



Proposta de enquadramento transitório e obtenção de vazão de diluição na bacia do rio Piauitinga/SE

Proposal for transitional framing and obtaining dilution flow in the Piauitinga River basin/SE

A. N. dos Santos*; A. P. B. A. Macêdo; R. G. de Souza; M. R. M. Fernandes;
E. H. M. Schneider; J. C. S. Rocha

*Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas, Rua Capitão Benedito Teófilo Otoni,
nº 140, Bairro Treze de Julho, 49020-050, Aracaju, Brasil*

**aline.engamb@outlook.com*

(Recebido em 31 de julho de 2025; aceito em 01 de outubro de 2025)

Este trabalho teve como objetivo principal a elaboração de uma proposta de enquadramento de trechos do rio Piauitinga, localizado no estado de Sergipe. Para isso, foram estimadas as vazões necessárias à diluição de efluentes, com base em simulações realizadas por meio do modelo de qualidade da água QUAL-UFMG. A calibração e o ajuste do modelo foram conduzidos a partir de dados hidrológicos e de qualidade da água obtidos em estações fluviométricas e de monitoramento da qualidade da água, foram levantados os principais usuários da bacia e suas respectivas demandas hídricas. E através da Resolução CONAMA nº 357/2005 e considerando os usos preponderantes mais restritivo na bacia foi proposto um enquadramento transitório. Os resultados obtidos indicaram que o modelo apresentou desempenho satisfatório na calibração nos trechos analisado do rio Piauitinga. As simulações efetuadas de relação ao melhoramento de sistemas de tratamento de efluentes industriais existentes e instalação ETEs para tratamento de efluentes sanitários demonstrou um decréscimo de até 38,2% na concentração de DBO. O estabelecimento de enquadramento transitório para o rio promoveu variações expressivas nas vazões de diluição, atingindo até 98,97% de redução, esse resultado mostra que a definição da classe de enquadramento exerce influência determinante sobre os volumes necessários para atender aos padrões de qualidade, sendo observada ampliação das vazões de diluição à medida que se adotam classes menos restritivas. É importante ressaltar que esse estudo contribui para uma gestão eficiente das bacias hidrográficas auxiliando na tomada de decisões para uso racional da água e a preservação dos ecossistemas.

Palavras-chave: recursos hídricos, qualidade da água, modelagem matemática.

This study had as objective to develop a proposal framing for the water bodies of the Piauitinga River, located in the state of Sergipe, by determining effluent dilution flows using the QUAL-UFMG water quality model. To this end, calibration and adjustment were based on hydrological and water quality data from streamflow and monitoring stations, along with a survey of key basin users and their water demands. Based on CONAMA Resolution nº 357/2005 and considering the most restrictive predominant uses in the basin, a transitional classification was proposed. The results showed satisfactory model performance in the analyzed river segments. Simulations involving improvements to existing industrial effluent treatment systems and the installation of wastewater treatment plants (WWTPs) indicated a reduction of up to 38.2% in BOD concentrations. The transitional classification led to significant variations in dilution flows, with reductions reaching up to 98.97%. These findings demonstrate that the classification category strongly influences the volumes required to meet water quality standards, with dilution flows increasing as less restrictive classes are adopted. This study contributes to efficient watershed management, supporting decision-making for rational water use and ecosystem preservation.

Keywords: water quality, mathematical modelling, water resources.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos as atividades antrópicas têm afetado a quantidade e a qualidade da água, comprometendo a garantia dos recursos hídricos para o presente e as gerações futuras. Atualmente, observa-se uma intensificação da escassez hídrica e dos conflitos relacionados aos usos múltiplos da água, resultado da crescente demanda por esse recurso principalmente em

setores como agricultura e indústria. Segundo relatório da Nações Unidas, um quarto da população mundial enfrenta um estresse hídrico extremamente elevado todos os anos e aproximadamente metade da população mundial, experimentam escassez grave de água durante pelo menos parte do ano [1, 2].

Diante da intensificação da demanda hídrica por diversos setores, torna-se imprescindível que o gerenciamento dos recursos hídricos acompanhe a evolução dinâmica da crescente demanda de água pelos diversos setores. Nesse contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, estabelece como um de seus objetivos fundamentais garantir às gerações presentes e futuras o acesso à água em quantidade e qualidade compatíveis com os usos previstos, conforme disposto no artigo 2º, inciso I da referida legislação [3]. Entre os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos destaca-se o enquadramento dos corpos d'água, cuja finalidade é assegurar padrões de qualidade compatíveis com os usos atuais e futuros. Segundo a resolução CONAMA 357/05, esse instrumento define a classificação dos corpos hídricos e estabelece diretrizes ambientais para o seu enquadramento, incluindo definição de metas progressivas intermediárias e finais de concentração de poluentes visando a sua efetivação [4].

Nesse sentido, através do processo de enquadramento pode-se determinar diferentes classes por trechos em um mesmo corpo hídrico, conforme suas características e usos predominantes. De acordo com a Resolução CNRH nº 91/2005, o enquadramento deve ser considerado na aplicação dos instrumentos de gestão, tais como a outorga de direito de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso da água, o licenciamento ambiental, e demais mecanismos vinculados à gestão integrada dos recursos hídricos e meio ambiente especialmente nos corpos de água superficiais ainda não enquadrados [5]. Dessa forma, o enquadramento possui uma grande relevância na análise da outorga de lançamento do efluente, onde a classe de enquadramento é um dos principais critérios a ser analisado, além da vazão de lançamento, situação atual do trecho do corpo hídrico [6]. Portanto, sem a observância destes fatores há o comprometimento da concessão da outorga de direito de uso para fins de lançamento, uma vez que tal instrumento representa a manifestação da autoridade competente quanto à disponibilidade hídrica necessária para a diluição das concentrações dos parâmetros estabelecidos [7].

