Encontro Técnico AESABESP
36º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO JUNDIAÍ UTILIZANDO STREETER-PHELPS COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

Anna Júlia Sigrist[1]
Engenheira Ambiental pela USP e aluna de mestrado em Pesquisa Operacional na mesma instituição. Atua como Engenheira Especialista na E-Agua Engenharia.
Matheus Renato Gomes[2]
Engenheiro Ambiental pela UNIFAL-MG, com especializações em Gerenciamento de Projetos pela University of Adelaide e Gerenciamento de Engenharia pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT). Atua como Diretor Comercial da E-Agua Engenharia.
Fernando Meletti Maciel[3]
Engenheiro Ambiental pela UFTM-MG. Atua como Engenheiro Especialista na E-Agua Engenharia.
Carlos Meszaros Filho[4]
Engenheiro Químico com experiência em processos de tratamento de água e de efluentes industriais e sanitários, desenvolvendo projetos de estações e de reuso de água. Atua como Engenheiro Especialista na Companhia Saneamento de Jundiaí.
Luiz Pannuti Carra[5]
Engenheiro Civil com habilitação em saneamento pela Universidade Mackenzie, com extensão em Administração e Marketing e técnico em Eletrônica e Processamento de Dados. Atua como diretor-presidente da Companhia Saneamento de Jundiaí, conselheiro do Consórcio PCJ, conselheiro técnico da Abcon, conselheiro da Opersan S/A e conselheiro da Associação Socioeducacional Casa da Fonte.

Endereço[1]**:** Rua Sebastião de Moraes, 634 – Parque Santa Felícia – São Carlos – São Paulo - CEP: 13562-425 - Brasil - Tel: +55 (16) 3374-7025 - e-mail: annajulia.sigrist@e-agua.com.

RESUMO

O presente estudo apresenta uma ferramenta de modelagem desenvolvida em planilha eletrônica, com base no Modelo Clássico de Streeter-Phelps, para representar os processos de autodepuração do Rio Jundiaí e avaliar os impactos do lançamento de efluentes tratados da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí na qualidade da água do recurso hídrico. Foram avaliados os parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio, formas nitrogenadas (nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), oxigênio dissolvido, fósforo total e coliformes totais em cenários hidrológicos distintos (de estiagem a cheias), combinados com dois cenários de carga poluidora, o lançamento isolado da estação e a incorporação de outras descargas de poluição. Parâmetros como nitrogênio amoniacal e oxigênio dissolvido foram observados ao longo de perfis longitudinais e apoiaram a estimativa da capacidade de autodepuração do Rio Jundiaí no trecho, indicando que a ferramenta é eficaz no apoio à tomada de decisão e esclarecendo o papel de diferentes fontes poluidoras nos efeitos sobre a qualidade da água do rio, que é manancial de abastecimento público na região. A metodologia mostrou-se eficiente, simples e acessível a diferentes contextos, sendo uma alternativa útil para apoiar o planejamento e a gestão de recursos hídricos sob pressão antrópica.

PALAVRAS-CHAVE: Autodepuração, fontes difusas de poluição, águas urbanas.

INTRODUÇÃO

A qualidade dos corpos hídricos superficiais é uma variável fundamental para a sustentabilidade e a segurança hídrica em sistemas de abastecimento público, especialmente em áreas com alta densidade populacional e significativa pressão antrópica. O Rio Jundiaí, situado no estado de São Paulo, desempenha um papel estratégico no abastecimento das cidades que têm captações diretas no seu leito. No entanto, a existência de múltiplos pontos de lançamento de efluentes ao longo de sua extensão representa desafios substanciais à preservação da qualidade da água, exigindo uma gestão integrada, eficiente e fundamentada em dados técnicos para o manejo do recurso hídrico (Fleck *et al*., 2013; Gonçalves *et al*., 2012).

A avaliação dos processos de autodepuração e de diluição de poluentes em corpos d'água subsidia decisões sobre a viabilidade e a segurança de captações de água em bacias que recebem efluentes tratados. O modelo de *Streeter-Phelps*, amplamente reconhecido na literatura, fornece uma abordagem sólida para simular a dinâmica do oxigênio dissolvido (OD), considerando a carga orgânica lançada, as características do corpo hídrico e as taxas de desoxigenação e de reaeração. Essa modelagem permite uma compreensão mais profunda do comportamento da

massa de água a jusante do deságue de efluentes, sendo especialmente interessante sob o ponto de vista da gestão de recursos hídricos e da proteção de ecossistemas aquáticos (Fleck *et al*., 2013; Ramos *et al*., 2019; Poletti & Cunha, 2017).

Reconhecendo a importância de ferramentas de suporte à decisão na gestão de recursos hídricos, sobretudo frente aos desafios impostos pela poluição orgânica em mananciais de abastecimento (Thomaz *et al*., 2023; Amorim *et al*., 2020), o presente trabalho aborda uma ferramenta desenvolvida na forma de planilha para modelar os impactos potenciais no recurso hídrico considerando as cargas poluidoras e sua multiplicidade de usos. Essa ferramenta computacional foi baseada no modelo QUAL-UFMG, desenvolvido por von Sperling (2018), com o objetivo de simular os processos de autodepuração e diluição no Rio Jundiaí. A planilha foi customizada para permitir a simulação de diferentes cenários de lançamento de efluentes pela Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí (ETEJ), integrando outras fontes de poluição que influenciam o trecho avaliado.

O intuito do trabalho foi desenvolver um modelo da qualidade da água em um trecho de aproximadamente 40 km entre Jundiaí e Indaiatuba-SP, considerando as principais fontes poluidoras e proporcionando uma ferramenta de suporte à decisão para a concessionária responsável pela ETEJ, a Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ). Este modelo possibilitou a simulação de cenários que ajudaram a definir as melhores ações no curto prazo e apontar, de forma preliminar, as melhorias necessárias aos sistemas de saneamento na bacia do Rio Jundiaí. Através do modelo desenvolvido foi possível contribuir para a tomada de decisão das partes relacionadas, o planejamento operacional dos sistemas de saneamento municipais e a avaliação integrada da sustentabilidade no trecho junto aos órgãos ambientais.

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi analisar o comportamento dos processos de autodepuração e diluição do Rio Jundiaí, a partir da aplicação da ferramenta de modelagem em planilha eletrônica, a fim de avaliar a qualidade da água e identificar potenciais impactos nos usos consuntivos no trecho. Para isso foram estabelecidos três objetivos específicos:

i) Simular o comportamento dos principais parâmetros de qualidade da água ao longo do trecho estudado, principalmente em termos de concentração de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4$), considerando cenários de vazão de estiagem (Q_{95}), média (Q_{mlt}) e de cheia ($Q_{máx}$);

ii) Avaliar e comparar a resposta do Rio Jundiaí frente aos aportes de poluição urbana e os parâmetros de qualidade esperados para a classe de enquadramento segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005;

