

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **MODELAGEM ESPACIAL DA QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTE SIG: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO PLUGIN QUALPY**

*Murilo Brazzali Rodrigues<sup>1</sup>; Mino Viana Sorribas<sup>2</sup>; Diogo Costa Buarque<sup>3</sup>; José Antonio Tosta dos Reis<sup>4</sup>; Lizandra Broseghini Föeger<sup>5</sup>; Geraldo André Rosseto Barreto<sup>6</sup> & Fabrício Raig Dias Lima<sup>7</sup>*

**Abstract:** This article presents the development of QualPy, a plugin for QGIS software that integrates the equations of the QUAL-UFMG model into a Geographic Information System (GIS) environment. The tool allows water quality modeling to be carried out in a distributed way in any watercourse, based on the automatic delimitation of rivers and river basins, making the process more agile and spatially distributed. Implemented in Python, QualPy allows adjustments to be made to the criteria for defining hydraulic variables and kinetic coefficients. The application in the Doce River basin, used as a case study, involved simulating the parameters BOD, DO, total nitrogen and its fractions, total phosphorus and its fractions, as well as coliforms. In the case study, the optimization functionality was employed in response to the anaerobic conditions identified in some stretches. QualPy makes it possible to compare simulated and monitored data, facilitating the validation of results and the identification of critical points. The conclusion is that QualPy is an accessible tool, capable of making a significant contribution to water resource management and to planning pollution control actions and improving sanitation conditions.

**Resumo:** O presente artigo apresenta o desenvolvimento do QualPy, um plugin para o software QGIS que integra as equações do modelo QUAL-UFMG em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A ferramenta permite realizar a modelagem da qualidade da água de forma distribuída em qualquer curso d'água, a partir da delimitação automática de rios e bacias hidrográficas, tornando o processo mais ágil e espacialmente distribuído. Implementado em linguagem Python, o QualPy possibilita ajustes nos critérios para definição de variáveis hidráulicas e coeficientes cinéticos. A aplicação na bacia do rio Doce, utilizada como estudo de caso, envolveu a simulação dos parâmetros DBO, OD, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações, além de coliformes. No estudo de caso, a funcionalidade de otimização foi empregada em resposta às condições de anaerobiose identificadas em alguns trechos. O QualPy permite comparar dados simulados e monitorados, facilitando a validação dos resultados e a identificação de pontos críticos. Conclui-se que o QualPy é uma ferramenta acessível, capaz de contribuir significativamente para a gestão dos recursos hídricos e para o planejamento de ações de controle de poluição e de melhoria das condições de saneamento.

**Palavras-Chave** – QGIS, QUAL-UFMG, Qualidade da água.

1) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (murilo.b.rodrigues@ufes.br)

2) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES; Núcleo de Análises Ambientais, Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento, Caracica-ES (mino.sorribas@gmail.com)

3) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (diogo.buarque@ufes.br))

4) Lamorh, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (jatreis@gmail.com))

5) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (lizandrabf@gmail.com)

6) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (gandrebarreto@hotmail.com)

7) Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (fabricioraigdiaslima@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

A qualidade da água é essencial para promoção da saúde pública, preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável (Conte, 2021). No Brasil, a Política Nacional dos Recursos Hídricos estabelece como um dos seus objetivos garantir a disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respetivos usos, para as atuais e futuras gerações (BRASIL, 1997). No entanto, o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento é apontado como a principal causa de degradação da qualidade da água dos rios brasileiros (Conte, 2021; ANA, 2017).

Como contraponto a esse cenário, a Lei N° 14026, editada em 15 de julho de 2020, que atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico, estabelece que 99% da população deve ter acesso a água potável e 90% da população deve ter acesso a coleta e tratamento de esgoto até o fim de 2033 (BRASIL, 2020). Porém, dados recentes do Instituto Trata Brasil indicam que cerca de 52,2% do esgoto gerado no país é efetivamente tratado (Instituto Trata Brasil, 2024). Essa realidade agrava a poluição dos recursos hídricos e compromete a qualidade da água, impactando a saúde e bem-estar da população.

Nesse contexto, considerando a situação atual do tratamento de esgoto no Brasil, a utilização de ferramentas como os modelos matemáticos de qualidade da água ganha relevância. Estes modelos permitem avaliar não só situação atual, mas principalmente a situação futura da qualidade da água devido ao aumento ou redução das fontes de poluição (Fleck, Tavares e Eyng, 2013).

Entre os diversos modelos disponíveis, destaca-se o modelo QUAL-UFMG (Von Sperling, 2007) que é uma adaptação em Excel do modelo de qualidade da água QUAL2E, desenvolvido pela USEPA. O QUAL2E é um modelo unidimensional de regime permanente não uniforme, que simula a qualidade da água em rios por meio dos processos de advecção e dispersão na direção do fluxo principal. Ele considera múltiplas fontes poluidoras, captações e tributários, podendo modelar até 15 variáveis de qualidade da água. O QUAL-UFMG divide o rio em segmentos de mesmo comprimento, calculando o balanço de massa e incremento de vazão para cada segmento modelado, permitindo a simulação espacial e temporal da qualidade da água. O modelo QUAL-UFMG permite simular demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações, e coliformes termotolerantes. Ele incorpora diversos processos que afetam o oxigênio dissolvido, como desoxigenação, reaeração, sedimentação, nitrificação, fotossíntese, respiração e demanda do sedimento. Se desconsiderada a influência de algas, os resultados do QUAL-UFMG são equivalentes aos do QUAL2E. Equacionamento do modelo QUAL-UFMG e suas limitações estão detalhadamente disponíveis em Von Sperling (2007).

