



Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA

Junea Jesus Lisboa Alves

**Modelagem matemática de qualidade da água como suporte a gestão de
recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Caratinga - MG**

Itabira- Minas Gerais

2023

Junea Jesus Lisboa Alves

**Modelagem matemática de qualidade da água como suporte a gestão de recursos
hídricos na bacia hidrográfica do rio Caratinga - MG**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Anderson de Assis Moraes – orientador
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Prof. Dr. Eduardo de Aguiar do Couto – coorientador
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Prof. Dr. James Lacerda Maia
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Dr. Grazielle Rocha dos Santos
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Itabira – Minas Gerais

2023

DEDICATÓRIA

Aos que buscam constantemente preservar os recursos hídricos, com muito carinho, dedico.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ter me iluminado em mais uma jornada

A minha família, pelo apoio e compreensão, especialmente a minha filha “Paula Victória” por compreender a minha ausência em determinados momentos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Anderson de Assis Moraes e Prof. Dr. Eduardo de Aguiar do Couto pelos seus ensinamentos e paciência.

A todos os professores do PROFÁGUA que me ajudaram nessa jornada, até mesmo fora do horário do curso. Meu muito obrigada!

Ao pessoal da secretaria acadêmica pela eficiência e profissionalismo.

A COPASA, em especial a Karoline Tenório pela contribuição e o apoio. Agradeço também a Adelino Martins Junior pela disponibilidade e pela contribuição.

Gratidão a todos que sempre me incentivam e me apoiam. Obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo

Albert Einstein

RESUMO

ALVES, Junea Jesus Lisboa. *Modelagem matemática de qualidade da água como suporte a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Caratinga - MG* Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

A modelagem matemática de qualidade da água é considerada uma ferramenta importante para avaliar o impacto do lançamento de cargas poluidoras, bem como analisar cenários de intervenção, medidas de controle, verificar e quantificar o processo de autodepuração dos corpos hídricos e simular cenários futuros de qualidade da água. O principal objetivo desta pesquisa foi contribuir com a gestão dos recursos hídricos no intuito de verificar o impacto gerado pela implantação de uma estação tratamento de esgoto na cidade de Caratinga – ETE Caratinga, cujo lançamento se dá no rio Caratinga e analisar a capacidade de autodepuração do referido rio. Foi utilizado o modelo matemático QUAL-UFMG para avaliar o impacto da estação de tratamento de esgoto e a capacidade de autodepuração no trecho que compreende o lançamento pontual da ETE Caratinga. O estudo considerou as variáveis demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD). As simulações foram feitas para cenários de efluentes brutos (antes da implantação da ETE Caratinga) e efluente com eficiência de 60 e 90% da remoção da DBO no tratamento. Foram avaliados, também, cenários considerando o aumento de carga poluente lançada em decorrência do aumento da população na bacia para os horizontes dos anos de 2033 e 2041. No cenário atual, as variáveis apresentaram valores para o índice RMEQ (Raiz Média do Erro ao Quadrado) de 0,66 para DBO e 0,66 para OD. O OD e a DBO se mantiveram dentro dos limites estabelecidos para as águas de classe 2 da Resolução CONAMA 357/2005 em 90,5% e 72,1%, respectivamente. Para um cenário em 2033, os parâmetros analisados se manteriam dentro dos limites estabelecidos para as águas de classe 2 da Resolução CONAMA 357/2005 em apenas 53,1% para OD e 8,8% para DBO. Já para cenários considerado a eficiência de 60% da remoção da DBO (limite mínimo para lançamento estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011), todo o trecho, após o km 36,4 (ponto de lançamento da ETE Caratinga), ficaria fora dos limites estabelecidos para águas de classe 2 da Resolução CONAMA 357/2005. Assim, verificou-se que, para uma melhor gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Caratinga é necessário intensificar o tratamento de efluentes e o controle sobre as fontes poluidoras, considerando a eficiência do tratamento de esgotos e o número de habitantes das principais cidades da bacia, além de aumentar a cobertura de tratamento de efluentes nos respectivos municípios.

Palavras-chave: Autodepuração. QUAL-UFMG. Qualidade da água.

ABSTRACT

ALVES, Junea Jesus Lisboa. *Mathematical modeling of water quality to support water resources management in the Caratinga river basin – MG*

Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

Mathematical modeling of water quality is considered an important tool for evaluating the impact of the release of polluting loads, as well as analyzing intervention scenarios, control measures, verifying and quantifying the self-purification process of water bodies and simulating future water quality scenarios. The main objective of this research was to contribute to the management of water resources to verify the impact generated by the implementation of a sewage treatment plant in the city of Caratinga - WWTP Caratinga, whose effluent is discharged into the Caratinga river and analyze the self-purification capacity of this river. The QUAL-UFMG mathematical model was used to evaluate the impact of the sewage treatment plant and the self-purification capacity in the section that comprises the specific launch of the ETE Caratinga. The study considered the variables biochemical oxygen demand (BOD) and dissolved oxygen (DO). The simulations were carried out for raw effluent scenarios (before the implementation of the Caratinga WWTP) and effluent with 60% and 90% BOD removal efficiency in the treatment. Scenarios were also created considering the increase in pollutant load released as a result of the increase in population in the basin for the years 2033 and 2041. In the current scenario, the variables presented values for the RMEQ index (Root Mean Squared Error) of 0.66 for BOD and 0.66 for OD. The DO and BOD remained within the limits established for class 2 waters based on CONAMA Resolution 357/2005 at 90.5% and 72.1%, respectively. For a scenario in 2033, the analyzed parameters would remain within the limits established for class 2 waters of CONAMA Resolution 357/2005 at only 53.1% for DO and 8.8% for BOD. For scenarios considering the 60% efficiency of BOD removal (minimum limit for launch established by CONAMA Resolution 430/2011), the entire stretch, after km 36.4 (launch point of ETE Caratinga), would be outside the limits established for class 2 waters of CONAMA Resolution 357/2005. Thus, it was found that, for better management of water resources in the Caratinga river basin, it is necessary to intensify effluent treatment and control over polluting sources, considering the efficiency of sewage treatment and the number of inhabitants of the main cities of the basin, in addition to increasing effluent treatment coverage in the respective municipalities.

Keywords: Self-purification. QUAL-UFMG. Water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil esquemático da concentração da matéria orgânica, bactérias decompositoras e oxigênio dissolvido ao longo do percurso no curso d'água.....	18
Figura 2 - Objetivos do desenvolvimento sustentável da ONU- ODS.....	20
Figura 3 - Representação dos constituintes e suas inter-relações simulados no modelo QUAL-UFMG.....	23
Figura 4 - Mapa de Localização da bacia hidrográfica do rio Caratinga.	26
Figura 5 - Mapa hipsométrico da Microbacia do rio Caratinga - área de estudo.	29
Figura 6 - Mapa hidrográfico da área de estudo.....	30
Figura 7 - Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Caratinga.....	40
Figura 8 - Diagrama unifilar do rio Caratinga no trecho modelado - área de estudo.....	47
Figura 9 - Perfil Longitudinal do trecho do rio Caratinga-área de estudo.....	48
Figura 10 - Perfil da vazão modelada do rio Caratinga.....	52
Figura 11 - Perfil do OD calibrado para o rio Caratinga.....	53
Figura 12 - Gráfico de calibração da DBO.....	54
Figura 13 - Extensão do trecho dentro dos padrões de lançamento-classe 2- Resolução CONAMA 357/2005	54
Figura 14 - Distribuição de frequência de OD - rio Caratinga - RD 091.....	55
Figura 15 - Distribuição de frequência de OD - rio Caratinga- P2.....	55
Figura 16 - Análise de sensibilidade para a variável DBO em relação ao RMEQ.....	57
Figura 17 - Análise de sensibilidade para a variável OD em relação ao RMEQ.....	57
Figura 18 - Simulação do cenário 1 – Concentração da DBO - pré-instalação da ETE Caratinga.....	58
Figura 19 - Simulação do cenário 2 - Eficiência da remoção da DBO de 60% - ETE Caratinga.....	59
Figura 20 - Simulação do cenário 2 - Eficiência da remoção da DBO de 90% - ETE Caratinga.....	59
Figura 21 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da DBO para 2033.....	60
Figura 22 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da OD para 2033.....	61
Figura 23 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da DBO para 2041.....	61
Figura 24 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da OD para 2041.....	62
Figura 25 – Eficiência necessária para enquadramento-Classe 2 – CONAMA 357/05- 2033.....	63