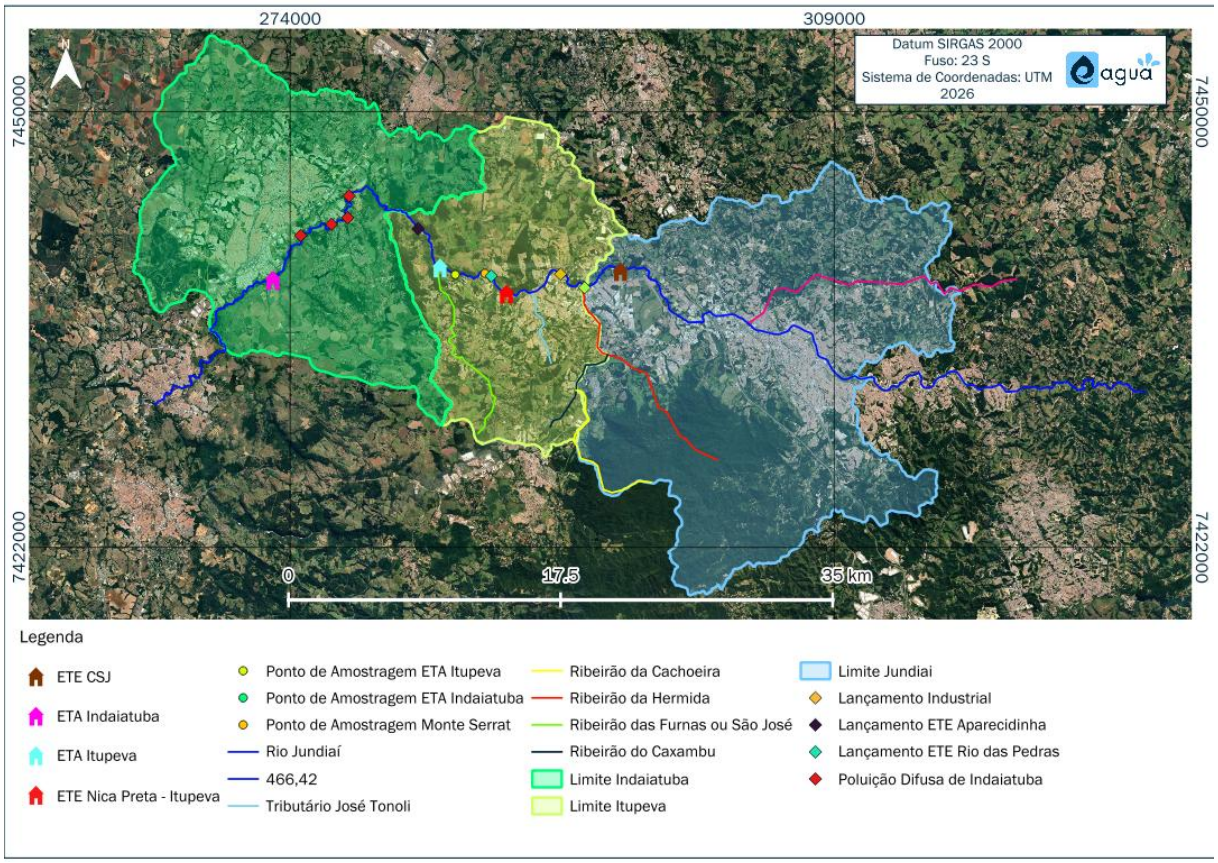
iii) Fornecer subsídios técnicos para a gestão integrada dos recursos hídricos, através da identificação de áreas críticas e da proposição de medidas adequadas para a proteção da qualidade da água, tendo em vista os usos previstos do recurso hídrico pela classe de enquadramento.

METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido na bacia hidrográfica do Rio Jundiaí, que integra a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 05 – Piracicaba, Capivari e Jundiaí, no estado de São Paulo, e tem como foco o trecho entre os municípios de Itupeva e Indaiatuba. Trata-se de uma região marcada por acelerado processo de urbanização, intensa atividade industrial e múltiplos pontos de lançamento de esgoto (bruto e tratado) e de captação de água para abastecimento público.

Para a contextualização espacial da área de estudo e o entendimento dos múltiplos agentes de influência no trecho, como os rios tributários, as fontes de poluição e os sistemas de saneamento, foi elaborado com o *software* QGIS um mapa representando e georreferenciando a região. O mapa apresenta de forma esquemática os principais componentes da bacia, incluindo estações elevatórias de esgoto (EEEs), estações de tratamento de esgoto (ETEs), estações de tratamento de água (ETAs) afluentes do Rio Jundiaí e pontos de captação de água (Figura 1).

Figura 1 – Mapa do percurso do Rio Jundiaí, seus afluentes, infraestruturas locais de saneamento e possíveis fontes de poluição



Fonte: elaboração própria (2026)

A modelagem dos processos de autodepuração e diluição se baseou no Modelo Clássico de *Streeter-Phelps*, por meio da planilha QUAL-UFMG, desenvolvida por von Sperling (2018) e adaptada para o contexto do Rio Jundiaí. A ferramenta foi customizada em planilha eletrônica, integrando múltiplas fontes de poluição pontual e difusa no trecho analisado e permitindo simular a variação das concentrações de parâmetros de interesse, como OD e N-NH_4, ao longo do curso d'água.

Essa abordagem se destaca por seu baixo custo operacional, uma vez que utiliza *softwares* amplamente disponíveis e de fácil manuseio, como o QGIS para georreferenciamento, dispensando opções comerciais onerosas ou equipamentos sofisticados. Além disso, a customização da planilha QUAL-UFMG possibilita rápida atualização e replicação dos cenários, reduzindo o tempo e os recursos necessários para a análise técnica, o que torna a solução viável para concessionárias e órgãos gestores com orçamento limitado.

O modelo considera os processos de desoxigenação pela carga orgânica e de reaeração pelas trocas gasosas com a atmosfera, além de permitir a representação de parâmetros complementares, como nitrogênio, fósforo e coliformes totais.

A desoxigenação e a reaeração são processos que interferem diretamente na depuração de efluentes e, por consequência, em outros mecanismos hidrobiológicos relacionados à qualidade das águas. Esses dois processos podem ser descritos matematicamente pela derivada da concentração de OD ao longo do tempo, conforme Equações (1) e (2).

$$\frac{\mathrm{dOD}}{\mathrm{dt}} = -k_1 \cdot \mathrm{DBO} \qquad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{\mathrm{dOD}}{\mathrm{dt}} = k_2 \cdot (OD_S - \mathrm{OD}) \qquad \text{Equação (2)}$$

Em que:

k_1 = coeficiente de desoxigenação (d^{-1});
k_2 = coeficiente de reaeração (d^{-1});
DBO = demanda bioquímica de oxigênio;
OD_s = é a concentração de saturação de oxigênio dissolvido;
OD = é a concentração de oxigênio dissolvido no trecho avaliado.

No caso do N-NH_4, o modelo considera o processo de nitrificação como a principal via de remoção, representado pela Equação (3).

$$\frac{dNH_4}{dt} = -k_n \cdot (N - NH_4) \qquad \text{Equação (3)}$$

Em que:

k_n = coeficiente de nitrificação (d^{-1});
N-NH_4 = concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L).

O decaimento das concentrações de amônia por nitrificação é afetado por fatores como temperatura, concentração de OD e tempo de viagem da massa líquida. A temperatura, em particular, influencia diretamente o valor de k_n, que pode ser ajustado pela Equação de van't Hoff-Arrhenius, apresentada pela Equação (4).

$$k_{nT} = k_{n20} \cdot \theta^{(T-20)} \qquad \text{Equação (4)}$$

Em que:

k_nT = coeficiente de nitrificação à temperatura T (d^{-1});
k_n20 = coeficiente de nitrificação a 20 °C (d^{-1});
θ = fator de correção de temperatura (adimensional, geralmente entre 1,03 e 1,08);
T = temperatura da água (°C).