Modelos, como o QUAL-UFMG, podem auxiliar os gestores na tomada de decisões ambientais e sanitárias, além de também poderem indicar eficiências mínimas para o tratamento de efluentes que atendam aos padrões de qualidade adequados aos usos que fazem da água em determinado trecho de um curso d'água. O modelo QUAL-UFMG, destaca-se por sua robustez e aplicabilidade em diferentes bacias hidrográficas e estudos técnico-científicos como Costa e Teixeira (2015) e Lima, Mamede e Lima Neto (2018), dentre muitos outros.

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma interface desenvolvida para o software QGIS, que incorpora as equações modelo QUAL-UFMG como um plugin denominado QualPy. O QualPy possibilita a modelagem da qualidade da água em qualquer curso d'água definido a partir da delimitação automática de rios, tornando o processo de modelagem mais rápido e distribuído a toda a bacia hidrográfica.

## METODOLOGIA

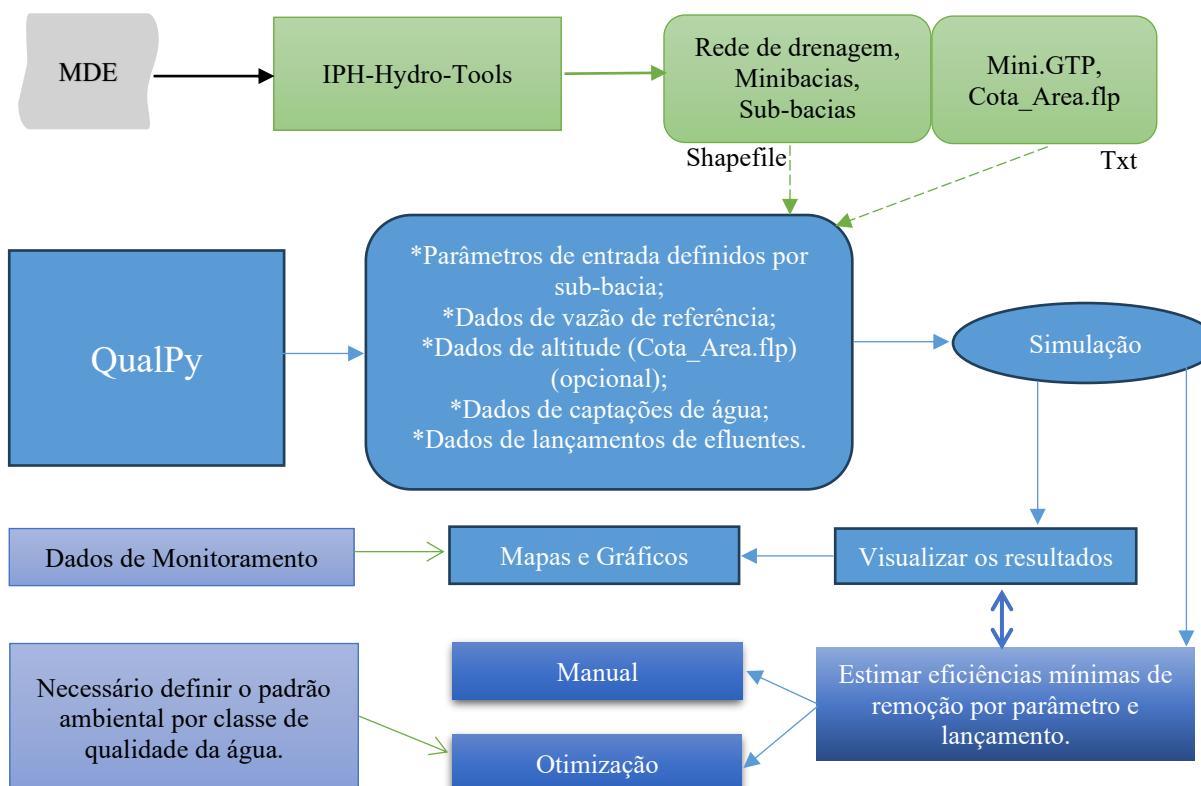
### MODELO QUALPY

O modelo QualPy, desenvolvido em linguagem Python, reproduz em ambiente SIG as equações do modelo QUAL-UFMG. No entanto, o QualPy permite escolhas adicionais na determinação de variáveis hidráulicas e coeficientes cinéticos. Ainda assim, se escolhidas as mesmas configurações do QUAL-UFMG, os resultados do QualPy devem reproduzir aqueles do modelo de origem – é relevante observar que no QualPy, os segmentos de rio possuem tamanhos aproximados, dificilmente iguais como no Qual-UFMG.

