

Modelagem matemática como suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Araçuaí (MG)

O monitoramento e a adoção de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões são fundamentais para a boa gestão da qualidade das águas de uma bacia hidrográfica. Diante disso, o presente trabalho utilizou o modelo matemático QUAL-UFGM com o objetivo de avaliar a capacidade de autodepuração do rio Araçuaí, em Minas Gerais, analisando as variáveis oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) considerando os anos de 2016, 2017 e 2018 para calibração e o ano de 2019 para validação do modelo. Posteriormente foi simulado um cenário hipotético, considerando a implantação de estações de tratamento de esgoto com uma eficiência de 85% de remoção de DBO para todos os municípios da bacia que ainda não se encontram em operação, até o ano de 2033, tendo como base o Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANAB. Os resultados do modelo mostraram que tanto o processo de calibração quanto o de validação apresentaram bons resultados em relação ao índice RMEQ. Observou-se que a qualidade da água, após o lançamento de efluentes do município de Itamarandiba, não satisfaz as condições estabelecidas pela Resolução CONAMA 357/2005 no que diz respeito à variável DBO. Para a variável OD não foi constatada a desconformidade com a Resolução. A partir da simulação do cenário, observou-se que a implantação de ETE's para todos os municípios que ainda não possuem o tratamento de esgoto, faria com que a variável DBO atendesse os limites permitidos pela legislação para águas doce classe 2. Observou-se também que se a implantação da ETE fosse apenas no município de Itamarandiba, haveria melhora significativa na qualidade da água, fazendo com que 100% do rio Araçuaí entrasse em conformidade com a legislação. Logo, a análise possibilitou avaliar que as ações de melhoria do saneamento básico devem ser direcionadas para o município de Itamarandiba.

Palavras-chave: Pa Autodepuração; Modelagem; QUAL-UFGM; Qualidade da água.

Mathematical modeling as a support for the management of water resources in the Araçuaí river basin (MG)

The monitoring and adoption of tools that assist in decision making are fundamental for the good management of the water quality in a hydrographic basin. Therefore, this study used the mathematical model QUAL-UFGM to evaluate the self-depuration capacity of the Araçuaí River in Minas Gerais, analyzing the variables dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD) considering the years 2016, 2017 and 2018 for calibration and 2019 for model validation. Subsequently, a hypothetical scenario was simulated, considering the implementation of sewage treatment plants with an 85% BOD removal efficiency for all municipalities in the basin that are not yet in operation, until the year 2033, based on the National Plan for Basic Sanitation - PLANAB. The model results showed that both the calibration and validation processes presented good results regarding the RMEQ index. It was observed that the water quality, after the discharge of effluents from the municipality of Itamarandiba, does not meet the conditions established by CONAMA Resolution 357/2005 regarding the variable BOD. For the DO variable it was not found non-compliance with the Resolution. From the simulation of the scenario, it was observed that the implementation of sewage treatment plants for all the municipalities that still do not have sewage treatment would make the BOD variable meet the limits allowed by the legislation for class 2 fresh waters. It was also observed that if the implementation of the WWTP was only in the municipality of Itamarandiba, there would be a significant improvement in water quality, making 100% of the Araçuaí River comply with the legislation. Therefore, the analysis made it possible to evaluate those actions to improve sanitation should be directed to the municipality of Itamarandiba.


Keywords: Autodepuration; Modeling; QUAL-UFGM; Water quality.


Topic: **Tecnologia, Modelagem e Geoprocessamento**


Received: **04/11/2021**

Approved: **22/11/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Geovana Magdália de Freitas Martins 
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4553067942389643>
<https://orcid.org/0000-0003-0004-8883>
geovanamfmartins@gmail.com

Eduardo de Aguiar do Couto 
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6707163305986412>
<https://orcid.org/0000-0002-2976-9302>
eduardocouto@unifei.edu.br

Gláucio Marcelino Marques 
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6517814177605848>
<https://orcid.org/0000-0002-7383-7587>
glauciomarques@unifei.edu.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0027

Referencing this:

MARTINS, G. M. F.; COUTO, E. A.; MARQUES, G. M.. Modelagem matemática como suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Araçuaí (MG). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.11, p.335-348, 2021. DOI:

<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0027>

INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda para os diversos usos indiretos e diretos da água, se faz necessário cada vez mais a gestão eficiente dos recursos hídricos, no que diz respeito a sua conservação e preservação, para que seja garantida a disponibilidade e qualidade da água suficiente para atender a demanda da população. O uso e ocupação do solo, que envolvem as atividades industriais, agroindustriais e urbanas, são fatores que contribuem para a degradação da qualidade da água e é um dos grandes desafios para a gestão dos recursos hídricos (MORUZZI et al., 2012).

O corpo hídrico, quando recebe uma concentração de descarga orgânica de material biodegradável, passa por um processo natural de recuperação através de processos químicos, físicos e biológicos, conhecido como autodepuração (GOMES et al., 2018). Quando o lançamento de efluentes ocorre sem um tratamento prévio, pode comprometer a capacidade de autodepuração do corpo hídrico, revelando assim a necessidade constante por novas ferramentas de apoio para a tomada de decisões que possibilitem o controle da poluição hídrica (FLECK et al., 2013).

Segundo Fleck et al. (2013), como suporte ao controle da poluição em uma bacia hidrográfica, o monitoramento da qualidade da água surge como um dos principais instrumentos, juntamente com o uso de modelos matemáticos de qualidade da água, que merecem especial destaque por possibilitar a geração de cenários futuros e identificar as fontes poluidoras, determinando assim, a qualidade da água dos rios, lagos e reservatórios.