Além da entrada direta pelo aporte de amônia dos lançamentos de ETEs, o modelo considera o processo de amonificação do nitrogênio orgânico (Norg), que, embora não seja usualmente monitorado em corpos hídricos, está presente nos efluentes domésticos e é um indicador do estágio de poluição hídrica devido à mineralização em N-NH_4 (von Sperling, 1996). Esses processos e equações permitem representar de forma eficaz a dinâmica do N-NH_4 ao longo do rio, sendo particularmente relevantes para avaliar a conformidade dos cenários simulados com os limites de qualidade estabelecidos para corpos hídricos pelas normas técnico-regulatórias, em especial a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA.

A implementação da ferramenta contempla diversas variáveis de entrada, incluindo vazões (mínima, média e de cheia), características dos efluentes, temperatura, tempo de viagem e coeficientes cinéticos de desoxigenação (k_1) e de reaeração (k_2). A ferramenta permite testar cenários variados de lançamento e de condições hidrológicas, oferecendo suporte técnico para a avaliação de impactos e a tomada de decisão.

Para a análise da conformidade dos resultados simulados, adotaram-se os parâmetros de qualidade da água estabelecidos para corpos d'água de Classe 3, pela Resolução CONAMA nº 357/2005, conforme definido no Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2020–2035. Essa classificação admite usos como abastecimento público (com tratamento convencional ou avançado), dessedentação de animais e irrigação de culturas, desde que respeitados limites mínimos de qualidade, como OD $\geq$ 4 mg/L e N-NH_4 < 13,3 mg/L, os quais foram utilizados como referência para avaliação dos cenários simulados.

O modelo simula a variação longitudinal de OD a partir do balanço entre desoxigenação e reoxigenação. Os parâmetros hidrológicos utilizados na modelagem do Rio Jundiaí foram definidos com base na análise de séries históricas de vazão da Estação Fluviométrica 62395000 – Itupeva (SP), abrangendo o período de 1992 a 2021. Para os principais afluentes, as estimativas de vazão foram obtidas por meio do *software* institucional de regionalização hidrológica no Estado de São Paulo do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). A partir dessas informações, foram definidas três faixas de vazões representativas — vazão de seca (Q_{95}), média (Q_{mlt}) e de cheia (Q_{25} ou $Q_{máx}$) —, aplicadas tanto ao Rio Jundiaí quanto a seus tributários. A Tabela 1 apresenta

os valores adotados para os tributários Ribeirão da Hermida, José Tonoli e Ribeirão das Furnas, conforme as diferentes condições de vazão.

Tabela 1 – Vazões dos Tributários

Tributário	Q_{95} (m³/s)	Q_{mlt} (m³/s)	$Q_{máx}$ (m³/s)
Ribeirão da Hermida	0,22	1,07	1,54
José Tonoli	0,08	0,38	0,53
Ribeirão das Furnas	0,08	0,36	0,52

Fonte: DAEE (2024)

As premissas e contribuições foram definidas com base em dados primários e secundários, a partir de levantamentos de campo, bancos de dados do SINISA (2022), DAEE e a literatura técnica especializada, como os trabalhos de Metcalf (2016) e von Sperling (2018). Os pontos de contribuição de carga orgânica considerados no modelo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pontos de contribuição de carga orgânica considerados no modelo

Fonte Poluidora	Tipo de Carga	Vazão (L/s)	Origem dos Dados
ETEJ	Esgoto tratado (lagoas aeradas)	1.062	CSJ (2023)
Tributário Ribeirão da Hermida	Rio Classe 3	Q_{95}=220 Q_{mlt}=1070 $Q_{máx}$=1540	DAEE (2024)
Tributário José Tonoli	Rio Classe 2	Q_{95}=80 Q_{mlt}=380 $Q_{máx}$=530	DAEE (2024)
Tributário Ribeirão das Furnas	Rio Classe 3	Q_{95}=80 Q_{mlt}=360 $Q_{máx}$=520	DAEE (2024)
Complexo Industrial Itupeva	Industrial estimada	200	Metcalf & Eddy (2016)
Poluição difusa – Indaiatuba	Esgoto doméstico bruto	380	SINISA (2022)
ETE Nica Preta	Esgoto tratado (reator UASB)	180	von Sperling (2018)
ETE Rio das Pedras	Esgoto tratado (lodos ativados com aeração prolongada)	20	von Sperling (2018)
ETE Aparecidinha	Esgoto tratado (filtros submersos)	3	von Sperling (2018)

Fonte: elaboração própria (2026)

Os coeficientes de reaeração (k_2) foram calculados com base na Equação (5), proposta empiricamente por Chapra (1997), que considera que a reaeração atmosférica é condicionada pela velocidade do escoamento na calha e pela altura da lâmina d'água no canal.

$$k_2 = 3{,}93 \cdot U^{0{,}5} \cdot H^{-1{,}5}$$ Equação (5)

Em que:

k_2 = coeficiente de reaeração (d^{-1});
U = velocidade média da água (m/s);
H = profundidade média (m).

Os parâmetros de profundidade, largura, declividade e velocidade foram estimados a partir de dados extraídos de Rodrigues (2005) em diferentes trechos do Rio Jundiaí, em função da variabilidade de suas características geométricas ao longo do curso, a fim de incluir valores de k_2 representativos da dinâmica de reaeração em cada trecho.

Para calibrar o modelo e garantir maior fidedignidade dos resultados, a CSJ realizou o monitoramento do Rio Jundiaí por meio da coleta de amostras em diferentes pontos: a montante e a jusante da ETEJ, na Ponte Monte Serrat e nas captações das ETAs de Itupeva e Indaiatuba. Também foram incluídas amostras para a caracterização dos pontos de lançamento, abrangendo os tributários Hermida, José Tonoli e Furnas, e o histórico de resultados analíticos de efluentes de ETEs e de indústrias disponíveis. Esses dados foram integrados às informações de vazão do Rio Jundiaí, obtidas pela estação fluviométrica Itaici (código 4E-017 da Agência de Águas do Estado de São Paulo, SP Águas), e às medições de vazão e de qualidade do esgoto tratado na ETEJ, possibilitando a verificação e a validação dos resultados obtidos.

A aplicação do modelo de Streeter-Phelps permitiu simular a autodepuração do Rio Jundiaí e avaliar os efeitos das cargas poluidoras, com ênfase no trecho entre a ETEJ, em Jundiaí, e a captação de água da ETA de Indaiatuba. Foram simulados três cenários hidrológicos do Rio Jundiaí, diferentes entre si pela oferta de vazão condicionada pelo regime climático: estiagem (Q_{95} = 2,0 m³/s), média (Q_{mlt} = 10,0 m³/s) e cheia ($Q_{máx}$ = 17,0 m³/s), sendo a condição de estiagem a mais crítica em termos de qualidade da água, devido à menor diluição e maior concentração de poluentes.

RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados completos para os diferentes regimes de vazão, considerando todas as fontes de poluição.