Nesse contexto, o QualPy utiliza o arquivo vetorial da drenagem segmentada em elementos de tamanho aproximado ( $\leq 1\text{km}$ ) e informações topológicas de bacias hidrográficas para a simulação e exibição espacial. Dados de lançamentos e retiradas/captações são identificados em função de sua localização geográfica sobre a área de drenagem de cada trecho segmentado da rede de drenagem (minibacias). Demais dados do modelo, informações de qualidade e coeficientes cinéticos são definidos por sub-bacia.

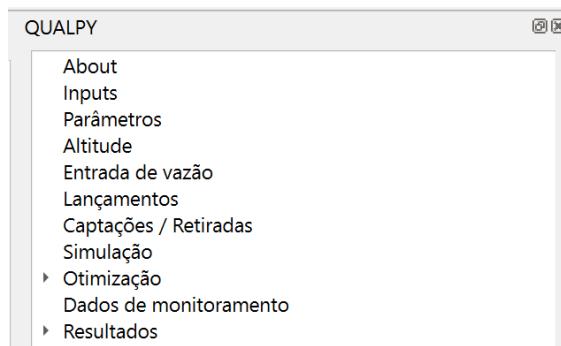
A figura 1 apresenta o procedimento clássico de aplicação do plugin do QualPy. Inicialmente, é necessário realizar processamento topográfico da bacia hidrográfica utilizando modelo digital de elevação para posterior simulação da qualidade da água.

Figura 1 – Procedimento padrão para aplicação do QualPy em uma bacia hidrográfica.



A interface do QualPy apresentada na figura 2, por sua vez, reúne as funções para obtenção dos dados de entrada para a simulação de qualidade da água, são elas:

Figura 2 – Recorte da interface do QualPy no QGIS.



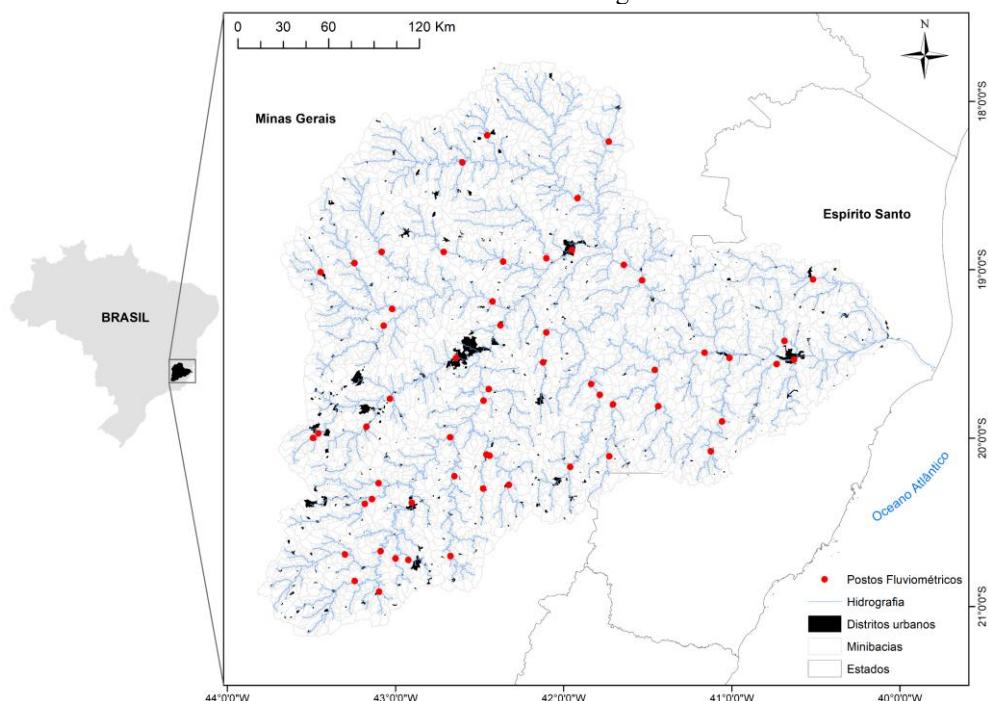
- Inputs: os inputs iniciais do modelo são os *shapefiles* de drenagem, minibacias e o arquivo Mini.gtp, que reúne as informações topológicas da bacia que serão transferidas para os arquivos *shapefiles*. O Campo ‘CatID’ do Mini.gtp será usado para fazer referência aos campos ID ou DN dos *shapefiles* de drenagem e minibacias obtidos das conversões *rasters* para *shapefiles* pelo IPH-Hydro Tools (Siqueira *et al.* 2016) ou ferramenta equivalente do próprio QGIS. Demais inputs, referem-se aos arquivos de lançamentos e retiradas/captações. Esses podem ser criados em branco ou carregados se já existentes. Também é possível carregar os *shapefiles* já processados anteriormente para visualização de resultados ou continuidade dos processamentos necessários;
- Parâmetros: arquivo em formato previamente definido pelo QualPy que contém os dados do modelo definidos por sub-bacia. Entre os dados encontram-se os dados de qualidade de água de cabeceira dos rios, classe de enquadramento, altitude, parâmetros das equações potenciais para estimar a velocidade e profundidade em função da vazão e todos os demais parâmetros relacionados a cinética reacional do modelo;
- Altitude: opção adicional para incluir dados de altitude por segmento de curso d’água, utilizando os dados de altitude do arquivo ‘Cota\_Area.flp’ obtido do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE). Esta etapa irá subscrever os dados de altitude fornecidos pelo arquivo de Parâmetros e vice-versa;
- Entrada de dados de vazão: permite a escolha entre três métodos diferentes – distribuição uniforme da vazão de referência informada em função da área de drenagem; distribuição uniforme da vazão de referência informada em função da rede de drenagem e; carregamento de arquivo com as vazões unitárias por trecho de drenagem em formato previamente definido pelo QualPy;
- Lançamentos: arquivo em formato previamente definido pelo QualPy que contém as coordenadas e demais dados do lançamento. As coordenadas serão usadas para criar uma interseção com o arquivo de minibacias para identificar o código da minibacia alvo do lançamento. Inclui ainda uma coluna ‘Otimizacao’ que permite ativar (valor “1”) ou desativar (valor “0”) a otimização automática de eficiências de remoção dos poluentes simulados, se desejável;
- Captações/Retiradas: arquivo em formato previamente definido pelo QualPy que contém as coordenadas e dados de captações de água. A identificação do trecho alvo da demanda hídrica é realizada da mesma forma que nos lançamentos;
- Simulação: definição final dos dados de simulação e escolha entre métodos para estimativa de variáveis como profundidade, largura, coeficientes de reaeração, desoxigenação e decomposição. Permite ainda seleção de diretório para salvar todos os resultados intermediários do modelo;