Uma ferramenta de fácil utilização, de modelo unidimensional capaz de simular a reação atmosférica e os seus efeitos no balanço de oxigênio dissolvido, decaimento da matéria orgânica e coliformes, envolvendo também séries de fósforo e nitrogênio, é o modelo matemático QUAL-UFMG. Esta plataforma foi desenvolvida por Sperling (2007), e é baseada no modelo QUAL2E, diferenciando pela exclusão do componente de algas da sua modelagem por motivos de simplificação técnica e sua pequena importância na simulação de ambientes lóticos (TEODORO et al., 2013).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo realizar a modelagem da qualidade da água do rio Araçuaí, por meio do modelo matemático QUAL-UFMG, avaliando sua capacidade de autodepuração através dos dados de qualidade da água para as variáveis oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Foi avaliado o comportamento destes dois parâmetros ao longo de todo trecho do rio, considerando o cenário atual e simulando um cenário hipotético para o ano de 2033, cenário este baseado no Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB (BRASIL, 2019), analisando-se a região Sudeste, em que se prevê um nível de atendimento de 98% dos domicílios com o tratamento de todo esgoto coletado nas áreas urbanas.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Araçuaí (JQ2), localizada no

Nordeste de Minas Gerais (Figura 1), sendo essa uma das sub-bacias do Rio Jequitinhonha, ocupando cerca de 24,76% de sua área total, com uma área de drenagem de aproximadamente 16.280 Km². A bacia em estudo, contempla 23 municípios, dos quais 21 possuem sede na bacia¹.

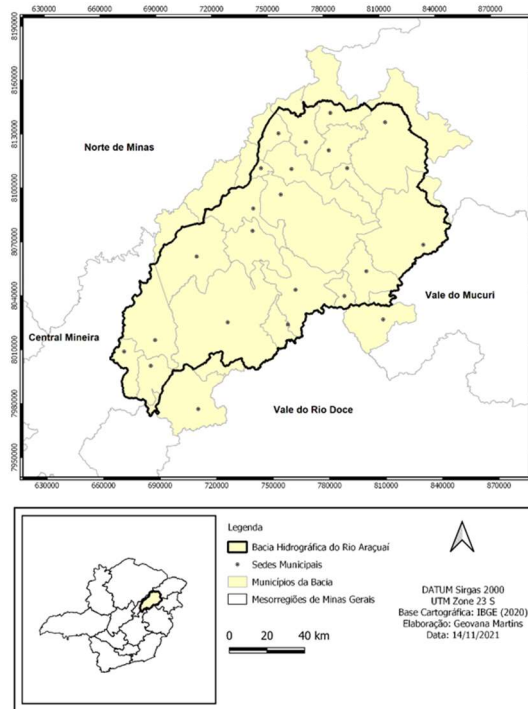


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Araçuaí.

O rio Araçuaí possui aproximadamente 250 km de extensão e é o principal afluente da margem direita do rio Jequitinhonha. Segundo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (2019), atualmente, enfrenta-se grandes problemas hídricos relacionados com o agravamento da qualidade das águas do rio Araçuaí, principalmente devido ao lançamento de esgotos sanitários sem o tratamento prévio, atividades agropecuárias, lançamento de cargas difusas ao longo do rio, processos erosivos e assoreamentos. Diante disso, se faz cada vez mais necessário investimentos em saneamento básico, melhoria na eficiência de tratamentos industriais e manejo adequado do solo, a fim de reduzir o aporte de cargas poluidoras.

Dados de entrada para a calibração do modelo

Para o estudo da modelagem para a avaliação da capacidade de autodepuração do rio Araçuaí, utilizou-se o modelo QUAL-UFMG desenvolvido por Von Sperling (2007). Foram simulados os comportamentos das variáveis demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD), levando-se em consideração o efeito do lançamento de esgoto dos municípios situados na bacia, diretamente no rio e o lançamento em seus afluentes. Para isso, foi considerada a geração de esgoto referente à população do ano de 2019.

Para a realização da modelagem, foi considerado o curso d'água do rio Araçuaí a jusante da estação de monitoramento 54225000 no município de Senador Modestino Gonçalves até a estação 54500000 no

¹ <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-jq2>

município de Araçuaí, totalizando 307 km (Figura 2). Levou-se em consideração os principais afluentes que confluem com o trecho considerado: Rio Preto, Rio Itamarandiba, Ribeirão Santo Antônio, Rio Fanado, Rio Capivari, Rio Setúbal e Rio Gravatá, afluentes estes onde há lançamentos de esgoto dos municípios que integram a bacia. Ressalta-se que os municípios de Malacacheta e Rio Vermelho não entraram no estudo, pois apesar de pequena área de seu território integrar a bacia do Rio Araçuaí, o lançamento de esgoto se dá na Bacia Hidrográfica do Rio Suaçuí. Já o município de Felício dos Santos não foi considerado no estudo devido o lançamento de esgoto do município ser a montante do ponto de monitoramento 54225000 considerado como o ponto de cabeceira da bacia, por ter dados disponíveis de vazão, OD, DBO e temperatura para entrada do modelo.