QUADROS

Quadro 1 - Amostragem para verificação do impacto do lançamento de esgotos e do atendimento a legislação.....	19
Quadro 2 - Principais modelos de qualidade da água.....	22
Quadro 3 - Descrição das planilhas do Modelo matemático QUAL-UFMG.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cadastro de outorgas registradas pelo IGAM na área de estudo.....	27
Tabela 2: Índices de abastecimento de água dos municípios da área de estudo.....	28
Tabela 3 - Coeficientes das equações de velocidade e profundidade para o trecho do rio Caratinga.....	31
Tabela 4: Modelos de vazão ajustados para os corpos hídricos da sub-bacia do Caratinga. ...	32
Tabela 5: Modelos de vazão ajustados para os corpos hídricos da sub-bacia do Caratinga. ...	33
Tabela 6: Vazões (QMLP) dos cursos hídricos que compõe a área de estudo.....	33
Tabela 7: Vazão de cabeceira da área de estudo (m ³ /s).....	33
Tabela 8: Vazão incremental do rio Caratinga- área de estudo.....	34
Tabela 9: Valores característicos dos coeficientes de remoção de DBO (K1, KS e Kd) (base e, 20°C).....	35
Tabela 10: Valores de coeficientes K2 (d-1) segundo modelos baseados em dados hidráulicos do curso d'água (base e, 20°C).	35
Tabela 11: Equações para estimativa do coeficiente K2, segundo Tsvoglou e Wallace.....	36
Tabela 12: Equações para estimativa do coeficiente K2, segundo Melching e Flores (1999). ...	36
Tabela 13: Valores típicos dos coeficientes do modelo de Coliformes em rios.....	36
Tabela 14: Valores usuais dos coeficientes do modelo de Nitrogênio em rios.	37
Tabela 15: Faixas típicas do Consumo per capita de água - QPC utilizadas.....	38
Tabela 16: Descrição das Estações Fluviométricas (ativas) de Monitoramento de Qualidade de Água localizadas na bacia hidrográfica do rio Caratinga- área de estudo.....	39
Tabela 17: Médias e desvio padrão (entre parênteses) dos dados da qualidade da água utilizados para a calibração e validação da modelagem matemática na área de estudo.	41
Tabela 18: Índices de esgotamento sanitário dos municípios da área de estudo.....	44
Tabela 19: Valores das concentrações dos parâmetros físicos e químicos no esgoto utilizados na modelagem matemática.	44
Tabela 20: Declividade de cada trecho em m/m.....	48
Tabela 21: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2022.	49
Tabela 22: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2033.	49
Tabela 23: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2041.	49

Tabela 24: Cargas poluidoras estimadas para o ano de 2022.	50
Tabela 25: Valores dos coeficientes calibrados para a modelagem do rio Caratinga.	51
Tabela 26: Resultado do índice RMEQ para a calibração e validação do modelo para o rio Caratinga.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
OD	Oxigênio dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
PESB-MG	Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
QMLP	Vazão Média a Longo Prazo
RMEQ	Raiz da média dos erros ao quadrado
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNESCO	Organização da Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UPGRH	Unidade de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. JUSTIFICATIVA E ADERÊNCIA DO ESTUDO ÀS LINHAS DE PESQUISA DO PROFÁGUA	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 Objetivo Geral	16
3.2 Objetivos Específicos	16
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
4.1 Poluição das águas e a capacidade de autodepuração em rios	17
4.2 Saneamento básico e Gestão das águas	19
4.3 Modelagem Matemática da Qualidade da água.....	21
4.4 Modelo QUAL-UFMG.....	23
5. METODOLOGIA.....	26
5.1 Área de estudo	26
5.2 Captação de água no rio Caratinga	27
5.3 Delimitação da microbacia e da hidrografia da área de estudo	28
5.4 Obtenção dos dados de entrada do modelo	30
5.4.1 Parâmetros Cinéticos	34
5.4.2 Lançamento de Esgotos domésticos e Carga Poluidora lançada.....	38
5.4.3 Pontos de amostragem de Qualidade da água	39
5.4.4 Dados de Qualidade da água	39
5.5. Calibração e validação do modelo - modelagem de cenário atual	41
5.6 Análise de incerteza e sensibilidade	42
5.7 Simulação de cenários futuros.....	43
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6.1 Diagrama Unifilar.....	46
6.2 Declividade e perfil longitudinal- área de estudo.....	48
6.3 Vazão de lançamento de esgoto pelos municípios inseridos na área de estudo e Cargas poluidoras	49
6.4 Modelagem de Cenário Atual, Calibração e Validação do Modelo	51
6.5 Análises de incerteza e de sensibilidade.....	55
6.6 Simulação de cenários	58
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

A gestão das águas no Brasil instituída pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei Federal 9.433/1997, tem como um dos seus fundamentos o uso múltiplo das águas e a gestão através das bacias hidrográficas, sendo um dos seus objetivos garantir a atual e as próximas gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade compatíveis aos respectivos usos (BRASIL, 1997).

Na perspectiva de alcançar esses objetivos propostos na PNRH, é preciso considerar, não apenas a garantia da oferta de água para abastecimento de toda a população urbana do país, mas todos os demais componentes do saneamento, em especial aqueles relacionados ao controle de poluição hídrica (ANA, 2017). É necessário que análises e propostas e, conseqüentemente, soluções sejam implementados no esgotamento sanitário.

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017), há um déficit na coleta e tratamento de esgotos nas cidades brasileiras, onde resulta em uma parcela significativa de carga poluidora sendo incorporada aos corpos hídricos, causando implicações negativas ao uso múltiplo das águas. De acordo com Silva *et al.* (2017), a gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas, tradicionalmente, tem tratado de maneira independente os aspectos quantitativos e qualitativos da água. Entretanto, faz-se necessário a gestão integralizada e um planejamento adequado, de forma que, os aspectos qualitativos e quantitativos da água sejam realizados de maneira integrada.

Segundo Von Sperling (2018), a qualidade da água resulta dos fenômenos naturais e de ações antrópicas. As fontes de poluição podem ocorrer, basicamente, de duas formas: a concentrada, como, por exemplo, no lançamento de despejos domésticos ou industriais, ou de forma dispersa, como nas aplicações de defensivos agrícolas. Quando ocorre o lançamento de despejos em um corpo hídrico, há um desequilíbrio no ecossistema aquático, alterando a sua composição natural e em seguida ocorre processo de recuperação desse ecossistema (VON SPERLING, 2018). Esse processo de recuperação é denominado de autodepuração, em que ocorre um restabelecimento do equilíbrio no meio aquático. Sendo assim, é de suma importância conhecer o processo da autodepuração e da sua quantificação, de maneira que seja verificada a capacidade de assimilação de detritos pelos corpos hídricos, sem apresentar problemas ambientais, e um controle em relação ao lançamento de cargas poluidoras e as concentrações suportadas pelo corpo d'água (VON SPERLING, 2014).

Uma forma eficiente de avaliar os impactos de lançamento de cargas poluidoras, bem como analisar cenários que auxiliem na tomada de decisões em relação aos recursos hídricos, é por meio da modelagem matemática, que serve como suporte no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica. Portanto, a modelagem matemática é considerada uma importante ferramenta de suporte aos gestores públicos no processo de gestão dos recursos hídricos, possibilitando atender aos objetivos propostos pela PNRH em toda a sua esfera (FLECK; TAVARES; EYNG, 2013).

Diante disso, busca-se por meio desse estudo, dados e informações que possam dar suporte ao gerenciamento de recursos hídricos na sub-bacia do rio Caratinga, especificamente no trecho que compreende o lançamento de esgoto doméstico da Estação de Tratamento de Esgoto de Caratinga (ETE Caratinga) no alto rio Caratinga.

O objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade da água e o impacto da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE- Caratinga) na bacia hidrográfica do rio Caratinga, por meio da modelagem matemática de qualidade da água utilizando o modelo QUAL-UFMG como forma de suporte a tomada de decisão nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos.

2. JUSTIFICATIVA E ADERÊNCIA DO ESTUDO ÀS LINHAS DE PESQUISA DO PROFÁGUA

A modelagem matemática de qualidade da água é uma ferramenta importante para o gerenciamento de recursos hídricos. Diante disso, o presente estudo propôs-se a utilização da modelagem matemática, utilizando o modelo QUAL-UFGM para analisar os impactos de uma estação de tratamento de esgoto na bacia hidrográfica do rio Caratinga. A escolha do rio Caratinga ocorreu em virtude de ainda não existir nenhum estudo nessa linha direcionado a tal bacia.