- Otimização: permite modificar os padrões ambientais definidos por classe de enquadramento e parâmetro de análise e exibe informações sobre a possibilidade de definir manualmente eficiências de tratamento por parâmetro e lançamento. Adicionalmente, permite otimizar a determinação de eficiências mínimas de remoção por lançamento (Otimizacao =1) e parâmetro de análise, considerando a classe de qualidade e o valor do pH (nitrogênio amoniacal) por trecho. Os lançamentos são otimizados de montante para jusante;
- Dados de monitoramento: arquivo em formato previamente definido pelo QualPy que contém as coordenadas das estações e os dados de qualidade da água. A identificação da minibacia correspondente é realizada de forma automática em função das coordenadas;
- Resultados: permite visualização dos mapas de concentração dos parâmetros com limites ambientais definidos por classe de enquadramento, além de permitir a visualização gráfica, com possibilidade de incluir os dados de monitoramento facilitando ajustes do modelo.

## ESTUDO DE CASO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

A bacia hidrográfica do rio Doce (figura 3) foi escolhida como estudo de caso para a aplicação do plugin QualPy devido à sua relevância ambiental, social e econômica. Localizada na Região Sudeste do Brasil, a bacia possui uma área de drenagem aproximada de 86.000 km<sup>2</sup>, abrangendo 228 municípios distribuídos entre os estados de Minas Gerais (86% da área) e Espírito Santo (14%). A bacia é marcada por atividades econômicas diversificadas, incluindo agricultura, indústria siderúrgica, mineração e geração de energia elétrica, além de ser receptora de efluentes urbanos e industriais (ENGECORPS ENGENHARIA, 2021).

Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Doce e identificação das estações fluviométricas utilizadas, assim como as minibacias e trechos de drenagem associados.



Inicialmente, a bacia do rio Doce foi discretizada por meio da manipulação de MDE com o auxílio do plugin IPH-Hydro Tools, o que permitiu a obtenção dos dados topológicos da bacia (Mini.GTP, Cota\_Area.flp), bem como dos shapefiles de drenagem, sub-bacias e minibacias (área de drenagem de cada trecho de drenagem). Foi adotado o MDE com resolução espacial de 30 metros disponibilizado pelo programa Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model

(COP-DEM) (ESA, 2025). Foram utilizadas as relações geomorfológicas para estimar a profundidade e largura em função da área de drenagem propostas para a área de estudo por Fagundes *et al.* (2017). Ao todo, foram definidos 13.333 trechos de drenagem (e minibacias associadas) de aproximadamente 1km e 58 sub-bacias.

Para estimar a população urbana por distrito, foram utilizados os dados do Censo 2022 (IBGE, 2022). Nos casos em que o setor censitário não estava totalmente inserido na bacia, a população foi distribuída uniformemente, calculando-se a população proporcional à área do setor dentro da bacia delimitada. A partir das taxas médias de crescimento populacional por município (IBGE, 2022), também fornecidas pelo Censo 2022, foi projetada a população para o ano de 2025, ano de referência para as simulações. Nessa aplicação, foram considerados apenas os lançamentos de efluentes domésticos produzidos pela população urbana inserida na delimitação da bacia do rio Doce, conforme figura 3.