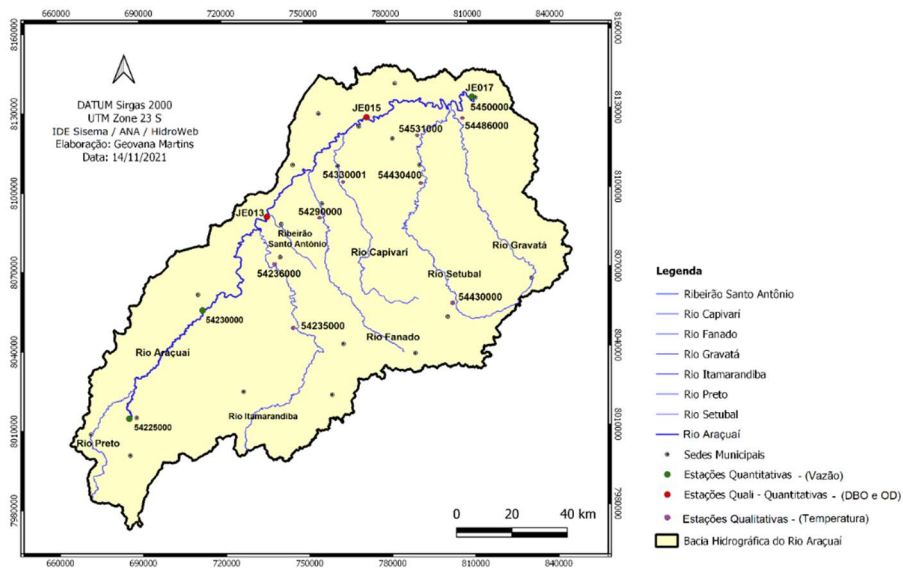


Figura 2: Curso d'água e localização das estações de monitoramento utilizadas para o estudo da modelagem.

Os dados de vazão foram obtidos por meio das estações de monitoramento do Portal HidroWeb, uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), levando-se em consideração a média da vazão mínima das estações. Segundo Von Sperling (2014), o uso da vazão mínima é empregado para o planejamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica e para a determinação das eficiências que são requeridas para os tratamentos dos esgotos nos diversos pontos de lançamento, que devem ser determinadas em condições críticas, que compreendem os períodos de estiagem, período este em que a capacidade de diluição do rio é menor.

Já os dados de qualidade da água no que se refere à DBO e OD do rio Araçuaí, foram provenientes das campanhas de monitoramento de qualidade da água do projeto “Águas de Minas”, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Para calibração do modelo, utilizou-se os dados médios dos anos de 2016, 2017 e 2018 e para a validação do modelo, utilizou-se dados do ano de 2019. As estações onde foram provenientes os dados para o estudo estão apresentados na Tabela 1.

Os dados físicos do rio que compreendem a distância do trecho (km) e altitude (m), foram provenientes da base de dados do IGAM (2021) da tabela de atributos dos ottotrechos da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, disponíveis na plataforma do IDE Sisema. Os dados de profundidade e temperatura

são oriundos das próprias estações de monitoramento citadas na Tabela 1.

Tabela 1: Localização dos pontos de monitoramento analisados no estudo.

Estação	Latitude	Longitude	Município	Dados Monitorados
54225000	-17.95	-43.25	Senador Modestino Gonçalves	Vazão
54230000	-17.58	-43.00	Carbonita	Vazão
54500000	-16.85	-42.06	Araçuaí	Vazão
JE013	-17.26	-42.78	Turmalina	DBO e OD
JE015	-16.92	-42.44	Berilo	DBO e OD
JE017	-16.85	-42.08	Araçuaí	DBO e OD
54235000	-17.64	-42.68	Itamarandiba	Temperatura
54236000	-17.45	-42.73	Veredinha	Temperatura
54290000	-17.22	-42.60	Minas Novas	Temperatura
54261000	-17.26	-42.78	Turmalina	Temperatura
54330001	-17.08	-42.54	Chapada do Norte	Temperatura
54430000	-17.57	-42.14	Setubinha	Temperatura
54430400	-17.14	-42.24	Jenipapo de Minas	Temperatura
54531000	-16.98	-42.25	Francisco Badaró	Temperatura
54486000	-16.92	-42.13	Araçuaí	Temperatura

Devido a inexistência de registros fluviométricos nas seções dos afluentes do rio Araçuaí, utilizou-se o método de regionalização de vazões, utilizando informações provenientes de estações fluviométricas existentes na bacia de drenagem, especializando-as e empregando-as para estimar a vazão característica da bacia por meio do conceito de descarga específica (L/s.km²) (VON SPERLING, 2014). Através do valor de descarga específica obtida no estudo de regionalização e conhecendo a área de drenagem do ponto de lançamento, o produto de ambos permitiu obter o valor da vazão do curso d'água do rio Araçuaí e de seus afluentes.

Realizou-se um estudo independente para cada afluente para a análise da contribuição das vazões pontuais dos tributários e qual a DBO e OD pontual em cada ponto de confluência com o rio Araçuaí. Inicialmente, calculou-se a vazão de esgoto, por meio dos dados da população de cada município para o ano de 2019, o coeficiente de retorno (r) e a contribuição *per capita*. Para auxiliar na localização dos pontos de mistura do lançamento de efluentes de cada município utilizou-se o Google Earth, elaborando posteriormente o diagrama unifilar para a demonstração da localização dos pontos de mistura e a localização das estações de monitoramentos presentes ao longo do rio Araçuaí. Conhecendo a vazão do rio e do esgoto no ponto de lançamento, calculou-se a concentração de DBO₅ no ponto de mistura por meio da Equação 1:

$$DBO_{Mist} = \frac{(Q_r \times DBO_r) + (Q_{esg} \times DBO_{esg})}{(Q_r + Q_{esg})} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

DBO_{Mist} = DBO de mistura (mg/L)

Q_r = Vazão do rio (m³/s)

DBO_r = Concentração de DBO do rio (mg/L)

Q_{esg} = Vazão do esgoto (m³/s)

DBO_{esg} = Concentração de DBO do esgoto (mg/L)

Segundo Von Sperling (2014), a concentração nos esgotos brutos domésticos de DBO₅, tem um valor médio de 300 mg/L e considerando-se as condições do curso d'água como limpo, tem-se o valor de DBO_r igual a 2mg/L. Diante disso, adotou-se estes valores para DBO_{esg} e DBO_r respectivamente, para a realização do cálculo acima. Para o cálculo da velocidade de cada afluente, para posteriormente calcular os parâmetros

DBO e OD ao longo do tempo nos afluentes, utilizou-se a Equação 2:

$$v = a \times Q^b \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

v = Velocidade (m/s²)

Q = Vazão específica do afluente (m³/s)

Coeficientes a e b = Coeficientes de ajustes específicos de cada rio.