O modelo QUAL-UFGM além de diagnosticar a condição atual da qualidade da água do rio Caratinga, foi capaz de simular diferentes cenários futuros para o desenvolvimento da bacia. Ademais, o modelo permitiu simular o impacto gerado na qualidade da água do rio Caratinga antes e após a instalação da Estação de Tratamento de Esgoto.

Este estudo se enquadra na área de concentração “Regulação e Governança de Recursos Hídricos” e na linha de pesquisa “Segurança Hídrica e Usos múltiplos da água”. Tal área e linha de pesquisa possuem o objetivo de fomentar projetos relacionados ao controle de poluição hídrica, usos múltiplos da água e a redução da degradação de ambientes aquáticos.

Dessa forma, estudos de modelagem de qualidade da água são importantes e eficazes no sentido de subsidiar diretrizes para a gestão de recursos hídricos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Caratinga, especificamente no trecho que compreende o lançamento pontual do esgoto doméstico proveniente da Estação de Tratamento de esgotos de Caratinga (ETE-Caratinga), por meio da modelagem matemática de qualidade da água utilizando o modelo QUAL-UFGM como forma de suporte a tomada de decisão nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos.

3.2 Objetivos Específicos

- Simular diferentes cenários em relação ao impacto da Estação de Tratamento de esgotos (ETE) Caratinga na qualidade da água do rio Caratinga.
- Simular diferentes percentuais de eficiência de tratamento na remoção da DBO da ETE Caratinga no trecho estudado sob a qualidade da água do corpo receptor.
- Realizar análise de incerteza para os resultados de OD e de sensibilidade em relação a variação da vazão do esgoto e da temperatura.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Poluição das águas e a capacidade de autodepuração em rios

De acordo com a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Nº 6.938/1981), a poluição está relacionada com a degradação da qualidade ambiental resultantes de atividades que afetam a saúde e o bem estar das pessoas, prejudicam a biota, as condições sanitárias ou estéticas do meio ambiente e descumprem com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, 1981). Neste contexto, a poluição hídrica é um dos principais desafios ambientais enfrentados atualmente.

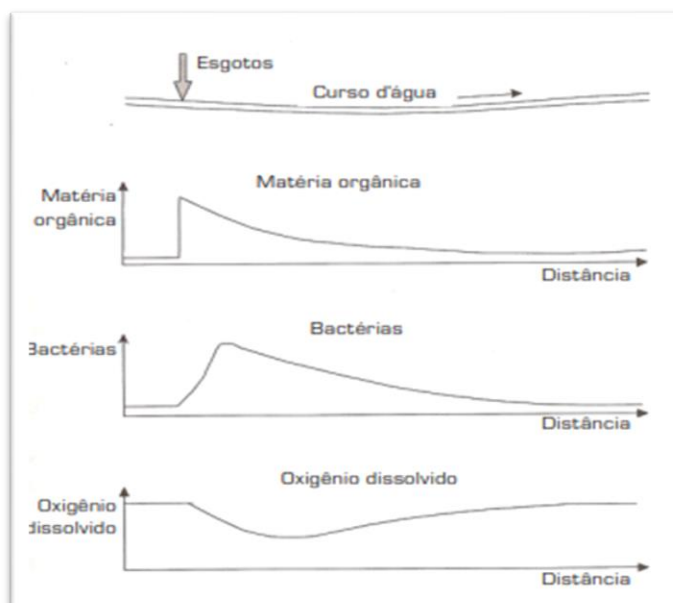
Segundo Von Sperling (2018), a poluição da água ocorre devido o acréscimo de poluentes em um corpo d'água, modificando o estado e a natureza desse corpo hídrico e prejudicando os usos que dele são realizados. Essa poluição está relacionada com as modificações e as alterações das características de um corpo hídrico, inviabilizando e/ou prejudicando as condições de usos que deles são feitos. Já a contaminação é causada pela presença de micro-organismos ou de substâncias que podem causar doenças ou serem nocivas aos seres humanos (CHERNICHARO, 2008).

Dentre os principais poluentes, a poluição hídrica oriunda da matéria orgânica e do consumo de oxigênio constitui-se no principal problema de poluição das águas, principalmente, nos países em desenvolvimento.

Os rios são, atualmente, o principal destino para os efluentes gerados pelas populações, tendo a autodepuração como um processo de recuperação de corpos hídricos (SILVA *et al.*, 2015). Chernicharo (2008) define o processo de autodepuração como a capacidade que o curso d'água apresenta de restaurar as características ambientais e restabelecer o equilíbrio no curso d'água, após alterações provocadas pelo lançamento de efluentes.

A partir do conhecimento do processo de autodepuração é possível determinar, em relação a qualidade permitida para o efluente a ser lançado e a eficiência necessária na remoção da matéria orgânica, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Perfil esquemático da concentração da matéria orgânica, bactérias decompositoras e oxigênio dissolvido ao longo do percurso no curso d'água.



Fonte: Von Sperling (2014).

A autodepuração pode ser considerada como um fenômeno de sucessão ecológica e os estágios desse processo podem ser associados a zonas fisicamente identificáveis no rio.

As principais zonas de autodepuração são: zona de degradação, zona de decomposição ativa, zona de recuperação e zona de águas limpas.

A jusante do lançamento de esgotos, predominantemente orgânico e biodegradável, têm-se as características de cada zona. Já a montante do lançamento dos despejos, tem-se a zona de águas limpas, caracterizado pelo seu equilíbrio ecológico (VON SPERLING, 2014).

Segundo Von Sperling (2014), para avaliar o impacto do lançamento de efluentes ao longo do tempo e verificar o atendimento a legislação, devem ser efetuadas, no mínimo, as amostragens do Esgoto (Afluente e Efluente) e do corpo d'água receptor (montante e jusante do lançamento), conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 - Amostragem para verificação do impacto do lançamento de esgotos e do atendimento a legislação.

Amostra	Ponto de amostragem	Objetivo
Esgoto	Afluentes à estação de tratamento de esgotos	Verificação do atendimento ao padrão de lançamento, com relação ao quesito de eficiência mínima de remoção de poluentes e dados para controle operacional da ETE.
	Efluente da estação de tratamento de esgotos	Verificação do atendimento ao padrão de lançamento, com relação aos limites de concentrações permitidos pela legislação e dados para controle operacional da ETE.
Corpo d'água receptor	Montante do lançamento de esgotos	Conhecimento das características do corpo d'água sem o lançamento dos esgotos em questão e avaliação da modificação induzida pelo lançamento dos esgotos
	Jusante do lançamento de esgotos	Verificação do atendimento ao padrão de qualidade do corpo receptor, segundo sua classe. Avaliação da modificação induzida pelo lançamento dos esgotos. A amostra deverá ser representativa das condições de mistura esgoto-rio, isto é, a coleta deverá ser em um ponto onde ambos estejam bem misturados. Poderá haver mais de um ponto de amostragem a jusante, de forma a avaliar o impacto em uma maior distância do lançamento.

Fonte: Von Sperling (2014).

4.2 Saneamento básico e Gestão das águas

Segundo Chernicharo (2008), o saneamento básico pode ser considerado como a gestão e o gerenciamento de fatores que influenciam ao bem-estar físico, mental e social das pessoas. Dentre os serviços básicos do saneamento, tem-se o abastecimento de água, a coleta, o tratamento, a disposição final dos resíduos sólidos e das águas residuárias e o manejo de águas pluviais.

O saneamento básico está diretamente relacionado ao desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer as necessidades das futuras gerações. De acordo com Chernicharo (2008), o desenvolvimento atual trouxe inúmeros desequilíbrios ambientais, como o aquecimento global, o efeito estufa, o degelo, a poluição, a extinção de espécies, entre outros.

A partir de tais problemas surgiu a necessidade do desenvolvimento sustentável, em que a proteção do ambiente tem que ser entendida como parte integrante do processo de desenvolvimento.

O acesso a água potável de qualidade para todos, segundo a UNESCO (2015), deve ser garantido e gerenciado de maneira inteligente para o desenvolvimento sustentável.

A Agenda 2030 conta com 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) apresentados na Figura 2, que são integrados e indivisíveis (ONU, 2015). Dentre os objetivos, encontra-se o objetivo 6 que tem a principal função de assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos. Portanto, este estudo visa contribuir, principalmente, em relação ao alcance do objetivo 6.