Entretanto, com a expansão urbana e consequentemente o crescimento das populações faz-se necessário buscar soluções mais eficientes para o uso dos recursos hídricos, tendo em vista que constantemente enfrentamos a ausência de corpos hídricos com vazão disponível suficiente e qualidade adequada para atender os diversos usos principalmente ao consumo humano e diluição de efluentes [8, 9]. Nesse contexto, a bacia do rio Piauitinga, por exemplo, ao longo dos anos vem sofrendo intensa ocupação humana, mudanças no uso e cobertura do solo impactando diretamente suas águas, resultando em degradação ambiental, como desmatamento das matas ciliares e lançamento de efluentes *in natura*. Diante disso, a aplicação de modelos matemáticos de qualidade da água pode ser considerada uma ferramenta estratégica para subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos visando o seu uso múltiplo, principalmente em relação ao enquadramento e a outorga de lançamento com fins de diluição [10-12].

Este trabalho tem como objetivo principal a elaboração de uma proposta de enquadramento transitório para trechos do rio Piauitinga, localizado no estado de Sergipe, contemplando a determinação das vazões de diluição de efluentes e das vazões disponíveis, bem como simulando cenários hipotéticos por meio da aplicação do modelo de qualidade da água QUAL-UFMG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Piauitinga faz parte da bacia hidrográfica do rio Piauí, situada na região Centro-Sul do estado de Sergipe (Figura 1). Possui uma área de 461,33 km² e inclui os municípios de Estância (36%), Boquim (3%), Itaporanga d'Ajuda (1%), Lagarto (17%) e Salgado (43%). Os recursos hídricos dessa bacia são utilizados principalmente para abastecimentos público e industrial. O abastecimento público atende os municípios de Estância, por meio do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), e as cidades de Lagarto, Simão

Dias, Pedrinhas, Boquim e Riachão do Dantas além de diversas comunidades rurais, por meio do Sistema Integrado de Abastecimento de Água do Piauitinga, operado pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO). O abastecimento industrial ocorre através de captações no rio Piauitinga para suprir um polo industrial localizado na cidade de Estância [13].

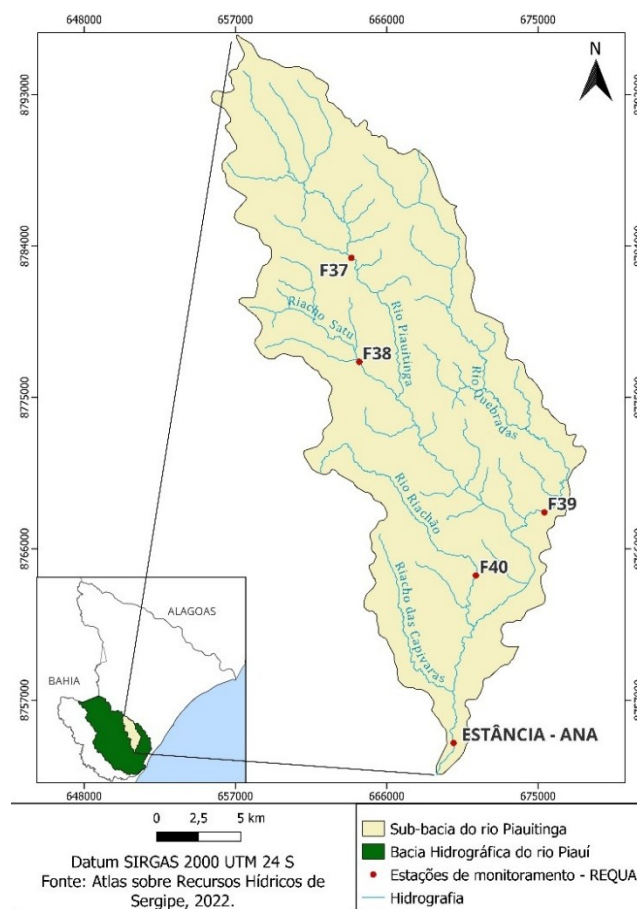


Figura 1. Localização da área de estudo em Sergipe.

A bacia em estudo é predominantemente rural com a população concentrada nas porções intermediária e baixa. A partir dos dados levantados nos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) dos municípios de Estância e Salgado e do cruzamento destes com o mapa de setores populacionais do IBGE, foi identificado agrupamento de manchas urbanas e simplificada a dinâmica de lançamento de efluentes sanitários, especialmente nos municípios de Salgado e Estância, onde há um maior número de pontos de lançamento de esgoto *in natura*. Com base na visita de campo e nos dados dos planos municipais de saneamento básico da bacia hidrográfica estudada, verificou-se que as manchas urbanas dos municípios de Salgado e Estância inseridas na bacia, não há Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) [14, 15].

2.2 Modelagem e enquadramento transitório

Para entender as características ambientais, a situação atual da qualidade da água e os usos para proposição do enquadramento transitório, foram realizadas as seguintes etapas: obtenção de dados secundários de qualidade da água, cadastro e espacialização dos usuários com base cartográfica e estimativa das vazões estatísticas do manancial e das concentrações de poluentes. O agrupamento destas informações possibilitou uma simulação através do modelo matemático de qualidade da água QUAL-UFMG para determinação das classes de enquadramento em trechos do rio Piauitinga.

Para a determinação dos usos preponderantes da água e demanda hídrica na bacia as informações foram obtidas através de dados secundários por meios dos dados cadastrais de usuários solicitantes de outorga e/ou cadastro junto ao órgão gestor de recursos hídricos. Na definição de uso preponderante foram avaliados os usos nos afluentes riacho Grilo, rio Quebradas e rio Riachão. Com base no levantamento das informações da bacia hidrográfica do rio Piauitinga. Os mananciais da bacia foram divididos em trechos, com o objetivo de delimitar zonas de enquadramento, essa segmentação visa preservar as características de cada uso nos trechos. De acordo com o descrito na Tabela 1, a bacia foi dividida em quatro trechos, os quais foram delimitados por meio de coordenadas geográficas permitindo a identificação das zonas de enquadramento ao longo da bacia.

Tabela 1. Distribuição dos trechos para estudo de enquadramento dos corpos de água.