De acordo com dados publicados no ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA, 2019), existem ao menos 108 estações de tratamento de esgoto (ETE) na área da bacia do rio Doce delimitada na figura 3. Em relação a distribuição entre os estados, 50 delas estão localizadas no Espírito Santo e 58 em Minas Gerais. Adicionalmente, dados da revisão e atualização do plano integrado da bacia do rio Doce (PIRH) indicam que cerca de 68% do esgoto doméstico produzido pela população da bacia não é tratado, mas lançado diretamente nos corpos d'água (ENGECORPS ENGENHARIA, 2021). Dado o contexto do tratamento de esgoto na bacia, no presente trabalho todos os efluentes urbanos foram considerados como lançamentos brutos no centroide da mancha urbana.

Dados de disponibilidade hídrica da bacia em condições de vazão de referência ( $Q_{90}$ ) foram obtidos de AGEDOCE (2023), com vazão estimada em  $291,65 \text{ m}^3/\text{s}$ , distribuída, dentre as opções do modelo QualPy, uniformemente na bacia em função da área de drenagem. As captações para abastecimento urbano foram estimadas em função do consumo per capita de água (QPC) disponibilizado no SNIS referente ao ano de 2022 (BRASIL, 2023). Vazões de lançamento foram consideradas como 80% da vazão de captação. Para as concentrações brutas dos efluentes foram adotadas as concentrações típicas propostas por Von Sperling (2005).

Para a parametrização hidráulica do modelo, com possibilidade de ser variável por sub-bacia, funções potenciais relacionando a vazão à velocidade foram obtidas a partir de dados de 58 estações fluviométricas distribuídas ao longo da bacia do rio Doce obtidas por meio do Hidroweb. Além disso, dados de qualidade da água para o período seco (abril a setembro), período em que ocorrem as vazões mínimas, foram utilizados para a visualização dos resultados do monitoramento e da modelagem. Também foram adotados os dados de monitoramento da qualidade das águas superficiais do estado de Minas Gerais disponibilizadas pelo Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) referentes ao 3º trimestre (IGAM, 2025). Para os demais parâmetros do modelo QualPy, incluindo a cinética reacional e as condições de qualidade da água das cabeceiras dos rios, neste exemplo de aplicação, foram mantidos os *Default* do modelo.

Assim, foram simulados os parâmetros DBO, OD, Nitrogênio total e suas frações, Fósforo total e suas frações e coliformes. Foram definidas ainda eficiências mínimas de remoção para atendimento das condições de qualidade da classe 2 de enquadramento (BRASIL, 2005).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

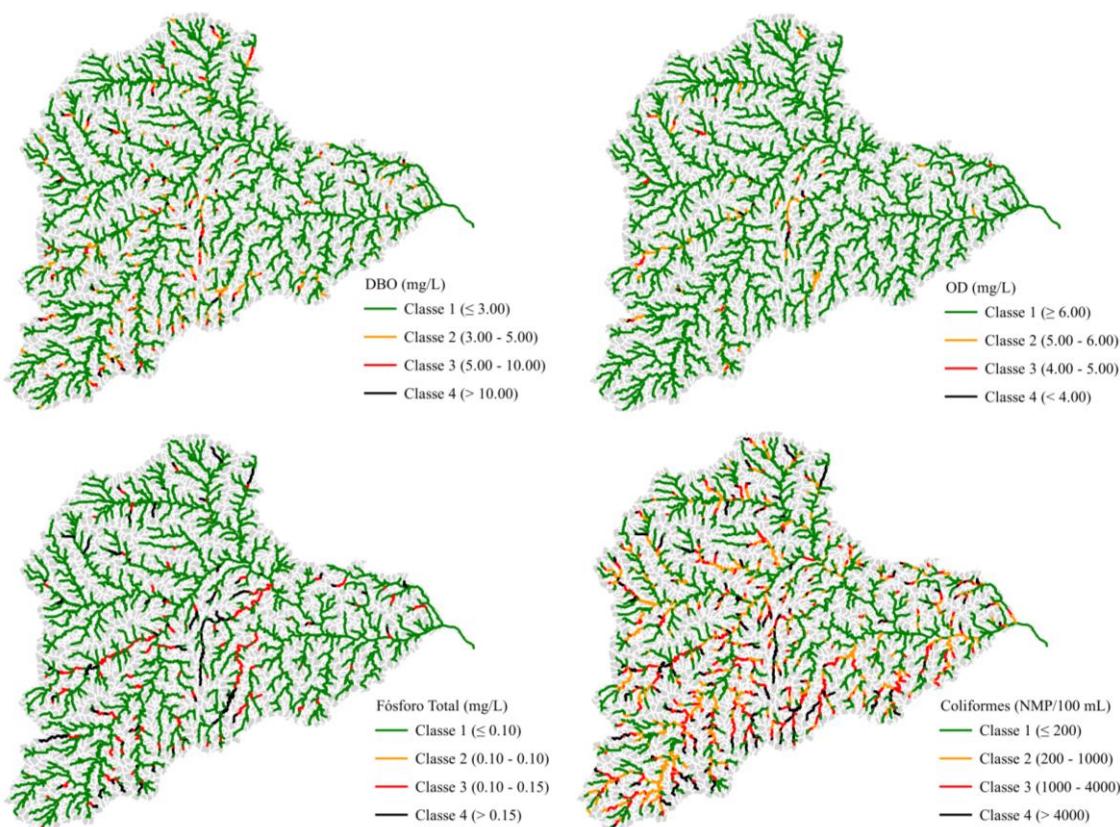
A estimativa populacional para o ano de 2022 para a bacia do rio Doce foi de 3.105.535 habitantes, com 79% residindo em áreas urbanas e 21% em áreas rurais. Ao todo foram identificados 527 distritos urbanos, dos quais 507 foram considerados na modelagem (população acima de 100 habitantes). Para o ano de 2025 o incremento populacional foi de 0,5 % (3.120.366 habitantes).