Figura 2 - Objetivos do desenvolvimento sustentável da ONU- ODS.



Fonte: ONU (2015).

Segundo Tundisi (2013), a gestão das águas, em grande parte, no século XX foi exercida de maneira centralizada e setorial. Durante essa gestão o enfoque era o corpo d'água, lago ou represa, uma vez que estes eram as principais fontes de abastecimento e uso. Novas iniciativas na organização e na legislação começaram a ser implementadas no final do século XX tornando a gestão das águas mais eficiente e mais abrangente. No fórum mundial da água em 2000, de acordo com Tundisi (2013), o “*Global Water Partnership Framework for Action*” declarou que a crise da água é necessariamente uma crise de gestão, e nesse aspecto, a governança da água constitui-se uma das grandes prioridades para a ação. A evolução do processo de governança passou, então, para a gestão e gerenciamento a nível da bacia hidrográfica, tornando-se preditiva, com a finalidade de antecipar processos e fenômenos.

De acordo com Alves *et al.* (2022), acredita-se que a crise de água existente está mais relacionada com a gestão inadequada dos recursos hídricos do que, propriamente, a escassez hídrica e, nesse aspecto, é importante tratar sobre a governança da água com a participação da sociedade, instituições e agentes governamentais no gerenciamento dos recursos hídricos. Carneiro (2021) destaca que uma das ferramentas que pode ser utilizada como suporte no gerenciamento de recursos hídricos e na tomada de decisões é a modelagem matemática.

Nesse sentido, a modelagem matemática de qualidade da água torna-se imprescindível para a gestão de recursos hídricos e o saneamento básico, uma vez que, por meio de modelos, é possível caracterizar o corpo d'água e verificar a capacidade de suporte de rios e córregos e o valor máximo de determinado poluente sem comprometer a qualidade da água e seus usos estipulados pela classe de enquadramento de acordo com a resolução CONAMA nº 357/05.

4.3 Modelagem Matemática da Qualidade da água

O Modelo clássico de Streeter-Phelps, desenvolvido no ano de 1925, é considerado o pioneiro em relação a modelagem de qualidade das águas. Neste modelo, trabalha-se com o processo de decomposição da matéria orgânica última no corpo d'água sendo uma reação de primeira ordem. Uma reação de primeira ordem é aquela na qual a taxa de mudança da concentração de uma substância é proporcional a primeira potência da concentração (VON SPERLING, 2014). Vários outros modelos foram desenvolvidos mantendo a mesma estrutura conceitual do modelo de Streeter-Phelps. Alguns dos principais modelos da qualidade da água e suas características são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais modelos de qualidade da água.

Modelos	Parâmetros simulados	Finalidades
Streeter-Phelps (EUA- 1925). Indicado para modelagem de rios.	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) Oxigênio Dissolvido (OD)	Analisar como o consumo de oxigênio dissolvido varia ao longo do espaço e do tempo após o lançamento de carga poluidora.
QUAL2E (EUA-1985) Lançado pela USEPA. Indicado para modelagem de rios.	OD; DBO; Temperatura; Algas; Amônia; Nitrito; Nitrito; Nitrogênio orgânico; Fósforo orgânico; Fósforo dissolvido; Coliformes.	É utilizado em estado estacionário ou dinâmico. Em estado estacionário, é utilizado para avaliar o impacto do lançamento de uma carga poluente no corpo receptor. Em estado dinâmico, permite determinar os efeitos das frações dos dados meteorológicos e das mudanças da concentração de oxigênio dissolvido, sobre a qualidade da água do curso hídrico em análise.
CE-QUAL-W2 (EUA - 1986) Indicado para modelagem de rios, lagos, reservatórios e estuários	Temperatura; SS; SDT; DBO; OD; pH; Amônia; Nitrito; Fósforo; Cloretos; Algas; Matéria Orgânica Dissolvida; Ferro; etc.	Simular o processo de eutrofização dos cursos hídricos.
QUAL2Kw (EUA – 2004) Indicado para modelagem de rios.	Temperatura; SS; SDT; DBO; OD; pH; Amônia; Nitrito; Fósforo; Cloretos; Algas; Matéria Orgânica Dissolvida; CO 2; Ferro; etc.	Pode ser utilizado em regime permanente ou dinâmico. No regime permanente, pode simular o impacto dos lançamentos de efluentes na qualidade da água, identificando a magnitude e as características da qualidade das fontes pontuais e difusas. No regime dinâmico, é possível analisar as frações de oxigênio dissolvido ocorridas ao longo dos dias devido à respiração das algas e às mudanças climáticas.
QUAL-UFGM (Brasil - 2007)	DBO; OD; Nitrogênio total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrito); Fósforo total e suas frações (orgânico e inorgânico); coliformes termotolerantes ou <i>Escherichia coli</i> (E. coli)	Possibilita a simulação rápida e simples do oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total e suas frações, e coliformes termotolerantes ou <i>Escherichia coli</i> (E. coli).

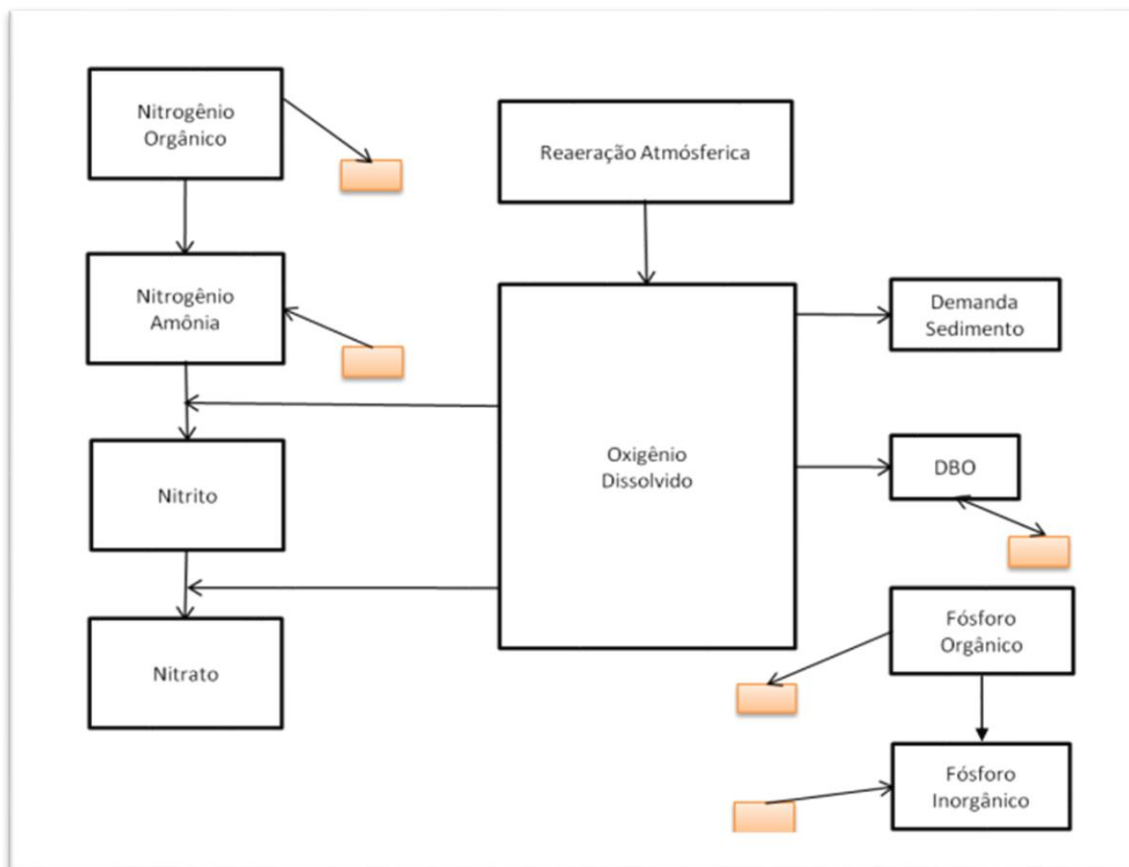
Fonte: Fleck; Tavares; Eyng, 2013, adaptado pela Autora.

4.4 Modelo QUAL-UFMG

O modelo matemático de qualidade das águas QUAL-UFMG, desenvolvido por Von Sperling, em 2007, foi baseado no modelo QUAL-2-E elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). O QUAL-UFMG é um programa desenvolvido para o ambiente computacional e suas planilhas em Excel tornam possível uma simulação rápida e simples da modelagem de rios, permitindo modelar os parâmetros de DBO, OD, Nitrogênio Total e suas frações, Fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes ou *Escherichia coli* (VON SPERLING, 2014).