Trecho	Uso da água do trecho	Descrição
T1	Irrigação	Da nascente, nas coordenadas (657.452m E e 8.794.408m N) até as coordenadas (663931m E e 8783292m N).
T2	Abastecimento público	Das coordenadas (663931m E e 8783292m N) até a confluência com o riacho Grilo coordenada (666579m E e 8775022m N).
T3	Irrigação e aquicultura	Das coordenadas (666579m E e 8775022m N) até a confluência com o rio Quebrada coordenada (673419m E e 87766976m N)
T4	Abastecimento público, industrial e irrigação e extração mineral	Da confluência com o rio Quebrada coordenada (673419m E e 87766976m N) até a captação do SAAE Estância coordenadas (669965m E e 8754453m N).
T5	Abastecimento industrial, diluição de efluentes industriais	Da captação do SAAE Estância coordenadas (669965m E e 8754453m N) até o exutório do rio coordenadas (669000,1m E e 8752659,9 m N).

Para estimar a capacidade de autodepuração do rio Piauitinga, foi utilizado o modelo QUAL-UFGM, uma ferramenta computacional adaptada do QUAL2E, originalmente desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), cuja metodologia foi detalhada e discutida por Santos et al. (2024) [16] para o rio Piauitinga. No modelo, foi utilizado adaptações que excluem o módulo de algas, suas interações com os demais constituintes e os efeitos de dispersão longitudinal [11]. No presente estudo, o QUAL-UFGM foi empregado para simular os perfis de Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}) ao longo do curso dos mananciais, considerando o sistema hídrico em regime permanente.

Com base em dados históricos coletados entre 2013 e 2023 das cinco estações de monitoramento de qualidade da água pertencentes à Rede Estadual de Monitoramento de Qualidade das Águas (REQUA), coordenada pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas (SEMACE) foi realizada a avaliação da qualidade da água na bacia hidrográfica em estudo. Na análise, foram selecionados oito parâmetros físico-químicos e microbiológicos que possuem limites estabelecidos na legislação ambiental vigente, conforme disposto na Resolução CONAMA nº 357/2005.

A vazão de referência com 90% de garantia (Q₉₀) para o rio Piauitinga, foi obtida a partir da série de vazões diárias registradas na estação fluviométrica Estância/ANA, a qual se encontra no exutório do rio, para tanto foi utilizado o banco de dados do Agência Nacional de Águas e Saneamento o HIDROWEB, o valor foi determinado através do software HIDRO 1.4 [17]. Já a

Q_{90} a montante do rio foi utilizada a estação fluviométrica DESO-SIP com a série referente a 10/2012 a 08/2014, operada pelo órgão gestor de recursos hídricos. As vazões de referência com 90% de permanência (Q_{90}) para os tributários do rio Piauitinga foram estimadas com base no conceito de descarga específica, que pressupõe a homogeneidade hidrológica entre as bacias ottocodificadas analisadas. Para tal, utilizou-se como referência os dados de vazão registrados na estação fluviométrica Estância, operada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

A eficácia do modelo matemático foi realizada por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS), um índice estatístico amplamente utilizado na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos. O valor ótimo do CNS é igual a 1, indicando perfeita concordância entre os dados observados e simulados. Conforme os critérios estabelecidos por Silva et al. (2008) [18] e Baltokoski et al. (2010) [19], valores de CNS superiores a 0,75 indicam desempenho satisfatório; valores entre 0,36 e 0,75 são considerados aceitáveis; e valores inferiores a 0,36 caracterizam desempenho insatisfatório do modelo.

Para a formulação das propostas de enquadramento dos corpos hídricos da bacia do rio Piauitinga, foram considerados três cenários distintos. O primeiro cenário representa a situação atual, tendo em vista que quando não há enquadramento aprovado os rios são enquadrados como Classe 2 – água doce, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 357/2005. O segundo cenário baseia-se no diagnóstico ambiental da bacia, permitindo a adequação dos usos existentes e a regularização dos usos na bacia, com vistas à compatibilização entre os usos preponderantes e a qualidade da água observada. E o terceiro busca estabelecer uma meta para redução na concentração de DBO dos efluentes lançados na bacia em 5 anos, através da implementação estações de tratamento de efluentes sanitário nos municípios e melhoria na eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes industriais.

2.3 Vazão de diluição

A diluição constitui um processo indispensável para assimilação de poluentes por corpos hídricos. Em rios com baixa vazão a capacidade de diluição será reduzida e os impactos da poluição tendem a ser mais significativos, uma vez que a carga lançada representa uma parcela expressiva em relação ao volume disponível. Por outro lado, em rios com elevada vazão, pequenas descargas de efluentes podem ser assimiladas com menor comprometimento da qualidade da água, desde que respeitados os limites legais e a capacidade de autodepuração do sistema [11].

Nesse sentido, a vazão de diluição corresponde a vazão necessária para a autodepuração do efluente lançado e atingir o padrão de qualidade desejado e para a determinação das vazões de diluição requeridas pelos efluentes lançados nos corpos d'água estudado foi utilizado o estudo de Carvalho et al. (2021) [6], onde as equações foram acrescentadas ao modelo QUAL-UFMG utilizado na modelagem. Esse estudo foi baseado em conceitos e nas equações propostas por Kelman (2000) [20].

A equação da vazão de diluição é um balanço quantitativo (Equação 1) que permite estimar a vazão mínima necessária do corpo hídrico para que o efluente lançado atinja uma concentração de DBO compatível com os padrões de enquadramento estabelecidos para o corpo receptor [20].

$$Q_{dil} = Q_{efl} * \frac{C_{efl} - C_{perm}}{C_{perm} - C_{nat}} \quad (1)$$

Sendo:

Q_{efl} : vazão do efluente;

C_{efl} : concentração do parâmetro selecionado do efluente;

C_{perm} : concentração do parâmetro selecionado permitida;

C_{nat} : concentração do parâmetro selecionado natural.