A simulação da qualidade da água, considerando todos os lançamentos brutos, resultou em condições de anaerobiose em ao menos 11 pontos de lançamentos (Senador Melo Viana, Itabira,

Timóteo, Barra Alegre, Ipatinga, Santana do Paraíso, Raul Soares, Teixeiras, São Pedro do Avaí, Santo Amaro de Minas e Vilanova), devido à localização (cabeceira), baixa capacidade de diluição ou ao montante populacional. Da mesma forma que o QUAL-UFMG, o QualPy não é aplicável em condições de anaerobiose e, por isso, esses lançamentos foram inicialmente otimizados para restaurar as concentrações de oxigênio dissolvido. Adicionalmente, também foram otimizados os lançamentos de Santa Bárbara, Barra Feliz, Barão de Cocais e Brumal, pois seus lançamentos combinados produziram condições de anaerobiose em trechos dos rios diretamente afetados pelos lançamentos.

Assim, na figura 4 estão apresentadas as concentrações de DBO simuladas com o QualPy, classificadas considerando os padrões de qualidade por classe de enquadramento e por trecho.

Figura 4 – Mapas de concentração elaborado pelo QuaPy para distintos parâmetros de qualidade da água.



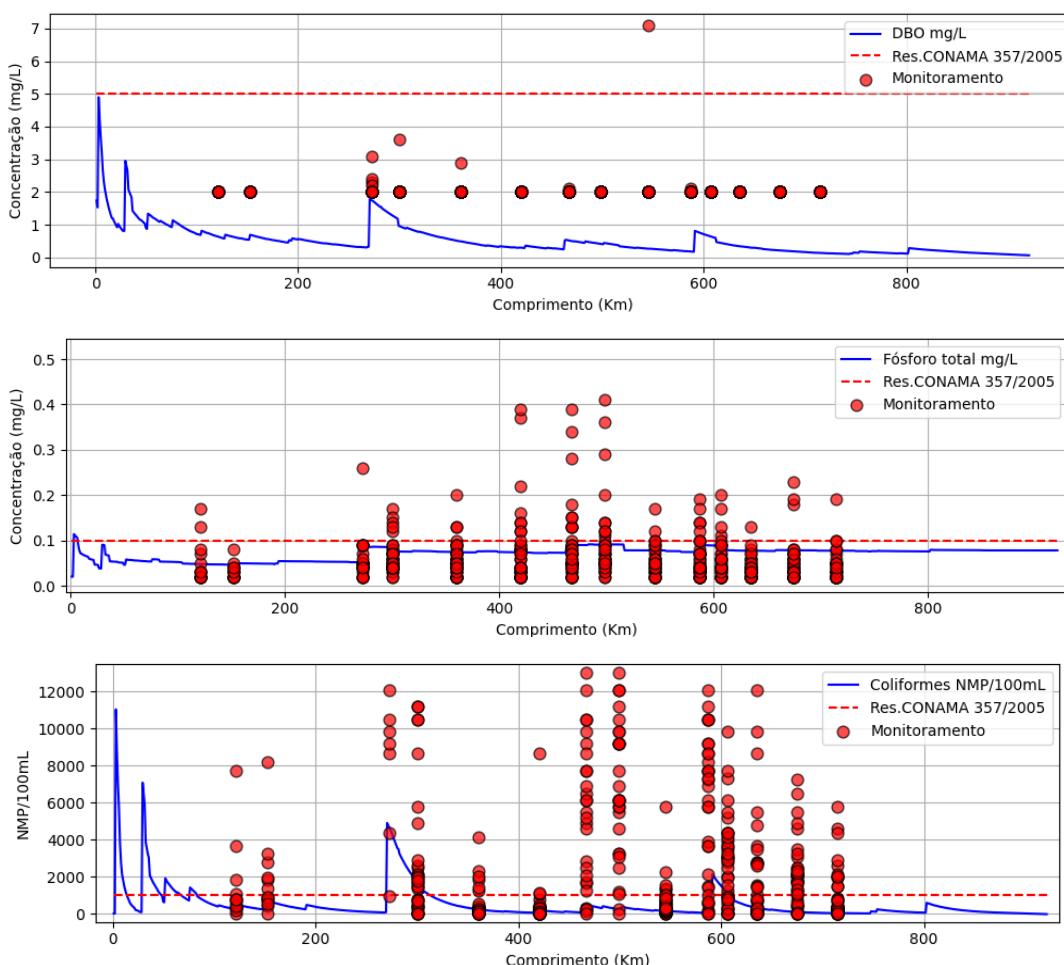
Conforme a figura 4, os valores simulados de DBO apresentaram-se significativamente mais elevados nas cabeceiras devido à baixa vazão, resultando em menor capacidade de diluição e autodepuração limitada. Por outro lado, nos rios principais, os valores simulados de DBO são mais baixos, refletindo o aumento da vazão, que promove maior diluição das cargas orgânicas, além de favorecer processos naturais de autodepuração. Dessa forma, observa-se atendimento aos padrões de DBO da classe 2 na maior parte dos trechos simulados, especialmente nos trechos de maior porte e maior capacidade de assimilação da carga poluente.