Os coeficientes a e b, foram encontrados por meio da fórmula de Manning (Equação 3), de acordo com Von Sperling (2014). Por meio dos resultados encontrados, construiu-se os gráficos de velocidade (U) em função da vazão (Q). Nos gráficos, obteve-se a equação do tipo $y = ax^b$, encontrando-se assim os valores dos coeficientes.

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times Rh^{\frac{2}{3}} \times i^{0.5} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

n = rugosidade

A = Área molhada (m²)

Rh = Raio Hidráulico (m)

i = Declividade do trecho i (m/m)

O cálculo da declividade do rio Araçuaí para inserção no modelo, foi determinada a partir do perfil longitudinal, no qual é estabelecido por meio das distâncias horizontais do trecho e sua respectiva cota através da Equação 4. Dividiu-se o rio Araçuaí em dois trechos para o cálculo da declividade.

$$\text{Declividade (m/m)} = \frac{\text{cota inicial (m)} - \text{cota final (m)}}{\text{distância do trecho (m)}} \quad \text{Equação 4}$$

Existem parâmetros que são essenciais para a operação de modelos de qualidade da água na avaliação da capacidade natural de autodepuração dos rios. O coeficiente de reaeração (K_2) expressa a reposição de oxigênio da atmosfera em um corpo d'água (Pinheiro et al., 2012). Este coeficiente possui grande influência nos resultados do balanço de oxigênio dissolvido e pode ser determinado por valores médios tabelados, valores em função das características hidráulicas do corpo d'água e valores correlacionados com a vazão do curso d'água (SPERLING, 2014). Segundo Melchin et al. (1999), em épocas de estiagem, a maior parte dos cursos d'água possuem comportamento de poços e corredeiras. Diante disso, o coeficiente K_2 foi obtido mediante Equação 5, considerando o tipo de curso d'água "Rios com poços e corredeiras" e a vazão Q (m³/s) > 0,556 m³/s.

$$K_2 = 596 \times (v \times i)^{0,528} \times Q^{-0,136} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

v = velocidade do rio (m/s);

i = declividade do rio (m/m);

Q = vazão do rio (m³/s).

Para a adoção do coeficiente de desoxigenação (K_1), observou-se as características da matéria orgânica, temperatura e presença de substâncias inibidoras, ou seja, as características do efluente de cada município que estava sendo lançado no curso d'água. Para a adoção do coeficiente de remoção de DBO (K_d) e sedimentação (K_s), observou-se as características do curso d'água em que o efluente seria lançado. Os

coeficientes K_1 , K_d e K_s foram adotados segundo Sperling (2014), considerando o rio profundo recebendo esgoto bruto concentrado. Após o cálculo da velocidade de cada afluente, calculou-se o tempo (t) em que ele chegaria até um determinado ponto e com a adoção do coeficiente K_d , calculou-se a DBO remanescente, através da Equação 6:

$$L = L_0 \times e^{-k_d \times t} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

L = DBO remanescente em um tempo t qualquer (mg/L);

L_0 = DBO remanescente em t=0 (mg/L);

K_d = Coeficiente de remoção de DBO;

t = tempo (dias).

Para o cálculo da concentração de saturação de oxigênio, levou-se em consideração a temperatura da água e altitude, obtida nos pontos de monitoramento mais próximos aos pontos de mistura do lançamento de efluentes de cada município apresentados na Tabela 1. Para o cálculo do OD da mistura, o OD_r foi considerado de 80 a 90% do valor de saturação, no caso de rios com poucos indícios de poluição (VON SPERLING, 2014). O OD_{esg} foi considerado nulo. A concentração de oxigênio da mistura (C_0) foi calculada por meio da Equação 7:

$$C_0 = \frac{(Q_r \times OD_r) + (Q_{esg} \times OD_{esg})}{(Q_r + Q_{esg})} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

Q_r = Vazão do rio (m³/s)

OD_r = Concentração de DBO do rio (mg/L)

Q_{esg} = Vazão do esgoto (m³/s)

OD_{esg} = Concentração de DBO do esgoto (mg/L)

Posteriormente, calculou-se o perfil de oxigênio dissolvido ao longo do tempo e da distância através da Equação 8:

$$C_t = C_s - \left[\frac{K_d \times L_0}{K_2 - K_d} \times (e^{-K_d \times t} - e^{-K_2 \times t}) + (C_s - C_0) \times e^{-K_2 \times t} \right] \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

C_t = Oxigênio dissolvido do rio ao longo do tempo e da distância (mg/L);

C_s = Concentração de saturação de oxigênio (mg/L);

C_0 = Concentração de oxigênio da mistura (mg/L);

K_d = Coeficiente de remoção de DBO (mg/L);

K_2 = Coeficiente de reaeração;

L_0 = DBO remanescente em t=0 (mg/L);

t = tempo (dias).

Calibração do Modelo de Qualidade da Água

Após inserir os dados descritos acima no modelo, utilizou-se o índice Raiz da Média dos Erros ao Quadrado (RMEQ), cujo valor ótimo é mais próximo de 0, tendo este um bom comportamento estatístico e que proporciona uma medição direta do erro do modelo e é dada pela Equação 9:

$$RMEQ = \sqrt{\frac{\sum(Y_{obs}-Y_{est})^2}{n}}$$
 Equação 9

Em que:

Y_{obs} : Valor observado

Y_{est} : Valor estimado

n: Número de dados

Após o cálculo do RMEQ, utilizou-se a ferramenta solver do Excel de acordo com as restrições da literatura, para se obter os coeficientes K_1 , K_d e K_s otimizados, para o menor valor de RMEQ, apresentando assim o menor erro possível.