Além disso, o efluente tratado ao ser lançado constituirá uma vazão indisponível (Q_{ind}) a qual deve ser relacionada à concentração permitida. A “vazão indisponível” será o resultado da soma da vazão de lançamento do efluente com a vazão necessária para diluir a concentração

parâmetro selecionado (Q_{dil}), nesse caso a DBO, assim a vazão indisponível no ponto de lançamento pode ser determinada pela equação a seguir:

$$Q_{ind} = Q_{dil} + Q_{efl} \quad (2)$$

Seguindo descrição de Silva (2008) [18], o balanço qualitativo deve ser realizado através da quantificação em todos os trechos comparando-se a vazão indisponível total do parâmetro de qualidade com a vazão remanescente no corpo hídrico, que resta no curso d'água após todas as captações, lançamentos e outros. Para determinar a variação das vazões de diluição após cada lançamento considerando a capacidade de autodepuração foi inserida nas planilhas em Excel® a Equação 9 proposta por Silva e Monteiro (2004) [21]:

$$Q_{ind} = \frac{(Q_{efl} + Q_{dil}) * C_{perm} * e^{-k_1 \cdot t}}{C_{permn}} \quad (3)$$

Sendo:

Q_{ind} = vazão indisponível no ponto de lançamento (m^3/s);

Q_{efl} = vazão do efluente (em m^3/s);

k_1 = coeficiente de desoxigenação (dia^{-1});

t = tempo de percurso do trecho (dias);

C_{perm} = concentração permitida de DBO para o manancial no trecho onde ocorre o lançamento;

C_{permn} = concentração permitida de DBO no trecho do manancial;

Q_{dil} = vazão de diluição no trecho onde ocorre o lançamento (m^3/s).

Portanto, com base nas equações em questão e nas informações disponíveis sobre vazão e concentração dos efluentes lançados, bem como disponibilidade hídrica para diluição, busca-se estimar a concentração obtida após a diluição. Essa concentração simulada é utilizada como subsídio técnico para a definição da classe de enquadramento do corpo receptor, conforme os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar os dados dos parâmetros selecionados, observou-se que as médias dos 8 parâmetros obtidas no monitoramento de qualidade de água demonstram que a situação atual do rio Piauitinga se aproxima dos padrões de qualidade referentes a classe 4 segundo a Resolução CONAMA (Tabela 2). Verificou-se aumento dos parâmetros Coliformes termotolerantes (CT), Fósforo Total (FT) e Sólidos Dissolvidos Totais (STD), enquanto para Oxigênio Dissolvido (OD) e pH houve pouca variação apresentando valores mínimos e máximos de 5,8 e 7,8 mg/L e 6,7 e 7,5, respectivamente para o ponto DESO-SIP e 6,0 e 7,9 mg/L e 5,7 e 8,0 no ponto ESTÂNCIA-ANA, estações localizadas na região de médio curso e no exutório da bacia, respectivamente.

Tabela 2. Concentrações médias, mínimas e máximas dos parâmetros observados no rio Piauitinga e limites das classes de enquadramento para os parâmetros analisados.

Parâmetro	DESO-SIP			ESTÂNCIA-ANA			Classe		
	Média ± DP	Min	Máx	Média ± DP	Min	Máx	2	3	4
CT (n° NMP/100 mL)	10706,4 ± 19663,5	61,0	79000	54902,7 ± 27401	220,0	94000	≤1000	≤4000	*
DBO _{5,20} (mg/L)	14,9 ± 7,3	3,2	30,7	11,5 ± 4,8	5,4	19,1	≤5	≤10	*
Fósforo total (mg/L)	0,13 ± 0,14	0,01	0,51	0,17 ± 0,16	0,02	0,56	≤0,1	≤0,1	*
Nitrato (mg/L)	1,80 ± 2,69	0,11	11,10	0,58 ± 0,88	0,01	4,02	≤10	≤10	*
OD (mg/L)	7,1 ± 0,5	5,8	7,8	7,2 ± 0,5	6,0	7,9	≥5	≥4	≥2
pH	7,1 ± 0,2	6,7	7,5	7,4 ± 0,5	5,7	8,0	6 a 9	6 a 9	6 a 9
STD (mg/L)	105,8 ± 11,4	78,9	129,0	165 ± 122	46,0	716,0	≤500	≤500	*
Turbidez (NTU)	17,6 ± 12	2,7	51,5	36,6 ± 56,4	6,0	218,3	≤100	≤100	*

*: não há limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Contudo, quando verificado a conformidade dos parâmetros para classe 2 segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 nos dois pontos de monitoramento estudados observou-se que em 80% das amostras os parâmetros Coliformes termotolerantes e $DBO_{5,20}$ estavam acima do limite estabelecido. Já Fósforo total e Nitrato apresentaram desconformidade em mais de 50% das amostras. Em estudos de Berreta-Blanco e Carrasco-Letelier (2021) [22] e Santos e Medeiros (2023) [23] demonstraram que entre os principais fatores para eutrofização de rios estão os lançamentos de efluentes domésticos e industriais com ausência de tratamento terciário, esse efeito eleva a demanda de oxigênio, além da elevação do pH devido aos efluentes das indústrias têxteis podendo comprometer a capacidade de autodepuração do sistema. Além disso, Tesoriero et al. (2024) [24] identificou que o excesso de nutrientes como fósforo e nitrogênio em bacias hidrográficas tem levado a impactos negativos afetando a disponibilidade e qualidade de água e, portanto o uso de abordagens e ferramentas de gestão em bacias podem ser utilizadas para identificar os impactos e auxiliar na realização de ações efetivas para reduções de concentração de nutrientes.

Diante disso, em visitas de campo foi observado que na porção superior do rio principal há alteração na coloração de suas águas, presença de resíduos sólidos e margens com pouca ou nenhuma mata ciliar, já nas proximidades do exutório em área urbana foi identificado lançamentos *in natura*, odor e resíduos sólidos. Em seus afluentes destaca-se extensas áreas de pastagens, além de águas com bastante sedimentos o que pode caracterizar ambiente em intenso processo de erosão pelas atividades antrópicas na área e lançamentos difusos e/ou não licenciados constaram até dezembro de 2024. Na Tabela 3 estão os usuários outorgados referente a captações e lançamentos no leito principal do rio Piauitinga e em seus afluentes.

Tabela 3 - Demanda hídrica atual no manancial em estudo.