Tabela 3 – Resultados dos parâmetros nos pontos de captação da ETA Indaiatuba para os cenários de vazão mínima, média e de cheia, considerando todas as fontes de poluição

Parâmetros	Rio Jundiaí	CONAMA nº 357/2005	Ponto de Captação da ETA Indaiatuba		
	Montante da ETEJ	Classe 3	Q_{95}	Q_{mlt}	$Q_{máx}$
Vazão (m^3/s)	-	-	2,00	10,00	17,00
OD (g/m^3)	1,40	≥ 4,0	2,76	2,21	2,77
DBO (g/m^3)	7,00	≤ 10,0	14,07	8,16	7,52
$N\text{-}NH_4$ (g/m^3)	6,40	≤ 13,3	7,18	6,17	6,11
N_{org} (g/m^3)	0,00	-	1,15	0,34	0,22
$N\text{-}NO_3$ (g/m^3)	0,80	≤ 10,0	8,13	3,61	2,78
$N\text{-}NO_2$ (g/m^3)	0,30	≤ 1,0	1,15	0,94	0,79
Fósforo (g/m^3)	0,68	≤ 0,5	2,41	1,14	0,96
Coliformes Totais (NMP/100mL)	2,20E+04	≤4,00E+03	7,55E+06	2,23E+06	1,50E+06

Fonte: elaboração própria (2026)

Nos cenários de estiagem, verificam-se os piores índices de qualidade da água, uma vez que a redução da vazão do corpo hídrico diminui a capacidade de diluição dos poluentes e restringe os processos naturais de autodepuração. A DBO simulada atingiu 14,07 g/m^3 em Indaiatuba, valor que ultrapassa o limite de 10 g/m^3 estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos de Classe 3. A concentração de OD, por sua vez, também está fora do limite legal, com valor de 2,76 g/m^3 no mesmo ponto, o que indica comprometimento da capacidade de reaeração do corpo hídrico e das condições de oxigenação necessárias à manutenção da biota aquática.

A concentração de $N\text{-}NH_4$ registrada é de 7,18 g/m^3, valor que, embora elevado, está dentro do limite máximo estabelecido pela resolução para corpos hídricos de Classe 3 (13,3 g/m^3). O nitrogênio orgânico (Norg), parâmetro sem limite legalmente definido, apresenta concentração de 1,15 g/m^3 no mesmo ponto, o que indica a presença de matéria orgânica nitrogenada no sistema. Essa fração tende a sofrer mineralização ao longo do curso d'água, com consequente oxidação progressiva e aumento nas concentrações de nitrato ($N\text{-}NO_3$). Esse processo está condicionado à capacidade de oxigenação do canal, que se relaciona com as características hidrodinâmicas do trecho analisado, e colabora com a redução do OD disponível no curso d'água (von Sperling, 1996).

O teor de $N\text{-}NO_3$ foi de 8,13 g/m^3 em Indaiatuba, próximo do limite de 10 g/m^3 para a classe de enquadramento. Já o valor de nitrito ($N\text{-}NO_2$), intermediário na oxidação do nitrogênio, ultrapassa o limite legal de 1,0 g/m^3, com valor de 1,15 g/m^3 em Indaiatuba, o que pode indicar deficiência de oxigênio e risco à biota aquática.

O fósforo total apresentou valores acima do limite de 0,15 g/m^3, atingindo 2,41 g/m^3 em Indaiatuba e permanecendo elevado mesmo com aumento da vazão. Essa persistência sugere a influência de fontes difusas, como escoamento agrícola, águas pluviais contaminadas e falta de interceptação de esgoto doméstico ou efluentes.

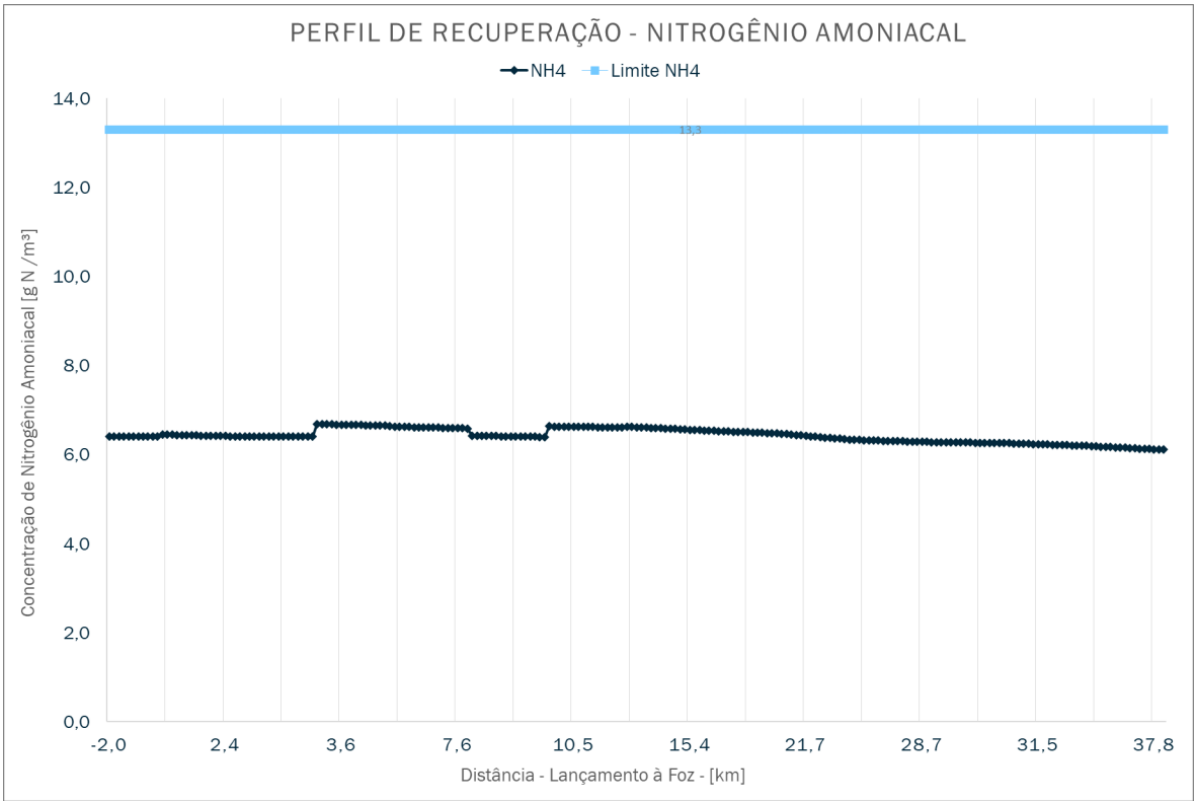
A concentração de coliformes totais simulada no cenário de estiagem atingiu $7{,}55\times10^6$ NMP/100 mL em Indaiatuba, valor que excede o limite de $4{,}0\times10^3$ NMP/100 mL estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Mesmo no cenário de cheia, as concentrações permaneceram na ordem de 10^6 NMP/100 mL, o que sugere contaminação microbiológica persistente e independente das condições hidrológicas. Esse cenário indica lançamento contínuo de esgoto doméstico sem tratamento adequado, possivelmente associado a ligações clandestinas e aporte de poluição difusa.

Considerando que o Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PBH-PCJ) prevê o aumento da eficiência de remoção de fósforo e coliformes apenas no cenário final de planejamento, para o ano de 2050, e que os níveis de eficiência atualmente praticados estão em conformidade com o que preconiza o PBH-PCJ, a desconformidade dos parâmetros de fósforo e coliformes observada no modelo para o Rio Jundiaí leva a crer que as outras fontes de poluição exercem maior influência no cenário de desenquadramento do corpo hídrico.

No cenário de cheia, o aumento da vazão proporciona melhoria geral nos indicadores de qualidade hídrica: a DBO no ponto de captação de Indaiatuba reduz para 7,52 g/m³, o OD eleva-se para 2,77 g/m³ e as concentrações de coliformes totais apresentam declínio, embora permaneçam acima dos limites estabelecidos pela resolução de enquadramento. Os teores de fósforo total e de $N\text{-}NO_2$ permanecem em níveis elevados, o que indica que, apesar da diluição, a poluição difusa e os lançamentos pontuais a montante mantêm a pressão sobre o rio.