As observações apontadas para DBO, também valem para fósforo total (FT) e coliformes. No entanto, as maiores concentrações simuladas de FT foram observadas em trechos das sub-bacias dos rios Piracicaba, Carmo, Caratinga e Manhuaçu que apresentaram concentrações superiores a 0,1, limite para a classe 2. Nesse contexto, tratamentos de efluente doméstico a serem implementados nessas áreas precisam considerar a remoção de FT, pois em excesso pode induzir a eutrofização dos corpos d'água.

A simulação de coliformes indica que a maior parte dos trechos do sistema hídrico atende ao critério de qualidade estabelecido, com concentrações inferiores ou iguais a 1.000 organismos por 100mL mesmo com lançamento bruto, o que reforça a efetividade dos processos naturais de depuração, especialmente nos trechos de maior vazão. No entanto, conforme a figura 4, alguns trechos apresentam concentrações acima do limite, exigindo atenção quanto à eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto pois, em geral, esses lançamentos estão localizados em regiões de cabeceira ou em áreas com maior densidade populacional e baixa vazão.

Na figura 5, estão apresentados em forma gráfica os resultados simulados e dados de monitoramento entre a Mini 1 (cabeceira) e Mini 13333 (foz do rio Doce). Os gráficos foram elaborados pelo QualPy com dados de monitoramento do IGAM (3º trimestre) (IGAM, 2025).

Figura 5 – Perfis de concentração elaborado pelo QuaPy para distintos parâmetros de qualidade da água, incluindo dados de monitoramento.



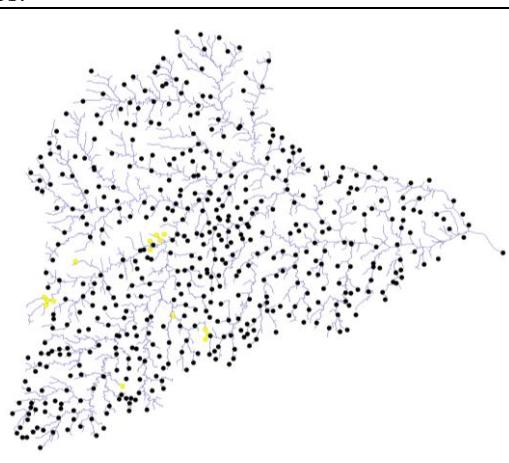
É importante salientar que não foi objetivo deste trabalho efetuar ajustes dos coeficientes cinéticos para melhorar a representação dos dados simulados em comparação com os dados observados. Tampouco foram incorporados eventuais abatimentos de carga de poluentes devidos às estações de tratamento de esgoto existentes na bacia. Todavia, ao se analisar os perfis simulados com os dados de monitoramento, verifica-se que as concentrações simuladas de fósforo total e de coliformes permaneceram próximas das concentrações observadas pelo monitoramento.

A tabela 1 apresenta os 15 distritos urbanos (todos situados em Minas Gerais) em que foi necessário otimizar os lançamentos para evitar condições de anaerobiose no ponto de lançamento ou

nos trechos seguintes. Em Ipatinga, mesmo que a DBO (DBOEf) e o Nitrogênio Amoniacal (NamonEf), fossem integralmente removidos, o padrão estabelecido para a concentração de Oxigênio Dissolvido em rios classe 2 (5 mg/L), não seria atendido devido à carga lançada e ao ponto de lançamento, definidos em função do centroide da mancha urbana. Essa situação destaca a importância da escolha do ponto de lançamento. A condição do distrito de Itabira, em que o processo de otimização também indicou a demanda por completa remoção de Nitrogênio Amoniacal em função do lançamento de elevada carga em região de cabeceira, sugere a necessidade de opções de tratamento que não direcionem o esgoto final diretamente para os cursos d'água. Em ambos os casos, as eficiências foram redefinidas em 90%. Destacam-se ainda as elevadas eficiências de tratamento para fósforo total (PtoEf) e coliformes (ColiEf), em praticamente todos os lançamentos.

Tabela 1 – Distritos urbanos e eficiências obtidas por meio da otimização, com identificação dos lançamentos otimizados.