Usuário	Tipo de Autorização	Finalidade	Vazão máxima outorgada (m³/h)	Manancial
1	Uso Insignificante	Aquicultura	0,44	Riacho do Garotão
2	Uso Insignificante	Aquicultura	0,50	Rio Sem Nome
3	Uso Insignificante	Aquicultura	1,46	Riacho Tabua
4	Uso Insignificante	Outros usos	1,25	Rio Piauitinga
5	Uso Insignificante	Outros usos	2	Rio Piauitinga
6	Uso Insignificante	Outros usos	2	Rio Calumbí
7	Uso Insignificante	Extração mineral	1,0	Rio Piauitinga
8	Uso Insignificante	Outros usos	2,2	Rio Piauitinga
9	Outorga de Direito de Uso	Irrigação	55	Rio Piauitinga
10	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento industrial	72,4	Rio Piauitinga
11	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento industrial	81	Rio Piauitinga
12	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento público	123	Riacho Grilo
13	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento público	414	Rio Piauitinga
14	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento industrial	30	Rio Piauitinga
15	Outorga de Direito de Uso	Irrigação	190	Rio Piauitinga
16	Outorga de Direito de Uso	Irrigação	18	Riacho Água Branca
17	Outorga de Direito de Uso	Abastecimento público	936	Rio Piauitinga
18	Outorga de Direito de Uso	Lançamento de efluentes	196	Rio Piauitinga
19	Outorga de Direito de Uso	Lançamento de efluentes	3563,5	Rio Piauitinga

Ao analisar as autorizações emitidas pelo órgão gestor de recursos hídricos observou-se que os principais usos preponderantes na bacia são para diluição de efluentes, abastecimento público, irrigação e abastecimento industrial, sendo a diluição de efluentes e abastecimento público corresponde a 92% da demanda hídrica na bacia em estudo (Figura 2).

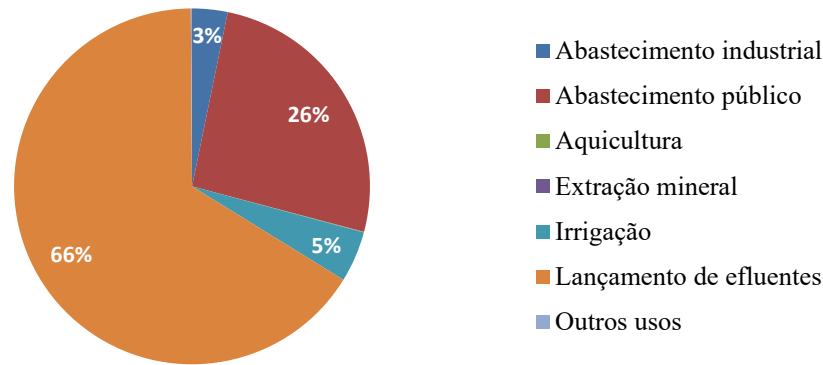


Figura 2. Demanda hídrica na bacia do rio Piauítinga em Sergipe.

3.1 Enquadramento transitório

A partir da modelagem de qualidade da água foi possível simular a situação atual do rio Piauítinga e estabelecer meta em curto prazo para melhoria da qualidade, tendo em vista que atualmente corpo hídrico não possui enquadramento aprovado. Contudo, segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 no art. 42º, estabelece que “enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2, as salinas e salobras classe 1, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente”.

Através dos dados do monitoramento da qualidade e as simulações realizadas pelo modelo de qualidade de água foi possível observar que no cenário atual a qualidade da água do rio Piauítinga não está compatível com classe 2, situação atual da bacia onde não há enquadramento no aprovado em todos os trechos selecionados para estudo. Assim, os trechos T2 e T5 estão classificados em classe 4, pois as concentrações da $DBO_{5,20}$ nesses trechos do corpo hídrico são >10 mg/L de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 (Tabela 4), nos quais estão presentes as áreas urbanas dos municípios de Salgado e Estância, respectivamente. Em trabalho desenvolvido por Ferreira et al. (2021) [25] observou-se que em nascentes do alto curso da bacia hidrográfica do rio Piauítinga as áreas do entorno estão degradadas devido a diversas atividades, destacando-se os usos agrícolas e pecuários.

Tabela 4: Concentrações $DBO_{5,20}$ obtidas nos cenários em diferentes trechos.

Trecho	Concentração máxima $DBO_{5,20}$ (mg/L)		% de redução da DBO
	Cenário atual	Cenário de redução	
T1	5,5	5,5	0,0
T2	26,4	20	24,2
T3	5,1	4,2	17,6
T4	6,0	4,7	21,7
T5	22,0	13,6	38,2

Como pode ser observado no cenário de redução de curto prazo (Tabela 4) o ajuste foi proposto em relação ao limite máximo da $DBO_{5,20}$, um dos principais indicadores de poluição orgânica, principalmente nos perímetros urbanos pertencentes à bacia em estudo, além de ser um parâmetro utilizado nas análises de outorga de direito de uso para fins de diluição de efluentes. Portanto, os valores máximos estimados indicam que o enquadramento transitório permitiria a regularização de usuários já existentes na bacia, através da implementação de redução da concentração dos lançamentos existentes.

Na Figura 3 pode ser visto o enquadramento dos trechos dos mananciais da bacia hidrográfica do rio Piauítinga referente a situação atual da bacia e um cenário com redução da

concentração da $DBO_{5,20}$ dos lançamentos autorizados no rio em curto prazo, onde é possível um grande avanço para a regularização dos usos já existentes na bacia nos trechos T3 e T4 onde há possibilidade de alcance de classe 2 através de maior controle na operação das estações de tratamento de efluentes, além de investimentos em tratamentos com maior eficiência por parte dos usuários da bacia.