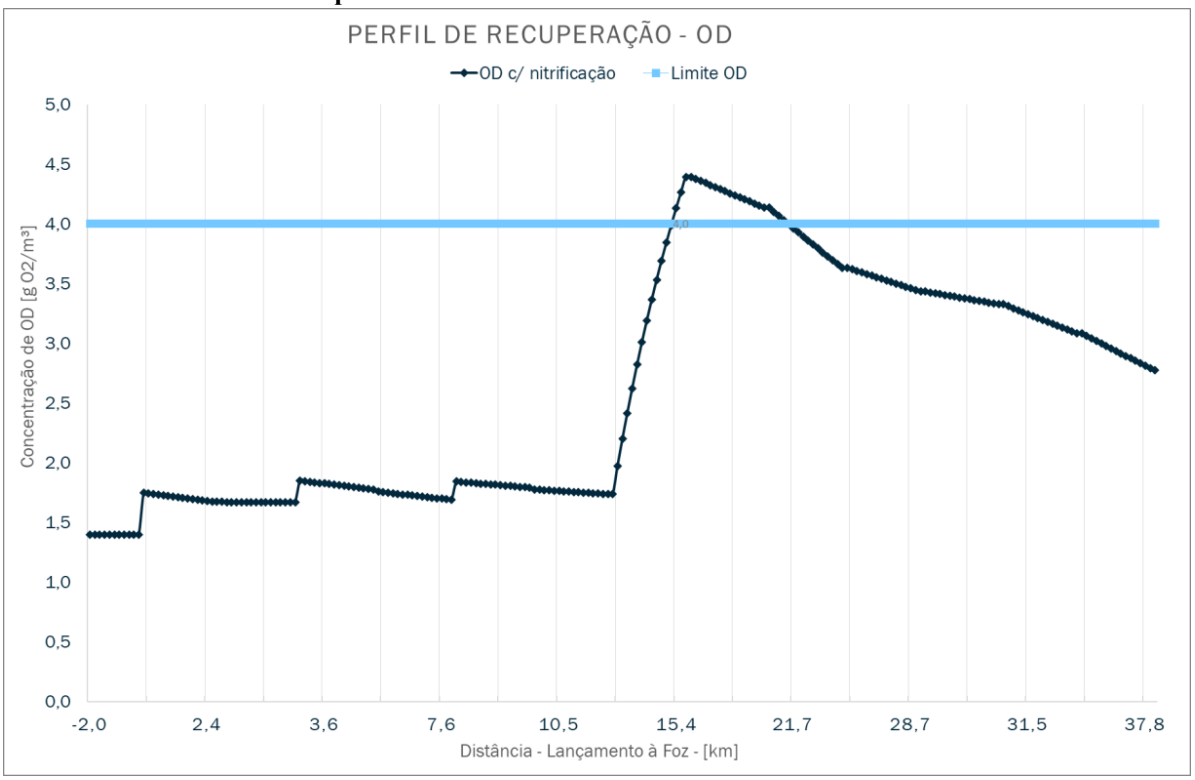
Os gráficos longitudinais das Figuras 2 e 3 mostram a recuperação do $N\text{-}NH_4$ e do OD ao longo do rio no cenário de cheia ($Q_{máx}$). O $N\text{-}NH_4$ decresce ao longo do trecho, indicando a eficácia da nitrificação em condições de maior disponibilidade hídrica. O OD ultrapassa o limite mínimo de 4,0 g/m³ em parte significativa do trecho, o que proporciona melhores condições de sobrevivência e manutenção da vida aquática.

Figura 2 – Perfil Longitudinal de $N\text{-}NH_4$ no Rio Jundiaí considerando a vazão $Q_{máx}$ e limite para Classe 3, considerando todas as fontes poluidoras



Fonte: elaboração própria (2026)

Figura 3 – Perfil Longitudinal de OD no Rio Jundiaí considerando a vazão $Q_{máx}$ e limite para Classe 3, considerando todas as fontes poluidoras



Fonte: elaboração própria (2026)

A comparação dos resultados da contribuição isolada da ETEJ (Tabela 4) e do cenário com todas as cargas poluidoras (Tabela 3), viabilizada pela ferramenta, indica que a presença das demais fontes, especialmente difusas e industriais, influencia a concentração dos parâmetros analisados de forma significativa. Tendo como exemplo a modelagem nas condições hidrológicas de escassez (vazão Q_{95}), parâmetros como N-NH_4, coliformes totais e N-NO_2 apresentaram valores mais próximos dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 no cenário da contribuição isolada da ETEJ do que na modelagem para todas as fontes poluidoras. Esse resultado indica que os outros pontos de poluição considerados (demais ETEs, complexo industrial em Itupeva e poluição difusa) exercem pressão significativa sobre o recurso hídrico, especialmente em época de estiagem.

Tabela 4 – Resultados simulados para parâmetros de qualidade da água na captação da ETA Indaiatuba, considerando apenas a carga da ETEJ

Parâmetros	Rio Jundiaí	CONAMA nº 357/2005	Ponto de Captação da ETA Indaiatuba		
	Montante da ETEJ	Classe 3	Q_{95}	Q_{mlt}	$Q_{máx}$
Vazão (m³/s)	-	-	2,00	10,00	17,00
OD (g/m³)	1,40	≥ 4,0	3,94	2,49	2,94
DBO (g/m³)	7,00	≤ 10,0	10,82	7,08	6,81
$N\text{-}NH_4$ (g/m³)	6,40	≤ 13,3	5,91	5,77	5,86
N_{org} (g/m³)	0,00	-	0,56	0,15	0,1
$N\text{-}NO_3$ (g/m³)	0,80	≤ 10,0	9,06	3,73	2,83
$N\text{-}NO_2$ (g/m³)	0,30	≤ 1,0	0,99	0,91	0,78
Fósforo (g/m³)	0,68	≤ 0,5	2,32	1,08	0,91
Coliformes Totais (NMP/100mL)	2,20E+04	≤4,00E+03	1,12E+04	1,27E+04	1,41E+04