Local	População	DBOEf	NamonEf	PtoEf	ColiEf
Vilanova	5500	83.5%	-	83.7%	98.4%
Santo Amaro de Minas	2200	83.5%	-	83.7%	98.4%
Teixeiras	8908	81.9%	-	82.4%	98.3%
Senador Melo Viana	46190	94.9%	54.4%	95.8%	99.5%
Santana do Paraíso	41453	95.4%	58.7%	96.2%	99.6%
Raul Soares	13803	87.7%	-	87.9%	98.8%
Timóteo	70384	95.8%	82.4%	96.6%	99.6%
São Pedro do Avaí	2719	87.9%	-	92.3%	98.9%
Itabira	105060	95.6%	<b>90.0%</b>	96.5%	99.7%
Barra Alegre	85840	93.8%	42.5%	95.1%	99.5%
Ipatinga	133526	<b>90.0%</b>	<b>90.0%</b>	82.4%	84.3%
Brumal	1083	60.0%	-	17.5%	91.0%
Barão de Cocais	27881	75.0%	-	82.8%	98.2%
Barra Feliz	1732	60.0%	-	-	81.0%
Santa Bárbara	25782	78.8%	-	95.2%	99.2%



## CONCLUSÕES

Ao usar elementos de delimitação automática de rios e bacias hidrográficas (camadas vetoriais de drenagem, minibacias e sub-bacias) o QualPy permite a simulação de redes de drenagem extremamente detalhadas de forma ágil e facilitada.

A visualização gráfica comparativa, entre os dados simulados e os dados de monitoramento facilita a identificação de discrepâncias, a validação dos modelos e o diagnóstico de pontos críticos, contribuindo para o aprimoramento das simulações e para a tomada de decisão na gestão da qualidade da água. Adicionalmente, a visualização cartográfica permite a visão espacial do impacto dos poluentes sobre os rios.

Ao incorporar uma funcionalidade de otimização das eficiências de tratamento, o QualPy permite estimar, de forma automática, os níveis de remoção necessários para atender aos padrões de qualidade da água nos diferentes trechos do corpo hídrico.

Conclui-se que a ferramenta desenvolvida pode auxiliar na gestão da água e do saneamento, pois permite simular cenários, avaliar o cumprimento de metas de qualidade e apoiar a definição de estratégias mais eficientes e sustentáveis para o controle da poluição e a melhoria dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DA BACIA DO RIO DOCE (AGEDOCE). “Disponibilidade Hídrica Q90% na Bacia do Rio Doce”. 2023. Disponível em:[https://sigaaguas.org.br/server/rest/services/02\\_AGEDOCE/rdc\\_ide\\_dispo\\_hidrica\\_90\\_pirh2023\\_1/FeatureServer](https://sigaaguas.org.br/server/rest/services/02_AGEDOCE/rdc_ide_dispo_hidrica_90_pirh2023_1/FeatureServer).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) (2019). Atualização do Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Estação de Tratamento de Esgoto – 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Atlas Esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA. 2017. 88 p

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, e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, 2005.

BRASIL. Lei 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 e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 9 jan. 1997.

BRASIL. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2022. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>. Acesso em: 15 mai. 2025.

CONTI, D. de M. “Editorial Nº 04/2021 Água: um tema urgente para o Brasil”. Ambiente & Sociedade, v. 24, p. e00004, 2021.

COSTA, D. J. L.; TEIXEIRA, D. “Análise de incerteza em um modelo matemático de qualidade da água aplicado ao ribeirão do Ouro, Araraquara, SP, Brasil”. Ambi-Agua, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 232-245, 2011

ENGECORPS ENGENHARIA S.A., (2021). “Consolidação do estado da arte sobre a situação e a gestão de recursos hídricos na bacia”. Relatório Técnico 1454-ANA-03-RH-RT-0001-R1. Disponível em: [https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2022/03/1454-ANA-03-RH-RT-0001-R1\\_compressed.pdf](https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2022/03/1454-ANA-03-RH-RT-0001-R1_compressed.pdf). Acesso em: 26 mai. 2025.

ESA. Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). Disponível em: <<https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>> Acesso em 10 de mai. 2025.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. (2017). “Simulação hidrossedimentológica preliminar na Bacia do Rio Doce com o Modelo MGB-SED”. In: Congresso Internacional De Hidrossedimentologia, 2., 2017, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2017.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. “Especificidades e importância de modelos matemáticos de qualidade da água”. Revista Eixo, v. 2, n. 1, p. 106-119, 2013

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). “Panorama do Censo 2022”. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/mapas.html?tema=populacao&recorte=N3>.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. (2025) “Séries Históricas de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais”. Disponível em: <<http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/405>>. Acesso em: 1º mai. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL [ITB] (2024). Ranking do saneamento Instituto Trata Brasil 2024 (SNIS 2022). São Paulo: GO Associados, 2024.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E. “Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida”. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 125-135, 2018.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2016). “IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment.” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 21(1), 274–287. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>.

VON SPERLING, M. “Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos”. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. “Estudos e modelagem da qualidade da água de rios”. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007, 588p.