O QUAL-UFMG é considerado um modelo simplificado por não incluir o fitoplâncton, uma vez que, segundo Von Sperling (2014), modelos que envolvem processos que incluem algas e cianobactérias são complexos e os valores dos coeficientes são de difícil determinação. A Figura 3 apresenta as principais inter-relações entre os constituintes modelados pelo modelo QUAL-UFMG

Figura 3 - Representação dos constituintes e suas inter-relações simulados no modelo QUAL-UFMG.



Fonte: Von Sperling (2014).

**os retângulos cor de laranja representam a troca com o sedimento.

Para Costa e Teixeira (2010, apud Fleck *et al.*, 2013) o modelo de qualidade das águas QUAL-UFMG possui interface amigável, não considera o efeito da dispersão longitudinal, é unidimensional, adequado para rios com vazões baixas e escoamento em regime permanente, uma vez que essas condições não favorecem a dispersão longitudinal dos rios. Além disso, o modelo QUAL-UFMG utiliza o método de Euler que é mais simples e de fácil compreensão. O programa é composto de quatro planilhas, conforme descritas no Quadro 3.

Quadro 3 - Descrição das planilhas do Modelo matemático QUAL-UFMG.

Planilhas	Descrição
Fórmulas coef	Possui todas as fórmulas utilizadas para os cálculos da modelagem do rio e os valores usuais dos coeficientes.
Diagrama Unifilar	É destinada ao usuário, para detalhar o diagrama unifilar do rio, no sentido de facilitar a compreensão do sistema modelado, a entrada de dados e a interpretação dos resultados.
Rio Principal	Contém a modelagem do rio principal, onde todos os cálculos são efetuados e os resultados apresentados (valores e gráficos).
Tributário 1	Serve para a simulação de tributários existentes no sistema a ser modelado, sendo, portanto, opcional. Os resultados são transportados para a planilha do rio principal. Poderá ser copiada em casos de existirem mais tributários a serem modelados.

Fonte: Von Sperling (2014), adaptado pela Autora (2022).

O QUAL-UFMG incorpora os processos interagentes no balanço do oxigênio dissolvido, modelando-os em condições de anaerobiose, levando em consideração a sedimentação da matéria orgânica, o consumo do oxigênio dissolvido pela nitrificação e as cargas difusas internas sem vazão (demanda do sedimento, fotossíntese e respiração) e cargas externas (PAULA, 2011).

Os resultados gerados pelo modelo QUAL-UFMG são apresentados na forma de tabela e gráficos.

A modelagem matemática de qualidade da água utilizando o modelo QUAL-UFMG vem sendo utilizado em diversas bacias hidrográficas. Gomes *et al.* (2018) modelou o rio dos Sinos no intuito de verificar a alteração em virtude da sazonalidade no referido rio. Os autores constataram que a qualidade da água do rio de Sinos é alterada em função das concentrações da sazonalidade (período seco e chuvoso). O modelo também foi utilizado por Silva *et al.* (2018) para subsidiar uma proposta de enquadramento do rio Una, em Pernambuco. Os resultados mostraram que a maioria dos parâmetros analisados se encontravam dentro dos padrões

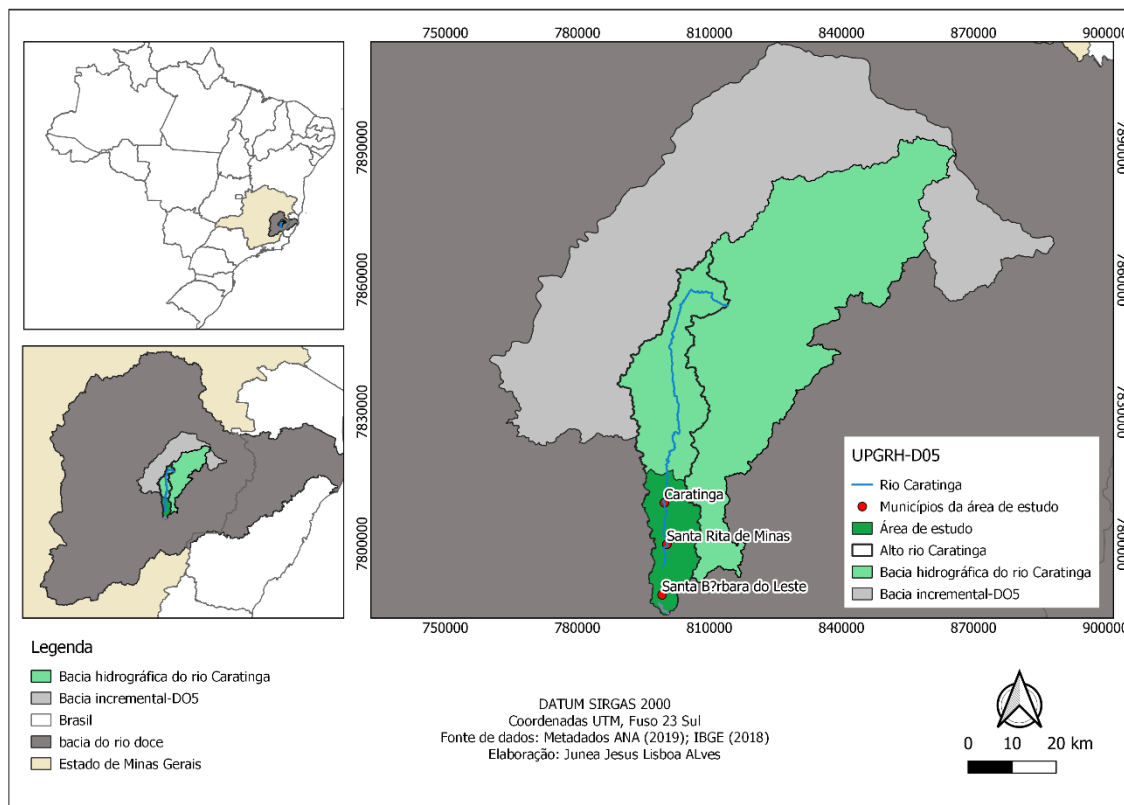
estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para classe 2. Os autores verificaram também, por meio da modelagem, que o rio Una possui uma alta capacidade de autodepuração. Já Teodoro *et al.* (2013) fizeram adaptações nas planilhas de simulação do QUAL-UFGM no intuito de determinar a vazão de diluição e cobrança pelo lançamento de efluentes. Simularam cenários hipotéticos do rio Taquarizinho, Mato Grosso do Sul, e verificaram a qualidade da água com base nos dados da DBO e OD. Constataram que, mesmo nas vazões mínimas, o rio Taquarizinho mostra boa capacidade de suporte para instalação de empreendimentos na bacia.

5. METODOLOGIA

5.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Caratinga é uma unidade pertencente à bacia hidrográfica do rio Doce, inserida totalmente no Estado de Minas Gerais, conforme Figura 4. O curso d'água principal da bacia é o rio Caratinga (ECOPLAM - LUME, 2010). O rio Caratinga é um afluente da margem direita do rio Doce, tem sua nascente no município de Santa Bárbara do Leste, estende-se por cerca de 222 km passando pelas cidades de Santa Rita de Minas, Caratinga, Ubaporanga, Inhapim e Dom Cavati. Deságua no rio Doce, junto à divisa dos municípios de Tumiritinga e Conselheiro Pena. Dentre os principais afluentes do rio Caratinga, tem-se o rio Preto, pela margem direita, e os ribeirões Alegre e Queiroga pela margem esquerda (ECOPLAM - LUME, 2010).

Figura 4 - Mapa de Localização da bacia hidrográfica do rio Caratinga.



Fonte: Autoria própria (2022).