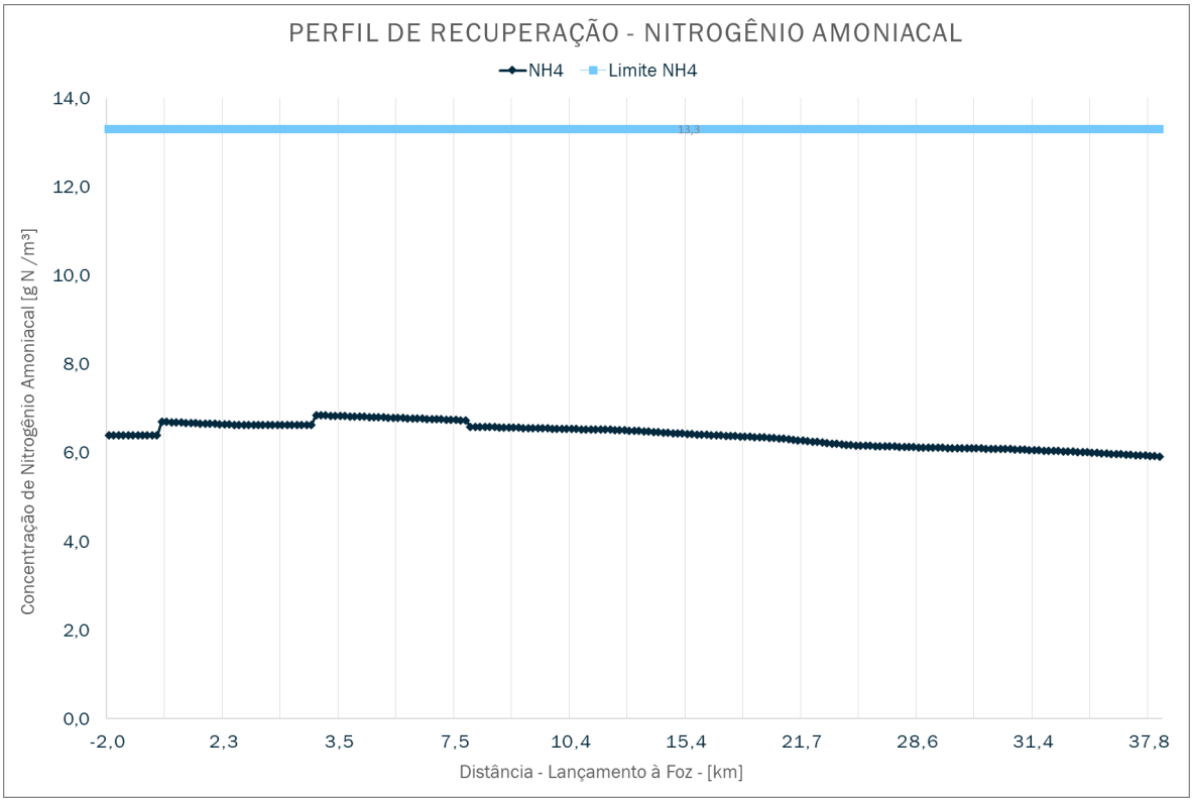
Fonte: elaboração própria (2026)

Em relação às concentrações de $N\text{-}NH_4$, observa-se que, quando considerada exclusivamente a carga da ETEJ, os valores decresceram de aproximadamente 9,87 g/m³ para 5,91 g/m³ na captação da ETA Indaiatuba. Essa redução indica que as cargas adicionais provenientes de extravasores de esgoto sanitário, de efluentes industriais e, sobretudo, da poluição difusa urbana contribuem para o aumento da carga de $N\text{-}NH_4$ no rio.

Além disso, parâmetros como N_{org}, fósforo total e $N\text{-}NO_2$ apresentaram reduções consideráveis no cenário isolado da ETEJ, o que contribui para a hipótese de que tais compostos estão fortemente associados ao lançamento de esgoto doméstico sem tratamento adequado, ao carreamento de poluição pelo escoamento superficial e à poluição difusa oriunda de culturas agrícolas com alto uso de fertilizantes.

O gráfico da Figura 4 ilustra o perfil longitudinal de $N\text{-}NH_4$ ao longo do Rio Jundiaí, considerando a vazão Q95 e a contribuição isolada da ETEJ. Observa-se que a concentração inicial após o lançamento é de cerca de 6,4 g/m³, com redução lenta ao longo do curso do rio, atingindo aproximadamente 5,9 g/m³ na foz. Essa tendência de declínio evidencia a nitrificação amoniacal no processo de autodepuração, ainda que gradual, na ausência de novas cargas a jusante.

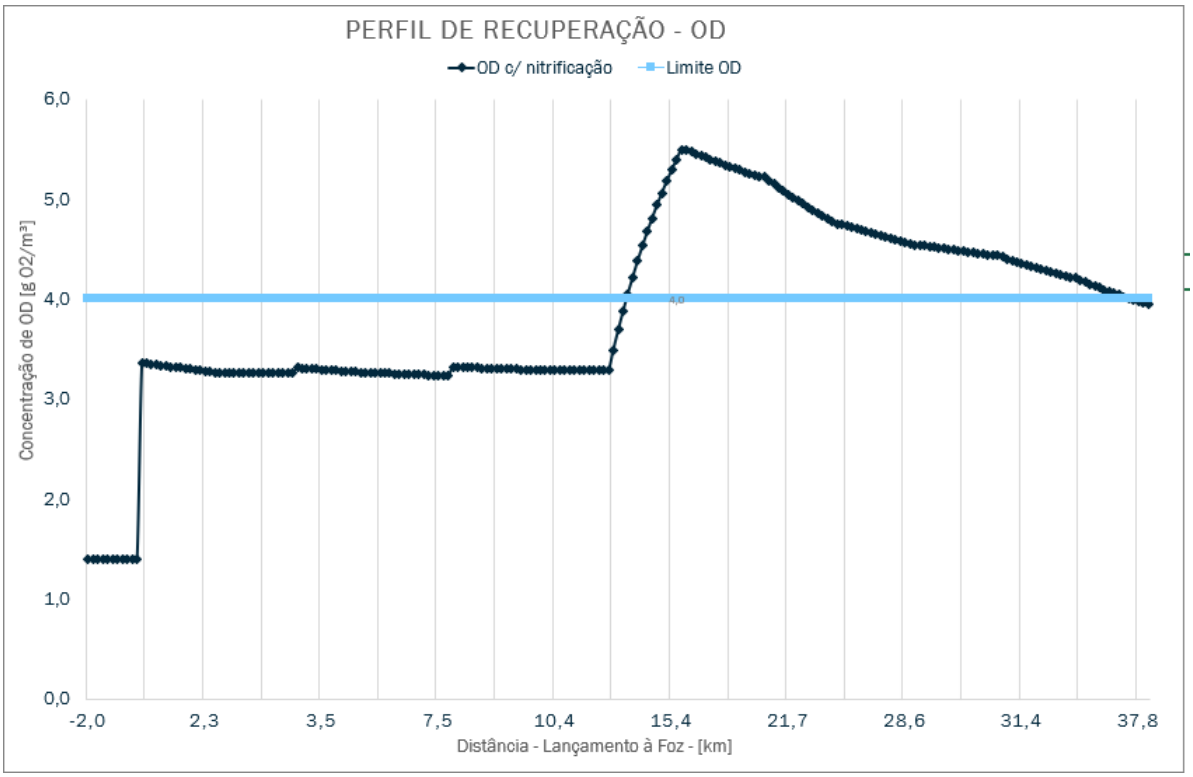
Figura 4 – Perfil Longitudinal de N-NH_4 no Rio Jundiaí considerando a vazão Q_{95} e limite para Classe 3, apenas com a contribuição da ETEJ



Fonte: elaboração própria (2026)

No gráfico de OD (Figura 5), os valores mínimos, embora ainda inferiores ao limite de 4 mg/L, não atingem os níveis mais críticos verificados no cenário com múltiplas fontes. O ponto de menor concentração está em torno de 3,2 mg/L, sendo observado um gradativo aumento a jusante, em virtude da ausência de novas cargas desoxigenantes e da atuação da reaeração natural.

Figura 5 – Perfil Longitudinal de OD no Rio Jundiaí considerando a vazão Q_{95} e limite para Classe 3, apenas com a contribuição da ETEJ



Fonte: elaboração própria (2026)

Embora os valores simulados de N-NH_4 se mantenham abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos d'água de Classe 3 (13,3 g/m³), observa-se uma discrepância em relação aos dados medidos *in loco*. Em 12/05/2025, a concentração de amônia na captação da ETA Indaiatuba foi de 2,5 g/m³, valor consideravelmente inferior ao estimado pelo modelo (5,91 g/m³). Essa diferença pode ser explicada, em parte, pela ocorrência de vazões superiores à Q95 no momento da amostragem, que favoreceram a diluição. No entanto, destaca-se que a CSJ utilizou os resultados do modelo como subsídio para a tomada de decisões estratégicas, entre elas a otimização do processo de tratamento da ETEJ, o que contribuiu diretamente para a redução significativa das concentrações de amônia observadas na captação.