Validação do modelo

Para a validação, utilizou-se as médias anuais das variáveis OD e DBO para o ano de 2019, analisando assim o comportamento das variáveis ao longo do trecho do rio Araçuaí em estudo, comparando com os resultados da modelagem calibrada.

Simulação do Cenário Futuro

Para a simulação do cenário futuro, considerou-se o Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB (2019), que prevê um atendimento de 98% dos domicílios da área urbana na região Sudeste até 2033. Para isso, foi simulado um cenário com a implantação de estações de tratamento de esgoto para todos os municípios que ainda não são dotados do serviço na bacia hidrográfica do rio Araçuaí. Segundo Lobato (2011), os reatores de fluxo ascendente e manta de lodo ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) aplicados ao tratamento de esgoto doméstico, são incluídos como as principais alternativas de tratamento no Brasil. Diante disso, levou-se a consideração a implantação de sistemas de reatores UASB + filtro biológico percolador de alta carga, sistema este que possui uma eficiência média de remoção de DBO_5 em torno de 80 a 93% (VON SPERLING, 2014). Adotou-se uma eficiência de 85% e após a simulação do cenário, comparou-se o comportamento do perfil de DBO e OD com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de classe 2.

RESULTADOS

A Figura 3 apresenta o diagrama unifilar estruturado com todos os pontos de lançamento de esgoto dos municípios ao longo do rio Araçuaí e de seus principais afluentes, bem como as estações de monitoramento ao longo do curso d'água que foram utilizados no estudo da modelagem e os pontos de confluência dos afluentes com o rio Araçuaí.

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros cinéticos K_d , K_s e K_1 adotados no estudo e após a calibração do modelo por meio da ferramenta Solver do Excel. Estão dispostos também o resultado do índice RMEQ após o processo de calibração das variáveis OD e DBO, levando-se em consideração os dados médios dos anos de 2016, 2017 e 2018 e o resultado do índice RMEQ após validação com os dados médios para o ano de 2019.

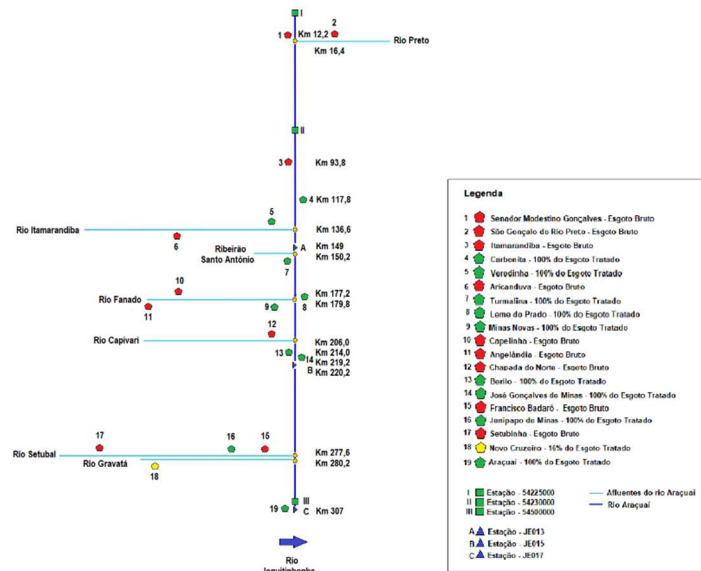


Figura 3: Diagrama unifilar do Rio Araçuaí.

Tabela 2: Calibração e validação do modelo por meio do índice RMEQ.

Variáveis	Coefficientes	Valor adotado	Valor calibrado	Restrições Aplicadas	RMEQ Calibração	RMEQ Validação
DBO	Kd	0,43	0,68	$Kd \geq K1; 0 \leq Kd \leq 1,0$	0,108	0,108
	Ks	0,14	0,14	$0 \leq Ks \leq 0,35$		
OD	K1	0,40	0,45	0,08 a 0,45	0,157	0,095

O resultado de K_2 obtido foi igual a 9,28. É apresentado na Figura 4 o resultado da calibração do modelo de qualidade da água para a variável demanda bioquímica de oxigênio (DBO), levando-se em consideração os dados médios de análise para os anos de 2016, 2017 e 2018.

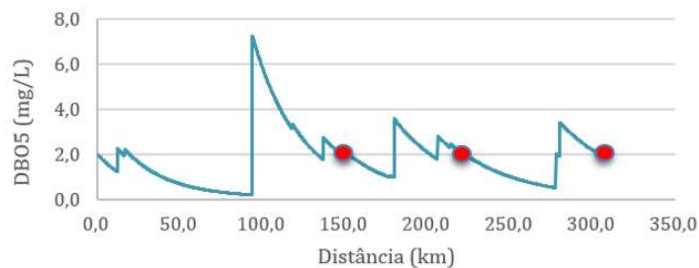


Figura 4: Calibração do modelo QUAL-UFMG para a variável demanda bioquímica de oxigênio (DBO), levando-se em consideração os anos de 2016, 2017 e 2018.

Já na Figura 5, está sendo apresentado o resultado da calibração do modelo QUAL-UFMG para a variável oxigênio dissolvido (OD), mostrando o seu comportamento ao longo de todo percurso do rio Araçuaí. As concentrações de DBO e OD em todo curso do rio Araçuaí, foram comparadas com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, referentes às águas de Classe 2.