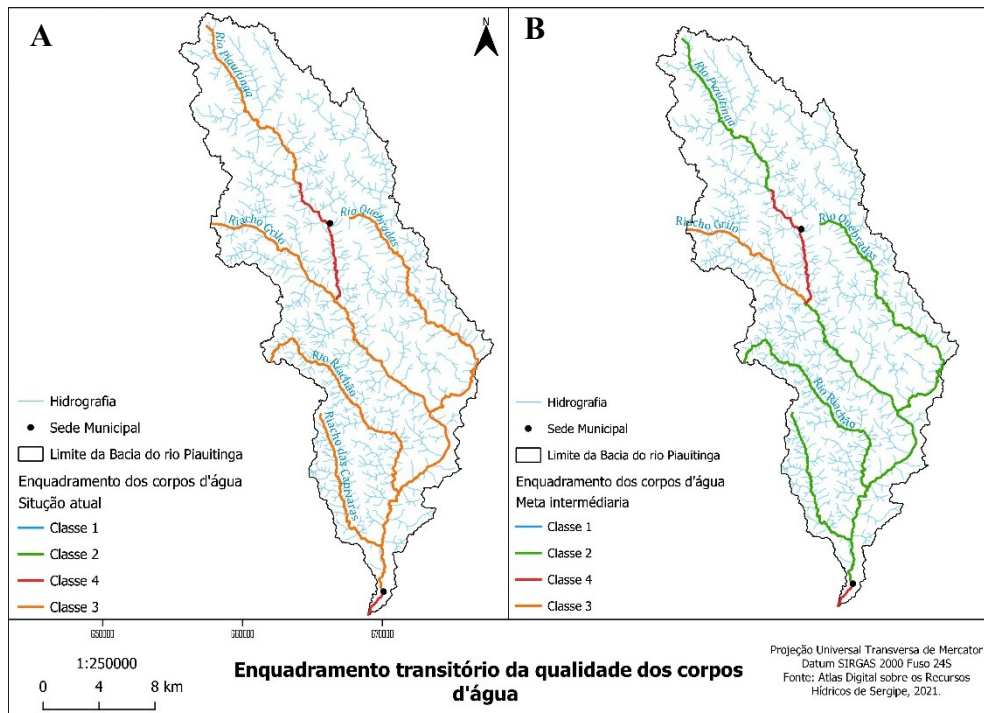


Figura 3: Classes e meta de curto prazo de enquadramento do rio Piauitinga.

As simulações demonstram que após 5 anos um curto prazo para redução da concentração de $DBO_{5,20}$ dos lançamentos e início da implementação de estações de tratamento de efluentes sanitário nas áreas urbanas dos municípios pertencentes a bacia foi possível verificar uma melhora da qualidade da água nos trechos simulados.

3.2 Vazões de diluição

Para verificação das vazões de diluição nos diferentes cenários propostos, as equações de vazão de diluição foram utilizadas. Foi considerando durante a análise todos os lançamentos de efluentes no rio Piauitinga, concentração do efluente e a concentração permitida considerando sua respectiva classe de enquadramento (Classe 2). Ressalta-se que as análises buscaram retratar situações que são influenciadas pelos usos existentes, foi analisado o efeito no rio como um todo.

A Tabela 5 mostra os valores estimados das vazões de diluição, indisponíveis e disponíveis de acordo com as simulações realizadas. O consumo acumulado dos usuários foi estimado pela diferença entre a vazão captada pela vazão de lançamento de efluentes, assim pode ocorrer valores negativos, quando a vazão lançada é superior a captada.

Para os cálculos das vazões de diluição da Equação 1, adotou-se a concentração natural do parâmetro $DBO_{5,20}$ no manancial onde é realizado o lançamento e a concentração atual do parâmetro $DBO_{5,20}$ determinado ponto de lançamento. A concentração atual de DBO é geralmente maior que a concentração natural do rio. Portanto, é possível estimar o impacto qualitativo de cada usuário no manancial, levando em consideração as interferências de outros usuários [26].

Tabela 5 - Vazões de diluição, indisponível e disponível para o cenário atual do rio (classe 2).

Usuário	Qdil (m³/s)	Qind (m³/s)	Qdisp (m³/s)
Lançamento 1	-0,0775	0,0822	0,8428
Lançamento 2	-0,0376	0,0405	0,8023
Lançamento 3	-1,5775	1,5917	-1,1254
Lançamento 4	-0,5506	0,5528	-2,1492
Lançamento 5	-0,1552	0,1592	-2,3309
Lançamento 6	-0,5749	0,5860	-2,9169
Lançamento 7	-0,0271	0,0313	-2,9537
Lançamento 8	-0,0684	0,0768	-3,0666

As vazões de diluição apresentaram valores negativos, significando falta de água para a diluição dos efluentes lançados, e por consequência as vazões disponíveis também se tornam negativa (Figura 4), pois a classe 2 a qual é mais restritiva e consequentemente demanda uma maior quantidade de água para diluir o efluente para atingir a concentração permitida para ser lançada no corpo hídrico. Nesse sentido, a situação atual, com o corpo hídrico enquadrado na classe 2, não há atendimento a todos os usos.

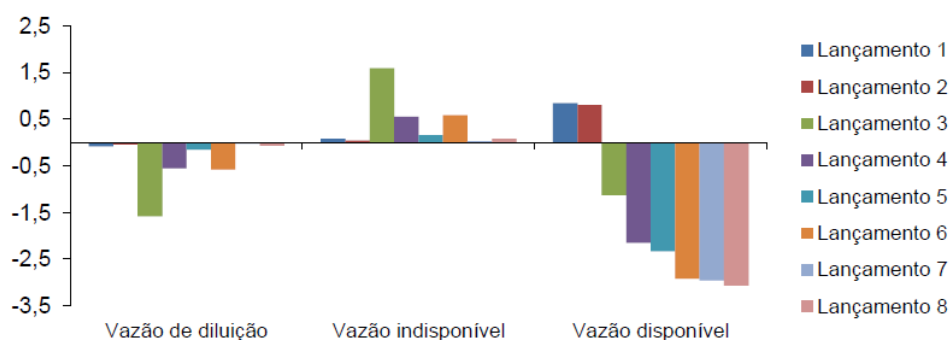


Figura 4 - Vazões de diluição, indisponível e disponível para o cenário atual do rio, segundo Resolução CONAMA nº 357/2005.