Esses resultados reforçam que o maior comprometimento da qualidade da água ocorre a jusante do ponto de lançamento da ETEJ, em função da contribuição adicional de cargas poluentes oriundas de efluentes industriais e fontes difusas urbanas. A exclusão dessas fontes no cenário simulado promove uma melhora expressiva no perfil de qualidade ao longo do Rio Jundiaí.

DISCUSSÕES

Os resultados das simulações baseadas no modelo QUAL-UFMG evidenciam a vulnerabilidade do trecho do Rio Jundiaí compreendido entre a ETEJ e o ponto de captação da ETA Indaiatuba. Essa vulnerabilidade se intensifica em condições de estiagem (Q95), quando a redução da vazão do rio compromete sua capacidade natural de diluição e autodepuração, resultando em concentrações elevadas de poluentes que afetam diretamente a qualidade da água. A dinâmica do OD é especialmente impactada por esse cenário, uma vez que o excesso de carga orgânica consome o oxigênio disponível e induz episódios de hipóxia, conforme discutido por Flotemersch *et al.* (2015) e Rajwa-Kuligiewicz *et al.* (2015). A criticidade dos níveis de OD (abaixo de 3 mg/L) é responsável pela mortandade de organismos aquáticos e, se persistente, impede a pesca amadora, um dos usos previstos para corpos hídricos de água doce Classe 3 segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005.

A robustez e a aplicabilidade da ferramenta de modelagem foram confirmadas pela sua capacidade de simular múltiplos cenários e isolar variáveis, o que possibilitou a identificação das principais fontes de pressão sobre a qualidade da água em trechos específicos do rio. A flexibilidade do modelo é estratégica para o diagnóstico e planejamento de intervenções, permitindo avaliar medidas como o redirecionamento de efluentes, o aumento da eficiência das estações de tratamento, a eliminação de ligações clandestinas e a adoção de infraestrutura verde voltada ao controle da poluição difusa.

As simulações mostraram que, embora quedas d'água naturais ao longo do curso contribuam para aumentos pontuais nos níveis de OD, esses efeitos são limitados e insuficientes para restaurar padrões adequados de qualidade da água antes dos pontos de captação. Esse comportamento destaca a importância da morfologia fluvial na dinâmica de autodepuração, como sugerem Wahyuningsih *et al.* (2020). Ressalta-se, no entanto, que os dados utilizados para a caracterização geomorfológica do rio baseiam-se em levantamentos de 2005 (Rodrigues, 2005) e podem não refletir alterações recentes no canal, como dragagens, erosões ou ocupações urbanas, o que pode comprometer a precisão das estimativas de reaeração (k_2).

Entre os parâmetros analisados, o $N\text{-}NH_4$ apresenta comportamento crítico. Apesar de estarem abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos de Classe 3 (13,3 g/m³), suas concentrações permanecem persistentemente elevadas na captação, mesmo sob condições de cheia (Qmáx). Nos cenários que consideram todas as fontes de poluição (Tabela 3), o valor de $N\text{-}NH_4$ atinge 7,18 g/m³ em Indaiatuba sob regime de estiagem (Q95), mantendo-se próximo de 6,5 g/m³ mesmo com o aumento da vazão. Isso revela um quadro crônico de aporte amoniacal ao longo do trecho, com implicações negativas para a oxigenação da água, a integridade dos ecossistemas aquáticos e a segurança da água captada.

Nos cenários de simulação considerando exclusivamente a carga efluente da ETEJ (Tabela 4), verifica-se redução modesta nas concentrações de $N\text{-}NH_4$, com valor de 5,91 g/m³, o que indica que fontes difusas e outros lançamentos ao longo do rio exercem influência significativa sobre os níveis de amônia. Os resultados estão alinhados com a literatura, que aponta a baixa eficiência de remoção de $N\text{-}NH_4$ em corpos hídricos urbanos, especialmente em contextos de baixa taxa de reaeração e contínuo lançamento de efluentes. A conversão de áreas vegetadas para uso urbano intensifica o aporte de poluentes aos corpos hídricos receptores, na medida em que a drenagem pluvial urbana passa a transportar cargas de nutrientes superiores. Além disso, o aumento na geração de esgotos domésticos decorrente da urbanização representa uma contribuição expressiva de nitrogênio ao sistema fluvial (von Sperling, 1996).

O excesso de fósforo, mesmo em períodos de maior vazão, favorece a eutrofização, promovendo a proliferação de algas e cianobactérias, o que compromete tanto a biodiversidade quanto a segurança da água destinada ao abastecimento (von Sperling, 1996). Esses indicadores evidenciam a não conformidade com os padrões de qualidade para corpos de Classe 3 e reforçam a urgência de um controle mais eficaz das cargas poluentes, tanto de origem pontual quanto de difusa, a fim de garantir a qualidade dos recursos hídricos em seus múltiplos usos e a segurança ambiental do ecossistema.

A aplicação da ferramenta, que modela processos de autodepuração do Rio Jundiaí, demonstra que esse recurso hídrico enfrenta condições críticas de qualidade da água, evidenciadas pelas elevadas concentrações de $N\text{-}NH_4$ identificadas nos pontos de captação. A presença simultânea de fósforo e coliformes em concentrações elevadas sugere o aporte expressivo de matéria orgânica e de nutrientes ao Rio Jundiaí, comprometendo os processos naturais de autodepuração (von Sperling, 1996). O trecho analisado é fortemente impactado por fontes difusas de poluição, como materiais carreados pela drenagem municipal, ligações clandestinas de esgoto e ocupações urbanas irregulares. Embora existam políticas públicas relevantes, como o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) e os Planos Municipais de Saneamento nos municípios de Jundiaí, Itupeva e Indaiatuba, a efetivação dessas diretrizes ainda é limitada, especialmente em contextos de carência de recursos financeiros e de déficit de planejamento urbano integrado.

Nesse sentido, verifica-se a importância de avanços estruturais no saneamento básico, como as metas estabelecidas pela Lei nº 14.026/2020, que define a universalização do atendimento com coleta e tratamento de esgotos a 90% da população até 2033, e os objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que estabelece como fundamento a preservação da qualidade das águas compatível com os usos preponderantes e a prevenção da degradação dos corpos hídricos.

Além disso, os dados reforçam a necessidade de ações que fortaleçam a governança ambiental, com destaque para a integração entre políticas de saneamento e de ordenamento territorial, a robustez e o cumprimento de planos como o PBH-PCJ, a ampliação dos programas de monitoramento e fiscalização e a implementação de soluções baseadas na natureza. Tais medidas não apenas reduzem as cargas poluentes como também contribuem para a construção de sistemas hídricos urbanos mais resilientes e eficientes.

CONCLUSÕES

A ferramenta computacional desenvolvida neste estudo, fundamentada no modelo de *Streeter-Phelps*, mostrou-se uma solução técnica eficaz, de baixo custo e alta replicabilidade para a avaliação dos impactos de cargas orgânicas sobre a qualidade da água no Rio Jundiaí, especialmente no trecho entre a ETEJ e a captação da ETA de Indaiatuba. Ao permitir a simulação de diferentes cenários hidrológicos e operacionais, a ferramenta oferece subsídios relevantes para a tomada de decisão estratégica e para a atuação institucional da concessionária responsável.