A Figura 6 apresenta o perfil da demanda bioquímica de oxigênio ao longo do rio Araçuaí, comparando-se o cenário atual e o cenário projetado para 2033 em que se leva em conta o efeito da implantação de estações de tratamento de esgoto com eficiência de 85% de remoção de DBO para todos os municípios que ainda não contam com o serviço.

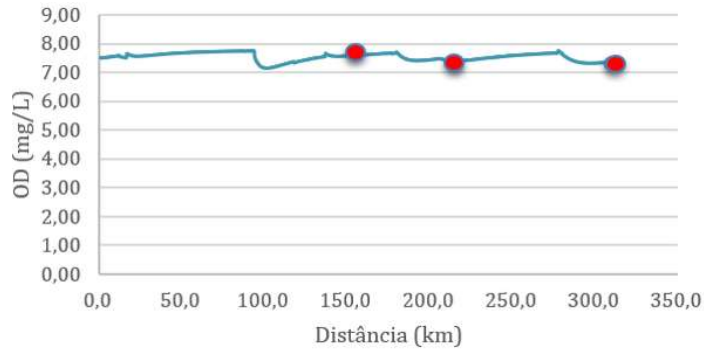


Figura 5: Calibração do modelo QUAL-UFMG para a variável oxigênio dissolvido (OD), levando-se em consideração os anos de 2016, 2017 e 2018.

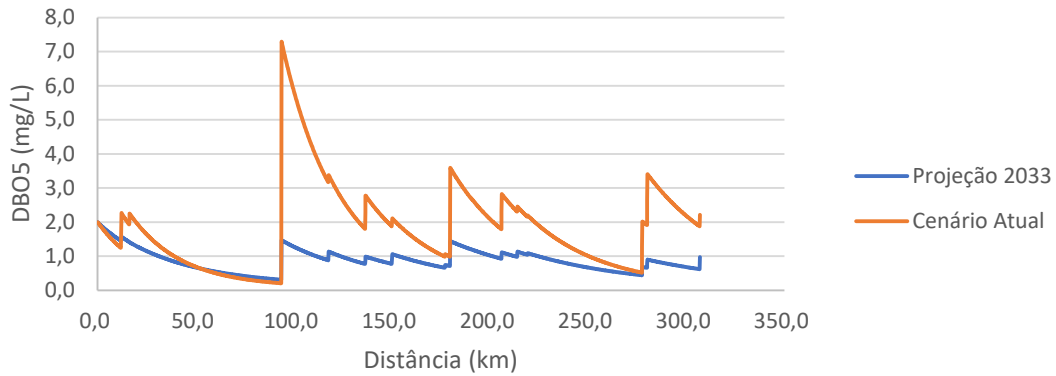


Figura 6: Comportamento da DBO, considerando o cenário atual e a projeção para 2033.

A Figura 7 apresenta o comportamento do oxigênio dissolvido, levando-se em consideração o cenário atual e o cenário hipotético apresentado acima.

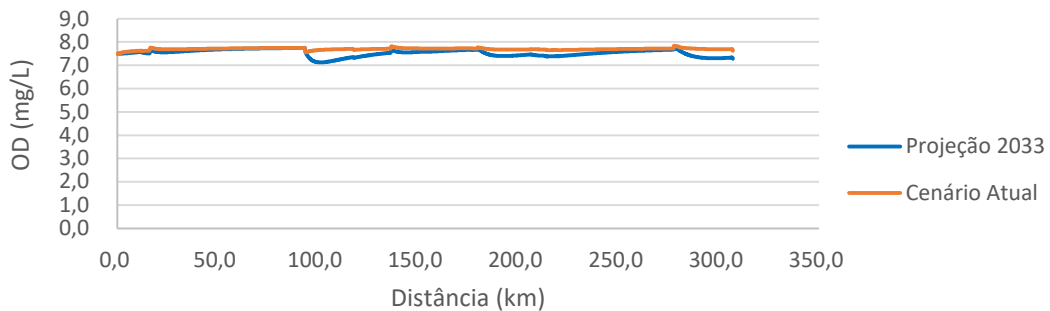


Figura 7: Comportamento do OD considerando o cenário atual e a projeção para o ano de 2033.

O resultado da projeção para o ano de 2033 para o comportamento das variáveis DBO e OD ao longo de todo curso do rio Araçuaí, foram comparadas com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, referentes às águas de Classe 2.

A Figura 8 apresenta o comportamento da variável DBO ao longo do trecho do rio Araçuaí, simulando um cenário hipotético da implantação de uma estação de tratamento de esgoto com eficiência de 85% para o ano de 2033 para o município de Itamarandiba.

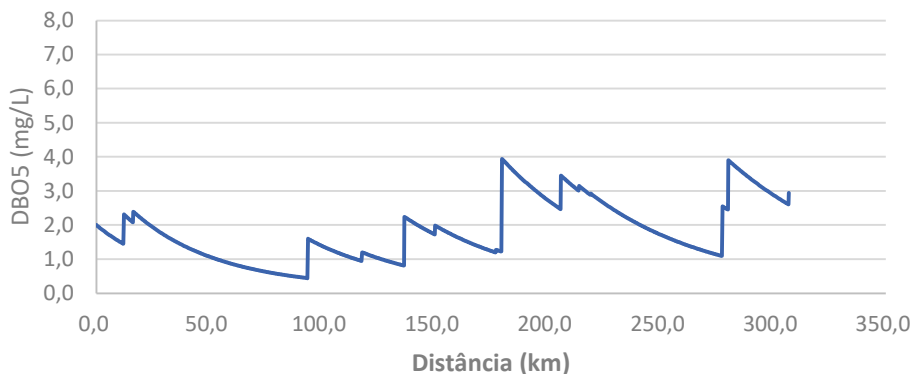


Figura 8: Comportamento da DBO, considerando o cenário hipotético da implantação de uma estação de tratamento de esgoto para o município de Itamarandiba até o ano de 2033.