A bacia hidrográfica do rio Caratinga, com uma área de drenagem de 3.228,70 km², juntamente com uma bacia incremental (parte da bacia hidrográfica situada entre um aproveitamento e outro localizado a montante e com drenagem diferente da bacia principal), com uma área de 3.448,92 km² com drenagem direta no rio Doce, forma a Unidade Estratégica de Gestão DO5 (UEG - DO5) com uma área total de 6.677,62 km². A UEG - D05 abrange, total ou parcialmente, 29 municípios mineiros, dos quais 20 deles tem sua área territorial totalmente inserida na UEG D05. Em relação a localização da sede municipal, quatro municípios (Alvarenga, Governador Valadares, Resplendor, Bom Jesus do Galho) possuem suas sedes urbanas em outras unidades, sendo essas unidades D06, D04, D06 e D01, respectivamente. A população total da Bacia Hidrográfica do rio Caratinga é de 325.648 mil habitantes. O município mais representativo em termos populacionais é o de Caratinga, com uma população de 88.311 habitantes, de acordo com o censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2022 (IBGE, 2022). Em relação à economia, destaca-se o cultivo de café, produção de hortifrutigranjeiros e pecuária (IGAM, 2018).

Na área de estudo, segundo dados do IDE-Sisema (2021), há um total de 38 outorgas cadastradas, divididas em 3 tipologias e outras não declaradas, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Cadastro de outorgas registradas pelo IGAM na área de estudo

Finalidade de uso	Número de outorgas cadastradas
Abastecimento público	8
Irrigação	23
Consumo humano	1
Obras de infraestruturas e urbanização	1
Não declarou	5

Fonte: IGAM (2021), adaptado pela Autora (2022).

Os maiores números de outorgas cadastradas são referentes aos usos para irrigação seguidos de abastecimento público.

5.2 Captação de água no rio Caratinga

Os índices utilizados para caracterizar a situação do abastecimento de água e a classificação quanto à captação de água para consumo humano na área de estudo foram o de atendimento urbano de água obtido por meio da série histórica do Sistema Nacional de

Informações sobre Saneamento (SNIS) referente ao ano de 2021. Os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Índices de abastecimento de água dos municípios da área de estudo.

Tabela 2: Índices de abastecimento de água dos municípios da área de estudo.

Município	População Urbana (2022)	Índice de abastecimento urbano de água %	Tipo de Captação	Manancial
Caratinga	88.311	88	Superficial	Ribeirão do Laje
Stª Bárbara do Leste	7.990	100	Superficial	Córrego do Peão
Stª Rita de Minas	6.214	93	Superficial	Rio Caratinga

Fonte: IBGE, (2022); SNIS (2021); Atlas água (2021).

De acordo com o SNIS (2021), o índice de atendimento urbano de água é calculado por meio da divisão da população urbana atendida com abastecimento de água pela população urbana do município.

O estudo foi desenvolvido em um trecho do alto rio Caratinga nos municípios de Santa Bárbara do Leste, Santa Rita de Minas e Caratinga, conforme mostrado na Figura 4. O trecho contemplado no estudo possui uma área de drenagem de aproximadamente 288,2 km² e uma extensão de 37,7 km de rio, se inicia no município de Santa Bárbara do Leste e se encerra no município de Caratinga, abrangendo três municípios total ou parcialmente inseridos em seus limites e todos com sedes municipais dentro do limite da área de estudo, com uma população total aproximada de 102 mil habitantes de acordo com o censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2022 (IBGE, 2022).

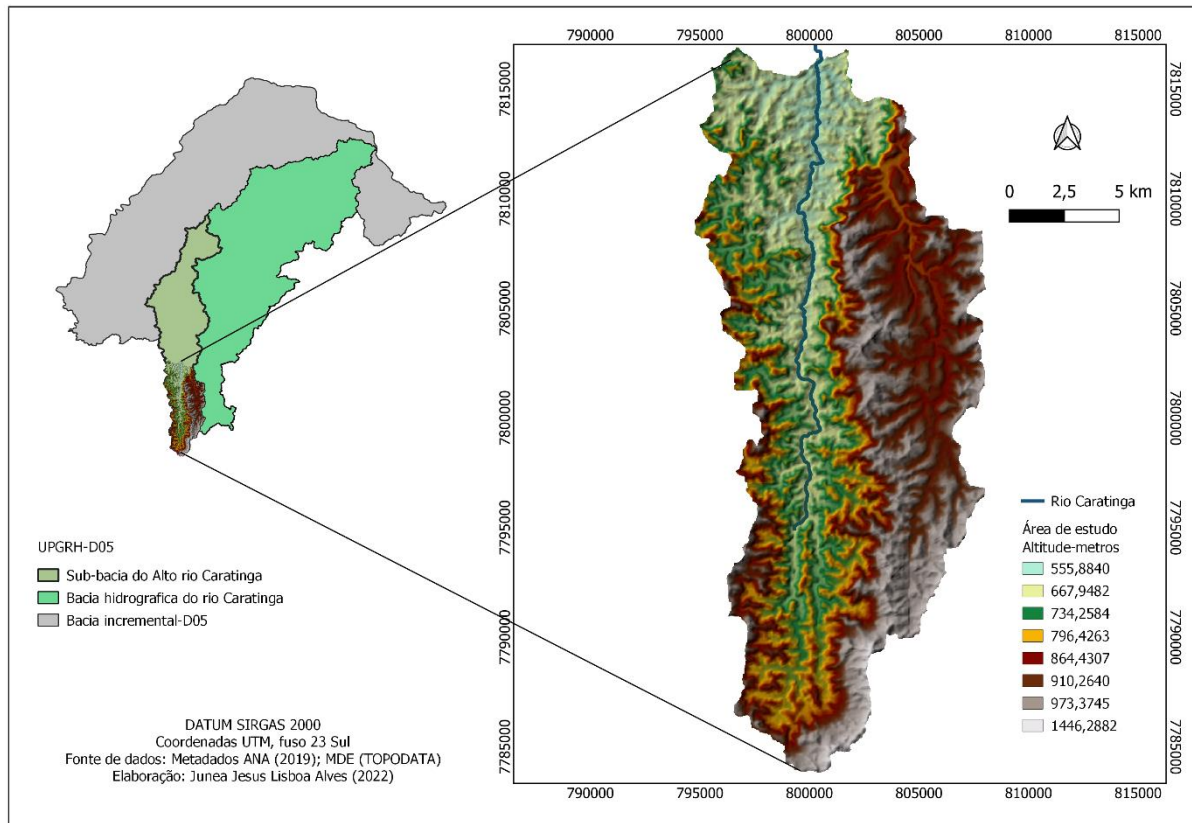
A bacia do rio Caratinga tem um clima quente e temperado. Há muito mais pluviosidade no verão que no inverno. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é classificado como Cwa, em que o clima é subtropical de inverno seco e verão quente. As temperaturas médias das cidades de Caratinga, Santa Rita de Minas e Santa Bárbara do Leste são de 20,8 °C, 20,2 °C e 19,7 °C, respectivamente. A pluviosidade média anual é de 1.115mm para as cidades de Caratinga e Santa Rita de Minas e de 1.132 para a cidade de Santa Bárbara do Leste.

5.3 Delimitação da microbacia e da hidrografia da área de estudo

Para a gestão, monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos é importante conhecer a bacia a ser estudada. Para delimitar a bacia hidrográfica do rio Caratinga utilizou-se o software QGIS. Inicialmente obteve-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), a fim de extrair dados como hidrografia, altitudes e declividade da bacia hidrográfica. O Instituto Nacional de

Pesquisa Espaciais (INPE) disponibiliza os dados geomorfométricos do Brasil. Dessa forma, utilizou-se os dados TOPODATA do INPE para delimitar a bacia e as microbacias do rio Caratinga. Na Figura 5 é apresentada a delimitação e a altimetria da área de estudo. Verifica-se que a altimetria da microbacia da área de estudo varia de 555,88 a 1.446,28 metros.