As simulações evidenciaram que, sob vazões mínimas (Q_{95}), o Rio Jundiaí apresenta capacidade limitada de autodepuração, com recorrentes episódios de hipóxia e DBO acima dos limites legais, comprometendo a qualidade da água destinada ao abastecimento público. Embora o lançamento da ETEJ seja um fator relevante, os resultados indicam que a degradação da qualidade hídrica é fortemente agravada por fontes difusas do meio urbano, extravasamentos, tributários contaminados e descargas industriais. Esse cenário de fragilidade é reforçado pelos teores de OD, fósforo e coliformes em desconformidade com os parâmetros esperados para rios de Classe 3 pela Resolução CONAMA nº 357/05, que desenquadram o Rio Jundiaí antes do recebimento do efluente da ETEJ.

Dessa forma, recomenda-se a implementação de ações integradas e multissetoriais, como o controle intensificado das fontes difusas por meio de práticas de manejo urbano sustentável (ex: impermeabilização reduzida, sistemas de captação de águas pluviais), o reforço na operação e ampliação da capacidade das estações de tratamento de esgoto, a melhoria da fiscalização para evitar lançamentos irregulares, além do monitoramento contínuo da qualidade nos principais tributários. Essas estratégias, combinadas, são essenciais para mitigar a poluição e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos na região.

A visualização dos perfis longitudinais de OD e $N\text{-}NH_4$, proporcionou a identificação de zonas críticas e o entendimento da dinâmica espacial dos impactos, gerando informações estratégicas para o planejamento de contingência, operação de sistemas e elaboração de respostas rápidas frente a eventos extremos, como estiagens prolongadas ou aumento inesperado de carga poluidora.

A comparação entre os parâmetros de qualidade da água dos cenários que consideraram ou não as fontes de poluição além do efluente da ETEJ mostrou que essas fontes exercem influência significativa na deterioração da qualidade do Rio Jundiaí, especialmente nos parâmetros de DBO, OD, coliformes totais e, crucialmente, no $N\text{-}NH_4$. Essa análise evidenciou que, apesar do lançamento da estação representar uma proporção significativa da vazão do rio, não é o fator único ou determinante no afastamento da qualidade da água do enquadramento definido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, reforçando a importância do controle das demais fontes poluidoras.

A aplicação do modelo permitiu a visualização gráfica dos perfis de OD e $N\text{-}NH_4$ ao longo do rio, a avaliação do tempo de recuperação após os lançamentos e a identificação de trechos críticos de qualidade da água. A ferramenta, desenvolvida em planilha eletrônica, é de fácil replicação, atualização e adaptação a outros corpos hídricos com características similares e dados disponíveis, demonstrando seu potencial como instrumento de apoio técnico e estratégico para decisões relacionadas à proteção da qualidade da água e ao manejo de cargas poluidoras em bacias hidrográficas com múltiplas demandas.

Contudo, reconhece-se como limitação a ausência de uma caracterização geomorfológica atualizada do trecho analisado, o que pode influenciar diretamente a acurácia dos parâmetros estimados (em especial, k_1, k_2 e k_n) devido à sensibilidade da morfologia fluvial a processos erosivos, dragagens ou ocupação urbana que podem ter modificado as condições descritas no estudo de Rodrigues (2005). Além disso, a majoritária utilização de dados secundários (referências da literatura técnico-científica) pode simplificar a modelagem e, para análises aprofundadas, recomenda-se o refinamento das considerações com base em informações coletadas in loco.

Para aplicação prática, sugere-se monitoramento frequente (idealmente mensal ou bimestral) dos parâmetros indicados, com atenção especial ao N-NH_4. A integração com sistemas de informações geográficas (SIG) pode potencializar o acompanhamento espacial das fontes de poluição e orientar intervenções mais precisas.
Em suma, a ferramenta proposta representa uma alternativa acessível e eficaz para a gestão integrada da qualidade da água, destacando a importância do monitoramento e controle de N-NH_4 para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos na região. Sua implementação deve considerar desafios específicos de cada localidade, como a disponibilidade de dados e infraestrutura técnica, para assegurar resultados robustos e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMORIM, M.L. et al. Cargas Poluentes em Corpos Hídricos do Município de Maceió/AL. Revista DAE, v. 27, n. 39, p. 101-115, 2020. DOI: 10.36659/dae.2020.015. Disponível em: https://daejornal.com.br/revista_dae/article/view/715. Acesso em: 15/05/2026.

2. APRILIA, M.; EFFENDI, H.; HARIYADI, S. *Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in the Ciliwung River, DKI Jakarta Province. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2023. p. 012017.

3. 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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

4. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2022

5. CHAPRA, C. *Environmental Engineering Science and Technology. Upper Saddle River: Prentice Hall*, 1997.

6. COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Relatório Final - Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035. Piracicaba, São Paulo, 2020.

7. DOS RIOS, Comitês de Bacias Hidrográficas. Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035: Plano Diretor de Recursos Hídricos da UPGRH PJ1. 2020.

8. FLECK, J. *et al. Concepts and importance of mathematical modeling of water quality for water resources management*. Revista Ambiência, v. 9, n. 2, p. 27-42, 2013. DOI: 10.5935/ambiencia.2013.03.03. Disponível em: https://www.ambiencia.abc.org.br/especial/202017. Acesso em: 15/05/2026.

9. FLOTEMERSCH, J. E. *et al. A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. River Research and Applications*, v. 32, n. 7, p. 1654-1671, 2016.

10. GONÇALVES, A.M. *et al.* Avaliação espaço-temporal da qualidade da água e simulação de autodepuração na bacia hidrográfica do córrego São Simão, SP. Ambiente e Água - *An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 7, n. 3, p. 1-14, 2012. DOI: 10.4136/ambi-agua.894. Disponível em: https://www.ambi-agua.net/articles/ambientwater.v7_3_13.pdf. Acesso em: 15/05/2026.

11. GRIZZETTI, B.; BOURAOUI, F.; ALOE, A. *Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas. Global Change Biology*, v. 18, n. 2, p. 769-782, 2012.

12. GUEDES, M.A. *et al.* Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000500012. Disponível em:

https://www.scielo.br/j/rbeaa/article/view/220422. Acesso em: 15/05/2026.

13. KATUSIIME, J.; SCHÜTT, B. *Linking land tenure and integrated watershed management—A review. Sustainability*, v. 12, n. 4, p. 1667, 2020.

14. METCALF, L.; EDDY, H.P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2015.

15. POLETTI, D.A.; CUNHA, E.C. O Processo de Autodepuração do Ribeirão Tatu: Modelagem e Simulações. 2017. DOI: 10.5540/03.2017.005.01.0069. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0101978516304126. Acesso em: 15/05/2026.

16. RAJWA-KULIGIEWICZ, A.; BIALIK, R.J.; ROWINSKI, P.M. *Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales. Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 63, n. 4, p. 353, 2015.

17. RAMOS, I.S. *et al.* Qualidade da água: parâmetros e métodos mais utilizados para análise de água de recursos hídricos superficiais. *Holos Environment*, v. 19, n. 2, p. 125-138, 2019. DOI: 10.14295/holos.v19i2.12315. Disponível em: http://www.holosenvironment.com/holos/v19n2/v19n2a8.pdf. Acesso em: 15/05/2026.

18. RODRIGUES, R.B. SSD RB – Sistema de Suporte à Decisão proposto para a gestão quali-quantitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água. 2005. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-16092005-135904/publico/RobertaSSDRB.pdf. Acesso em: 15/05/2026.

19. SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Regionalização Hidrológica (*software* de regionalização). São Paulo: DAEE.