Já a Figura 9 apresenta o comportamento da variável OD ao longo do trecho do rio Araçuaí, simulando o cenário hipotético descrito.

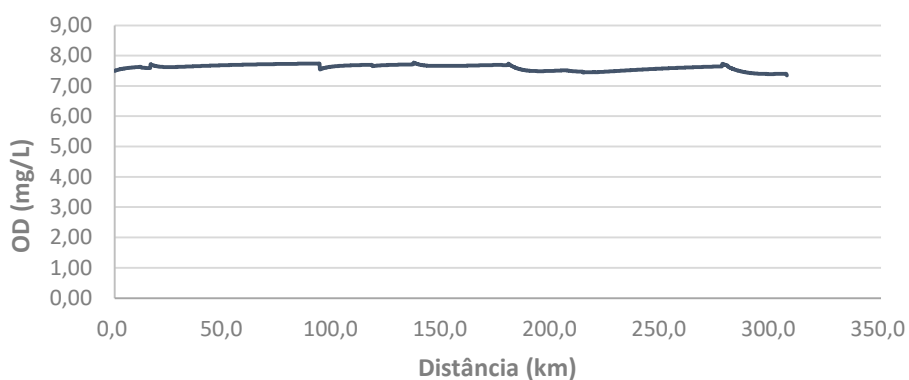


Figura 9: Comportamento do OD, considerando o cenário hipotético da implantação de uma estação de tratamento de esgoto para a cidade de Itamarandiba até o ano de 2033.

DISCUSSÃO

Observa-se na Tabela 2 que o resultado do RMEQ tanto para a calibração, quanto para a validação dos parâmetros DBO e OD após a aplicação da ferramenta Solver do Excel do modelo QUAL – UFMG se mantiveram próximo a 0, mostrando, portanto, um bom ajuste do modelo.

Os resultados da calibração do modelo para a variável DBO (Figura 4), mostram que maior parte do curso d'água do rio Araçuaí, cerca de 96,5% do trecho ou 296,6 km, satisfaz o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, não devendo ultrapassar 5mg/L. O trecho que não satisfaz os limites da legislação corresponde a 3,5% ou 10,4 km do curso d'água, trecho este que vai do km 93,8 ao km 104,2, logo após o município de Itamarandiba, com a DBO variando de 5,1 a 7,3 mg/L. Esses valores de DBO podem ser justificados pelo lançamento de efluentes domésticos sem tratamento prévio do município. No estudo de Fraga et al. (2020), na modelagem da qualidade da água da bacia do rio Piracicaba, observou-se também concentrações de DBO acima do limite estabelecido pela legislação após o município de João Monlevade, região esta em que havia o lançamento de efluentes domésticos e industriais sem o tratamento prévio. Os menores valores de DBO encontrados em seu estudo foram em regiões isentas de aglomerações urbanas, que pode ser justificada pela baixa de concentração de matéria orgânica no curso d'água.

Foi observado na Figura 4, que ao longo do rio Araçuaí, apesar da existência de lançamento de esgotos domésticos de outros municípios, a medida em que o rio se direcionava para a foz, não foram observados outros trechos na modelagem que estivessem em desconformidade com a legislação. Tal observação pode ser justificada pelo aumento da vazão do rio, que provoca uma maior diluição dos efluentes lançados. Soma-se a isso, o fato de os demais lançamentos existentes serem originados de pequenas localidades, com no máximo 40.000 habitantes (SPERLING, 2014). Além disso, estes municípios contam com o serviço de tratamento de esgoto. Segundo Gomes et al. (2018), a medida que o curso d'água avança por regiões onde a população é menor, aumenta a tendência de o mesmo ser capaz de diluir o aporte de matéria orgânica que recebe, reduzindo assim as concentrações de DBO.

Já para a calibração do OD (Figura 5), os resultados mostram que as concentrações do OD ao longo de todo curso d'água do rio Araçuaí variam de 7,13 a 7,76 mg/L, encontrando-se portanto dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que diz que em águas doces de classe 2, em qualquer amostra, o OD não deve ser inferior a 5 mg O₂/L. No trecho após o lançamento de esgoto bruto concentrado no município de Itamarandiba, o OD variou de 7,57 a 7,15 mg/L, permanecendo, portanto, dentro do padrão estabelecido. O que pode explicar as pequenas variações do OD ao longo do rio Araçuaí, até mesmo no trecho em que houve o aumento da DBO, são as características físicas e hidráulicas do rio que o permitem ter uma boa capacidade de autodepuração. O que pode também explicar os resultados da concentração do OD é o resultado do coeficiente K₂, que segundo Pinheiro et al. (2012), representa a reposição da oxigenação da água e é um fator importante no fenômeno de autodepuração dos rios.

Os resultados para a simulação do cenário hipotético com a implantação de estações de tratamento de esgoto com eficiência de remoção da DBO₅ de 85% para todos os municípios da bacia hidrográfica do rio Araçuaí que ainda não possuem o serviço, até o ano de 2033, mostram que o comportamento da DBO (Figura 6) ao longo de todo curso d'água do rio Araçuaí, teriam valores inferiores a 2 mg/L, variando de 0,3 a 2 mg/L. Dessa forma, 100% do curso d'água estaria em conformidade com a Resolução no que se diz respeito à DBO, melhorando significativamente a qualidade da água em comparação com o comportamento do perfil da DBO no cenário atual. Já em relação ao OD (Figura 10), todo curso d'água do rio em estudo continuaria em conformidade com a Resolução, variando de 7,51 a 7,84 mg/L.

