre em colapso enquanto o corpo d'água permanece em enquadramento temporário de Classe 4.

Referências

BEZERRA, I. S. de O.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. **Rem:**

Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 61, n. 2, p. 249-255, 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. Brasília: Diário Oficial da União, 2005.

CONCEIÇÃO, F. T. da; SOROLDONI, S.; SIMEÃO, M.; GODOY, L. H. de. Aplicação do modelo simplificado de Streeter-Phelps para analisar a qualidade da água do rio Piranhas-Açu, RN. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, p. 1024-1036, 2017.

AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (AGERH). **Relatório de Enquadramento dos Corpos de Água – ETAPA B**: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Litoral Centro-Norte. Vitória: AGERH/CBH-LCN, 2026.

MENDES, W. dos S.; ALVES, W. S. Modelo Streeter-Phelps para estimativa do oxigênio dissolvido em trecho urbano do rio Meia Ponte. **Tecnia: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG**, Goiânia, v. 4, n. 2, p. 62-79, 2019.

SALES, M. de L.; SANTOS, M. A. dos. Aplicação das equações de Streeter-Phelps em rios que recebem fontes de poluentes pontuais e difusas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 145-156, 2014.

SARDINHA, D. de S.; CONCEIÇÃO, F. T. da. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do ribeirão do Meio, Leme (SP). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 329-338, 2008.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio River**. Washington: U.S. Public Health Service, Public Health Bulletin n. 146, 1925.

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