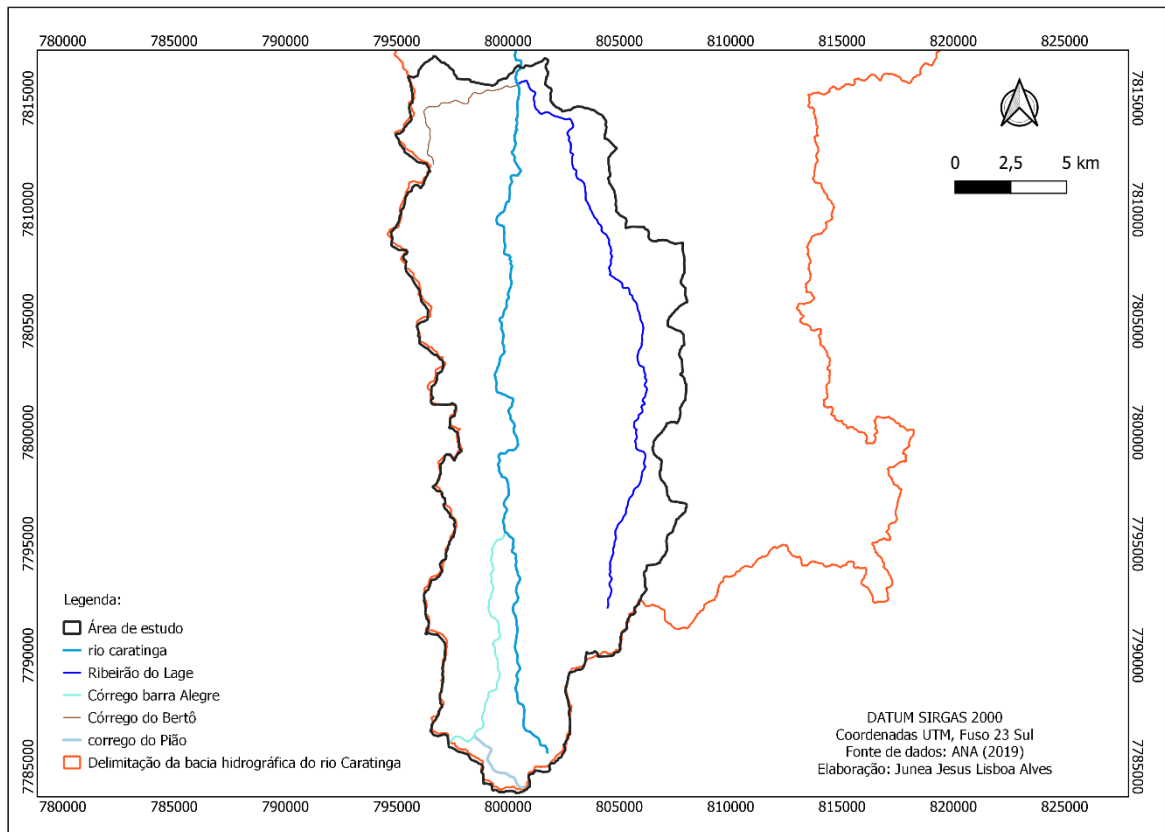
Figura 5 - Mapa hipsométrico da Microbacia do rio Caratinga - área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para o rio principal e seus principais tributários, criou-se um *shapefile* para cada item. Na Figura 6 é apresentada a delimitação e a hidrografia da área de estudo. A extensão do rio Caratinga nesse trecho é de 37,7 km e seu principal afluente é o Ribeirão do Lage, em sua margem direita.

Figura 6 - Mapa hidrográfico da área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.4 Obtenção dos dados de entrada do modelo

O modelo utilizado nesse estudo foi o modelo matemático de qualidade da água QUAL-UFMG. Foram simulados 2 parâmetros de qualidade da água ao longo do trecho do alto rio Caratinga. Os parâmetros modelados foram: oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

a) Perfil longitudinal e declividade

Para gerar o perfil longitudinal da área de estudo utilizou-se o MDE e o Software QGis versão 3.16.

Para o trecho em estudo, a declividade (i) foi determinada a partir do perfil longitudinal. Foi calculada de acordo com Von Sperling (2014), em que a declividade é calculada pela diferença da cota inicial e cota final dividido pela distância.

b) Velocidade e Profundidade - Fórmula de Manning

Os dados estimados para as vazões, bem como os demais parâmetros hidráulicos como a profundidade média, largura média e velocidade média em um curso d'água pode ser obtidas pela fórmula de Manning.

Neste estudo, a estimativa da velocidade de escoamento e da profundidade foram calculados com base nas equações 1.1 e 1.2.

$$v = aQ^b \quad \text{Equação 1.1}$$

$$H = cQ^d \quad \text{Equação 1.2}$$

onde:

v – velocidade média do rio (m/s);

H – Profundidade média (m);

Q – Vazão (m³/s); e

a, b, c, d – coeficientes de ajuste específicos de cada rio.

Os coeficientes a, b, c e d, foram encontrados de acordo a fórmula de Manning por meio de equações de ajustes.

Com os resultados encontrados, foram construídos gráficos de velocidade (U) em função da vazão (Q), e de profundidade (y) em função de Q. Nos gráficos foram ajustadas as curvas multiplicativas do tipo $y = ax^b$, e com as equações obtidas foram encontrados os valores dos coeficientes para o rio Caratinga.

Os coeficientes para a resolução das equações de velocidade e profundidade (1.1 e 1.2), respectivamente, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes das equações de velocidade e profundidade para o trecho do rio Caratinga.

Corpo Hídrico	Trecho	a	b	c	D
Rio Caratinga	Trecho 1	0,588	0,372	0,243	0,628

Fonte: Autora (2022).

c) Vazão

Foram utilizados modelos ajustados para os corpos hídricos da sub-bacia, obtidos no Atlas digital das águas de Minas – HIDROTEC (2011) para estabelecer as vazões críticas e a

vazão média de longo período (QMLP) da área de estudo. Os modelos ajustados para o rio principal e os tributários são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Modelos de vazão ajustados para os corpos hídricos da sub-bacia do Caratinga.

Corpo hídrico	Vazão	Modelo ajustado (m³/s)
Rio Principal (Caratinga)	QMLP	$0,0148 \times A^{0,9768}$
Rio Principal (Caratinga)	Q ₉₀	$0,0022 A^{1,0690}$
Rio Principal (Caratinga)	Q ₉₅	$0,0013 A^{1,1021}$
Rio Principal (Caratinga)	Q _{7,10}	$0,0011 \times A^{1,0803}$
Tributários	Q _{7,10}	$0,0042 \times A^{1,0803}$
Tributários	QMLP	$0,0148 \times A^{0,9768}$
Tributários	Q ₉₀	$0,0022 A^{1,0690}$
Tributários	Q ₉₅	$0,0013 A^{1,1021}$

Fonte: HIDROTEC (2011), adaptado pela Autora (2022).

Sendo a área do trecho analisado neste estudo igual a 288,2 km² temos que $Q_{7,10} = 0,5$ m³/s e QMLP de 3,74 m³/s e a vazão específica = 1,73 L/s.km². A vazão específica foi calculada dividindo a Vazão crítica em litro por segundo ($Q_{7,10}$ L/s) pela área da bacia.

A vazão de cada curso hídrico que compõe a sub-bacia (área de estudo) calculada pelos modelos ajustados da $Q_{7,10}$ e QMLP para os corpos hídricos da área de estudo segundo o HIDROTEC (2011) e calculados pela área de drenagem e descarga específica são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Modelos de vazão ajustados para os corpos hídricos da sub-bacia do Caratinga.

Curso hídrico	Área de drenagem (km²)	Vazão- rio/Q_{7,10} (m³/s)
Rio Caratinga	288,2	0,50
Córrego do Bertô	14,0	0,02
Ribeirão do Lage	93,5	0,15
Córrego Barra Alegre	22,0	0,11

Fonte: HIDROTEC (2011), adaptado pela Autora (2022).

Tabela 6: Vazões (QMLP) dos cursos hídricos que compõe a área de estudo.

Curso hídrico	Área de drenagem (km²)	Vazão- rio/QMLP (m³/s)
Rio Caratinga	288,2	3,74
Córrego do Bertô	14,0	0,19
Ribeirão do Lage	93,5	1,25
Córrego Barra Alegre	22,0	0,30

Fonte: HIDROTEC (2011), adaptado pela Autora (2022).

A vazão de cabeceira apresentada– (Tabela 7) foi adquirida por meio de consulta espacial disponibilizadas pelo HIDROTEC (2011). A vazão (Q_{7,10}) de cabeceira foi utilizada como dado de entrada do modelo.

Tabela 7: Vazão de cabeceira da área de estudo (m³/s).

Corpo hídrico	Vazão-cabeceira (Q_{7,10})
Rio Caratinga	0,388

Fonte: HIDROTEC (2011), adaptado pela Autora (2022).

d) Vazão incremental

Segundo Von Sperling (2014), a partir do ponto que se inicia a modelagem, e ao longo do seu percurso, o corpo hídrico geralmente recebe uma contribuição difusa, sem serem oriundos de tributários definidos. Estas vazões entram no curso d'água por drenagem direta, isto é, a bacia de contribuição drena para o curso d'água. Sendo assim, é importante calcular a vazão incremental para tornar a simulação mais realística.