No estudo de Perin (2013), realizado no rio Km 119, localizado na cidade de Campo Mourão - PR, foram simulados cenários para 70% e 90% de eficiência de remoção de DBO, no tratamento de efluentes de um laticínio e de uma estação de tratamento de esgoto. Observou-se que para o cenário em que haveria 90% de eficiência, o rio Km 119 entraria 100% em conformidade para o parâmetro OD e 97,3% para DBO no trecho estudado. Mourão (2010), realizou a simulação de um cenário para a bacia do Rio Piracicaba, considerando uma eficiência de tratamento de 80% para DBO, 90% para coliformes e 35% para fósforo para os esgotos domésticos das sedes que são lançados diretamente no curso principal. Os resultados obtidos no estudo mostraram que todo curso d'água alcançaria os limites da legislação para classe 2 no que se refere às variáveis de OD e DBO, mas para alcançar os limites para fósforo e coliformes termotolerantes seria necessário o tratamento terciário.

Os resultados da simulação, mostraram que após o trecho em que é lançado o efluente do município de Itamarandiba, o parâmetro DBO não atendia aos parâmetros exigidos pela Resolução, verificando-se, portanto, que o município é a principal fonte poluidora da bacia hidrográfica do rio Araçuaí. Diante disso, o resultado da simulação da implantação de uma estação de tratamento de esgoto apenas para o município de Itamarandiba, mostrou-se eficiente para a melhoria da qualidade da água, fazendo com que todo trecho estudado, entrasse em conformidade com a legislação vigente, atendendo tanto os critérios para os parâmetros DBO com a concentração variando 0,4 a 3,9 mg/L, quanto para o OD com a concentração variando de 7,35 a 7,77 mg/L. (Figuras 8 e 9). Este resultado é importante do ponto de vista de definição de prioridade de ações na bacia do rio Araçuaí.

CONCLUSÕES

A utilização do modelo QUAL – UFMG para a avaliação da qualidade da água do rio Araçuaí, mostrou-se adequada, com bom ajuste, já que valores do índice RMEQ próximos a zero, sendo de 0,108 para DBO e 0,157 para OD na calibração e 0,108 para DBO e 0,095 para OD na validação.

Pode-se observar pela modelagem que o município que mais deteriora a qualidade do rio Araçuaí, no que se diz respeito ao parâmetro de DBO, é o município de Itamarandiba, devido ele ter uma maior população, se comparado com os outros que lançam o esgoto diretamente no rio Araçuaí. Além disso, o município não conta com o serviço de tratamento de esgoto.

Na simulação do cenário com a implantação de estações de tratamento de esgoto até o ano de 2033 com eficiência de tratamento de 85% para todos os municípios que integram a bacia que ainda não contam com o serviço, observou-se melhora significativa na qualidade da água, assim como a simulação do cenário hipotético para a implantação apenas para o município de Itamarandiba, fazendo com 100% do rio Araçuaí entrasse em conformidade para classe 2 em relação as variáveis OD e DBO. A análise possibilitou identificar áreas críticas para intervenção na bacia, visando a melhoria da qualidade da água, mostrando que as ações devem ser direcionadas para o município de Itamarandiba. Esse resultado ressalta a importância da modelagem como ferramenta fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Entretanto, para redução das incertezas advindas da modelagem, recomenda-se a avaliação em futuros estudos de outras variáveis, como por exemplo *Escherichia coli*, as séries de fósforo e nitrogênio por serem parâmetros sensíveis ao modelo e indicadores de outras fontes de poluição, como a avaliação de lançamentos de efluentes industriais na bacia.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Plano Nacional de Saneamento Básico. **Mais saúde com qualidade de vida e cidadania**. Brasília, 2019.

FLECK, L.; TAVARES, M.; H.; F.; EYNG, E.. Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v.1, n.7, p.46-61, 2013.

FRAGA, M. S.; REIS, G. B.; SILVA, D. D.; MOREIR, M. C.;

BORGES, A. C.; GUEDES, H. A. S.. Modelagem sazonal da qualidade da água do rio Piracicaba para o cenário atual e futuro. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.2, p. 145-160, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0017>.

GOMES, S.H.R.; GUEDES, H.A.S., SIQUEIRA, T.M., CORRÊA, L.B., ANDREAZZA, R.; HUFFNER, A.N.. Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.2,

p.275-285, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018169332>.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Boletim Anual de Qualidade das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio Araçuaí**. Belo Horizonte: IGAM, 2019.

LOBATO, L. C. S.. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MELCHIN, C. S.; FLORES, H.E.. Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**, v.125, n.5, 1999.

MORUZZI, R. B.; CONCEIÇÃO, F. T.; SARDINHA, D. S.; HONDA, F. P.; NAVARRO, G. R. B.. Avaliação de cargas difusas e simulação de autodepuração no córrego da Água Branca, Itirapina (SP). **Geociências**, São Paulo, v.31, n 3, p.447-458, 2012.

MOURAO, P. R. J.. **Aplicação do Modelo de autodepuração de Qualidade das Águas QUAL-UFMG**: estudo de caso sub-bacia do rio Piracicaba. 2010. 160 f. Dissertação (Mestrado

Sustentabilidade Sócio-Econômica e Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PINHEIRO, A.; FAHT, G.; SILVA, M. R.. Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso do traçador gasoso GLP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.1, p.107-116, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000100014>

PERIN, L. T.. **Uso do modelo QUAL/UFMG no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Km 119, Campo Mourão (PR)**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.

TEODORO, A.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BROCH, S.A.O.; SILVA, J. B.. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.18, n.3, p.275-288, 2013.

SPERLING, M.. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG. 2007.

SPERLING, M.. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.