Ao analisar o segundo cenário, o qual enquadra transitoriamente o rio considerando o diagnóstico da bacia (Tabela 4) visando à regularização dos usos na bacia. Foram realizados os mesmos cálculos das Equações 1, 2 e 3, e o comportamento das vazões indisponíveis, vazões de diluição e vazões disponíveis ser visto na Figura 5, bem como os valores encontrados para cada lançamento (Tabela 6).

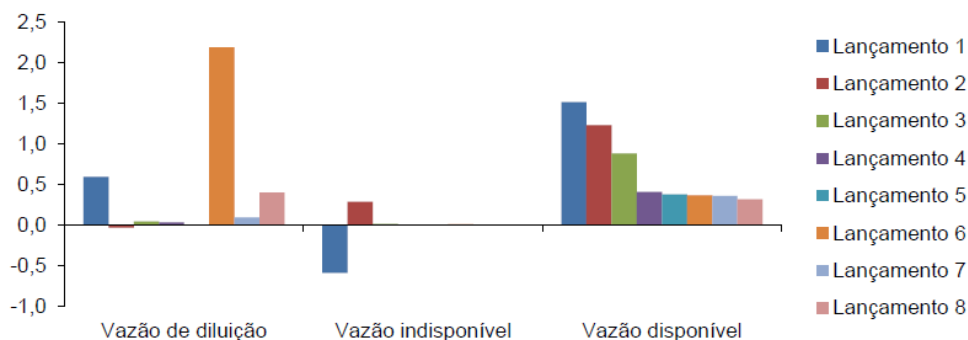


Figura 5 - Vazões de diluição, indisponível e disponível para o cenário atual do rio, enquadramento transitório.

Verificou-se que as vazões de diluições, disponíveis e indisponíveis necessárias para atendimento do parâmetro DBO diminuiu em aproximadamente 89,35%, 69,78% e 98,97% respectivamente. Segundo Silva e Monteiro (2004) [21], a análise do balanço hídrico qualitativo deve ser realizada comparando-se a vazão indisponível de determinado parâmetro e a vazão remanescente no corpo hídrico, a qual permanece disponível após as intervenções como captações, lançamentos. Assim, observou-se que nos pontos onde ocorreram lançamentos os valores de vazão disponível foram negativos, sendo esse comportamento mais frequente em trechos classificados como classe 2, demonstrando que quanto mais restritiva a classe de enquadramento maior o comprometimento da qualidade da água (Tabela 5).

Tabela 6 - Vazões de diluição, indisponível e disponível para o cenário com enquadramento transitório.

Usuário	Qdil (m³/s)	Qind (m³/s)	Qdisp (m³/s)
Lançamento 1	0,5956	-0,5909	1,5159
Lançamento 2	-0,2833	0,2862	1,2297
Lançamento 3	0,0437	0,0141	0,8796
Lançamento 4	0,0318	0,0022	0,4064
Lançamento 5	0,0083	0,0040	0,3799
Lançamento 6	2,1857	0,0111	0,3688
Lançamento 7	0,0939	0,0042	0,3591
Lançamento 8	0,3981	0,0083	0,3147

Nos estudos de vazão de diluição, a classe de enquadramento possui grande influência no cálculo, tendo em vista que essa é a vazão necessária que o corpo hídrico necessita para atingir a classe que o manancial está enquadrado. Portanto, quanto menor a concentração de DBO permitida, ou seja, mais restritiva a classe do corpo d'água, maior será a vazão de diluição utilizada no rio para atingir a classe de enquadramento. Como pode ser observado na Tabela 6, após o enquadramento dos corpos d'água em algum trecho a vazão disponível foi inferior a requerida para diluição do efluente nesses casos, deve-se buscar alternativas para redução da carga poluidora ou selecionar outra bacia mais próxima com disponibilidade hídrica para o lançamento. Santos et al. (2024) [16] demonstrou que devido os lançamentos de efluentes sucessivos nas proximidades do exutório do rio Piauitinga os valores de DBO estavam acima dos limites legais, isso pode ocorrer devido à alta concentração dos efluentes lançados e a proximidade entre os pontos de lançamento, o que pode ocasionar uma redução do efeito do processo autodepuração nesse trecho.

Nesse contexto, estudos como de Carvalho et al. 2021 e Rodrigues et al. 2022 [6, 27] demonstram a importância da modelagem da qualidade da água, enquadramento dos corpos de água, com destaque para a identificação e quantificação do impacto dos lançamentos de efluentes em corpos hídricos são essenciais para auxiliar na tomada de decisão voltadas a gestão da qualidade da água, bem como na definição de ações prioritárias em bacias hidrográficas.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo utilizou-se a análise da autodepuração do rio Piauitinga, levantamento de cargas poluidoras pontuais, para propor o enquadramento dos corpos de água e buscar alocar as vazões de diluição de maneira otimizada considerando a classe de enquadramento do corpo hídrico.

A calibração adotada para esse modelo mostrou-se satisfatória para os valores de DBO e OD. A proposição do enquadramento resultou em redução das vazões de diluição e além de auxiliar na regularização de usuários de água já existentes na bacia, o qual não teve como objetivo permitir a entrada de novos. Para regularização dos usuários na bacia o enquadramento permitirá estabelecimento de metas progressivas por meio do instrumento outorga com o objetivo de alcançar a melhoria da qualidade hídrica da bacia em médio e longo prazo. Porém, para atingir esse objetivo como foi observado faz-se necessário investimentos de infraestrutura,

principalmente em saneamento básico, caso contrário não será possível atingir as metas estabelecidas ou qualquer ato de regularização a ser aprovado na bacia. Portanto, o enquadramento proposto busca contribuir com impactos positivos para a gestão das águas e ampliar a discussão sobre a situação atual da bacia, além de intensificar ações para a melhoria da qualidade da água.

Nesse sentido, é muito importante destacar o papel do enquadramento na outorga de lançamento de efluentes pois esse instrumento possui diversos desafios ao ser aplicada, pois necessitam de investimentos dos usuários em sistemas de tratamento para redução da concentração do poluente para que a concentração a ser lançada alcance padrões de qualidade permitidos pela legislação a partir do enquadramento. De acordo com as condições simuladas nesse trabalho, o aprimoramento das considerações iniciais utilizadas para cada cenário de lançamento é de extrema importância para a determinação das vazões de diluição, que consequentemente poderá influenciar na disponibilidade hídrica do rio em estudo. Diante disso, novas análises continuarão a ser realizadas nesta bacia para fornecer cada vez mais informações relevantes para o gerenciamento da bacia.

5. AGRADECIMENTOS

À Secretaria do Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas (SEMACE/SE), e à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) pelo apoio institucional e financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. United Nations. The United Nations World Water Development Report 2025: Mountains and Glaciers: Water Towers. Paris: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, (UNESCO); 2025. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000393070>.
2. Jones ER, Bierkens MFP, van Vliet MTH. Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality. *Nat Clim Chang*. 2024 May;14:629-35. doi: 10.1038/s41558-024-02007-0
3. Brasil. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (...). Brasília (DF): Diário Oficial da União; 9 jan 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.
4. Brasil. Resolução CONAMA 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. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2005. Disponível em: <https://share.google/uyV5w0ExMDlgNhB1I>
5. Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 91, de 5 de novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Brasília (DF): Diário Oficial da União, 2009. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2091.pdf>.
6. Carvalho VR, Gonçalves JAC, Couto EA. Obtenção de vazão de diluição de efluentes utilizando o modelo de qualidade de água QUAL-UFGM. *Rev Ibero Americana Ciênc Amb*. 2021 Abr;12(4):737-53. doi: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0056
7. Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 140, de 21 de março de 2012. Estabelece critérios gerais para outorga de lançamento de efluentes com fins de diluição em corpos de água superficiais. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 22 ago 2012. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20140.pdf>.
8. Wang M, Bodirsky BL, Rijneveld R, Beier F, Bak MP, Batool M, et al. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nat Commun*. 2024 Feb;15:880. doi: 10.1038/s41467-024-44947-3
9. Yusof FM, Jamil NR, Sapia'e S, Ata FM, Abdul Malik NK. Integration of Total Maximum Daily Load (TMDL) and Environmental Flow Assessment (EFA) concepts as an adaptive approach to pollutant loading management in Asia: a review. *Pertanika J Sci Technol*. 2025 Jan;33(1):507-23. doi: 10.47836/pjst.33.1.23

10. da Silva Junior LCS, de Azevedo JPS. Influência do saneamento na qualidade de água em rios: uma análise através da modelagem de qualidade de água. *MIX Sustentável*. 2022 Jan;8(1):41-52. doi: 10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n1.41-52
11. von Sperling M. Estudos e Modelagem da qualidade da água dos rios. 2. ed. Belo Horizonte (MG): Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
12. Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Klove KA. A continental-scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J Hydrol*. 2015 Mar;524:733-52. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
13. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas (SEMACE). SERhidro GEO - Banco de dados cartográficos digital sobre recursos hídricos de Sergipe; [citado em 2 jan 2025]. Disponível em: serhidro-semace.hub.arcgis.com.
14. Estância (SE). Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB): Produto nº 6 Relatório Final do PMSB. Estância (SE): Prefeitura Municipal da Estância; 2015.
15. Salgado (SE). Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) Salgado - Sergipe: Relatório final. Salgado (SE): Prefeitura Municipal da Salgado; 2017.
16. Santos AN, Macedo APAB, Souza RG, Fernandes MRM, Silva WTC, Schneider EHM, et al. Aplicação integrada da modelagem da qualidade da água e das curvas de permanência de qualidade como ferramenta para a gestão de recursos hídricos na bacia do rio Piauítinga, em Sergipe. *Sci Plena*. 2024;20(8):089914. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089914
17. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Brasília (DF): ANA; [citado em 2 jan 2025]. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>
18. Silva PMO, Mello CR, Silva, AM, Coelho G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *Rev Bras Eng Agríc Amb*. 2008 Jun;12(3):258-65.
19. Baltokoski V, Tavares MHF, Machado RE, de Oliveira MP. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). *Rev Bras Ciênc Solo*. 2010 Fev;34(1):253-61. doi: 10.1590/S0100-06832010000100026
20. Kelman J. Outorga e cobrança de recursos hídricos. In: Thame ACM, organizador. A cobrança pelo uso da água. São Paulo: IQUAL; 2000. p. 93-113.
21. Silva LMC, Monteiro RA. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: Uma das possíveis abordagens. In: Machado CJS, organizador. Gestão de águas doces. Rio de Janeiro: Editora Interciência; 2004. p. 135-78.
22. Beretta-Blanco A, Carrasco-Letelier L. Relevant factors in the eutrophication of the Uruguay River and the Río Negro. *Sci Total Environ*. 2021 Mar;761:143299. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143299
23. Santos EO, Medeiros PRP. Anthropogenic action and the eutrophication process in the Paraíba do Meio River. *Soc Nat*. 2023;35:e66441. doi: 10.14393/SN-v35-2023-66441x
24. Tesoriero AJ, Robertson DM, Green CT, Böhlke JK, Harvey JW, Qi SL. Prioritizing river basins for nutrient studies. *Environ Monit Assess*. 2024;196:248. doi: 10.1007/s10661-023-12266-7
25. Ferreira RA, Nascimento MIC, Gama DC, Santos TIS, de Oliveira DG, da Silva AJ, de Mello AA. Vegetation aspects and conservation status of Piauítinga river springs, Sergipe-Brazil. *Adv For Sci*. 2021 Dez;8(4):1591-603. doi: 10.34062/afs.v8i4.9699
26. Drolc A, Koncan JZ. Calibration of QUAL2E model for the Sava River (Slovenia). *Water Sci Technol*. 2000 Abr;40(10):111-8. doi: 10.1016/S0273-1223(99)00681-2
27. Rodrigues MB, Reis JAT, Sá GLN, Almeida KN, Mendonça ASF. Perspectivas para revisão do enquadramento da bacia hidrográfica do Rio Benevente pelo emprego de curva de permanência e modelagem da qualidade da água. *Eng Sanit Ambient*. 2022 Jul-Aug;27(4):831-4. doi: 10.1590/S1413-415220210295