Neste estudo, calculou-se a vazão incremental multiplicando -se a vazão específica pela área incremental e, dividindo-se pelo comprimento do rio, encontrou-se a vazão incremental em L/s, posteriormente transformou-se a vazão incremental de L/s para m³/s a cada 100 metros (0,1 km).

A vazão incremental foi calculada conforme a equação (1.5) abaixo:

$$q = \frac{Q_{esp} \cdot A_{incr}}{L} \quad \text{Equação 1.5}$$

Onde:

q = vazão incremental linear (L/s.km)

Q_{esp} = vazão específica (L/s.km²)

A_{incr} = área da bacia incremental (área de drenagem direta) no trecho considerado (km²)

L = comprimento do trecho com vazão incremental (km) (VON SPERLING, 2014).

A vazão incremental, calculada de acordo com a equação 1.5, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Vazão incremental do rio Caratinga- área de estudo

Corpo hídrico	Área de drenagem (km ²)	Vazão do rio (m ³ /s)	Comprimento do rio (km)	Q_{esp} (L/s.km ²)	A_{incr} (km ²)	Q_{incr} (m ³ /s)
Rio Caratinga	288,2	0,500	37,7	1,73	288,2	0,0013

Elaboração: Autora (2022).

5.4.1 Parâmetros Cinéticos

Uma reação de primeira ordem é aquela na qual a taxa de mudança da concentração de uma substância é proporcional à primeira potência da concentração (VON SPERLING, 2014).

A maior parte das reações ocorre de forma lenta, sendo a cinética é um importante fator na dinâmica dos rios. Os valores característicos dos coeficientes utilizados nas principais reações da modelagem matemática estão descritos na Tabela 9. Os coeficientes relacionados a remoção da DBO são:

- Desoxigenação (K_1): é o consumo de oxigênio e está associado aos mecanismos de decomposição da DBO;
- Decomposição (K_d): é o decréscimo da DBO e está relacionado aos mecanismos de remoção;
- Sedimentação (K_s): auxilia na remoção da DBO, mas não gera um correspondente consumo de oxigênio.

Tabela 9 -

Tabela 9: Valores característicos dos coeficientes de remoção de DBO (K_1 , K_S e K_d) (base e, 20°C).

Origem	K_1	Rios rasos		Rios profundos	
	(laboratório)	K_d	K_s	K_d	K_s
Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado	0,35-0,45	0,50-1,00	0,10-0,35	0,35-0,50	0,05-0,20
Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,20-0,40	0,40-0,80	0,05-0,25	0,30-0,45	0,00-0,15
Curso d'água recebendo efluente primário	0,30-0,40	0,40-0,80	0,05-0,10	0,30-0,45	0,00-0,05
Curso d'água recebendo efluente secundário	0,12-0,24	0,12-0,24	-	0,12-0,24	-
Curso d'água com águas limpas	0,08-0,20	0,08-0,20	-	0,08-0,20	-

Fonte: Von Sperling (2014), adaptado pela Autora (2022).

Nota: rios rasos: profundidade inferior a cerca de 1,0 ou 1,5 m; rios profundos: profundidade superior a cerca de 1,0 ou 1,5 m.

A reaeração está relacionada com a reposição do oxigênio no corpo d'água, e pode ser expressa pelo coeficiente de reaeração K_2 , que possibilita quantificar o processo de transferência de oxigênio da atmosfera para a água. O modelo QUAL-UFGM utiliza as equações apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12, para calcular o coeficiente de reaeração, adotando como resultado o de menor valor entre eles. Neste estudo utilizou-se a equação de Melching e Flores de 1999.

Tabela 10: Valores de coeficientes K_2 (d-1) segundo modelos baseados em dados hidráulicos do curso d'água (base e, 20°C).

Pesquisador	Fórmula	Faixa de aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,9 \cdot v^{0,5} \cdot H^{-1,5}$	$0,6m \leq H < 4,0m$ $0,05 \text{ m/s} \leq v < 0,8 \text{ m/s}$
Churchill et al (1962)	$5,0 \cdot v^{0,97} \cdot H^{-1,67}$	$0,6m \leq H < 4,0m$ $0,8 \text{ m/s} \leq v < 1,5 \text{ m/s}$
Owens et al (apud Branco, 1978; Chapra, 1997)	$5,3 \cdot v^{0,67} \cdot H^{-1,85}$	$0,1m \leq H < 0,6m$ $0,05 \text{ m/s} \leq v < 1,5 \text{ m/s}$

Notas: - v: velocidade do curso d'água (m/s); H: altura da lâmina d'água (m).

Fonte: Von Sperling (2014).

Tabela 11: Equações para estimativa do coeficiente K₂, segundo Tsvoglou e Wallace.

Tipo de curso d'água	Vazão (m ³ /s)	Equação para K ₂
Rios pequenos	0,03 m ³ /s < Q < 0,3 m ³ /s	K ₂ = 31,6 . v . i
Rios médios	0,3 m ³ /s < Q < 8,5 m ³ /s	K ₂ = 15,4 . v . i

Notas: - v: velocidade do curso d'água (m/s); - i: declividade do rio (m/m)

Fonte: Von Sperling (2014).

Tabela 12: Equações para estimativa do coeficiente K₂, segundo Melching e Flores (1999).

Tipo de curso d'água	Vazão (m ³ /s)	Equação para K ₂
Rios com poços e corredeiras	Q < 0,556 m ³ /s	K ₂ = 517 . (v.i) ^{0,524} . Q ^{-0,242}
	Q > 0,556 m ³ /s	K ₂ = 596 . (v.i) ^{0,528} . Q ^{-0,136}
Rios com controle de canal	Q < 0,556 m ³ /s	K ₂ = 88 . (v.i) ^{0,313} . H ^{0,353}
	Q > 0,556 m ³ /s	K ₂ = 142 . (v.i) ^{0,333} . H ^{-0,660} . B ^{-0,243}

Fonte: Von Sperling (2014).

Notas: - v: velocidade do curso d'água (m/s); - i: declividade do rio (m/m); - Q: vazão do rio (m³/s); - B: largura do rio (m); - H: profundidade (m).

A Tabela 13 apresenta os valores típicos dos coeficientes para a modelagem de *E. coli*

Tabela 13: Valores típicos dos coeficientes do modelo de Coliformes em rios.

Símbolo	Descrição	Unidade	Valores intermediários do coeficiente (20°C)	Coefficiente de temperatura Θ (adimensional)
K _b	Coef. de decaimento bacteriano	d ⁻¹	0,5 a 1,5	1,07

Fonte: Von Sperling (2014).

Já a Tabela 14 apresenta os valores típicos dos coeficientes de reação do ciclo de nitrogênio.

Tabela 14: Valores usuais dos coeficientes do modelo de Nitrogênio em rios.

Símbolo	Descrição	Uni.	Valores usuais do coeficiente (20°C)	Coeficiente de temperatura Θ (adimensional)
K_{so}	Coef. de sedimentação do N orgânico	d^{-1}	- Remansos: 0,10 - Rios lentos: águas naturais a moderadamente poluídas: 0,05; águas fortemente poluídas: 0,10 - Rios rápidos: águas naturais: 0,02; águas moderadamente poluídas: 0,05; águas fortemente poluídas: 0,10 - Corredeiras: 0,00	1,024
K_{oa}	Coef. de conversão do N orgânico em amônia	d^{-1}	0,20 a 0,25	1,047
K_{an}	Coef. de conversão da amônia a nitrito	d^{-1}	0,15 a 0,25	1,080
K_{nn}	Coef. de conversão do nitrito a nitrato	d^{-1}	- Cursos d'água profundos: 0,10 a 0,50 - Cursos d'água rasos: 0,20 a 1,00 ou mais - Segundo Thomanne Mueller: os valores de K_{an} são similares aos do coef. K_d (decomposição da DBO) incluindo a distinção entre rios rasos e profundos	1,047
S_{amon}	Fluxo de liberação de amônia pelo sedimento de fundo	$g/m^2.d$	0,00 a 0,50 (menores valores para rios rápidos e limpos)	1,074
f_{nitr}	Fator de correção do coeficiente de nitrificação em função do OD	-	$F_{nitr} = 1 - e^{-K_{nitrOD} \cdot OD}$	-
K_{nitrOD}	Coef. de inibição da nitrificação por baixo OD (equação de f_{nitr})	L/mg	0,60	-
R_{O2amon}	Relação entre o oxigênio consumido para cada unidade de amônia oxidada a nitrito	mgO_2/mgN_{amon}	3,2	-
$R_{O2nitri}$	Relação entre o oxigênio consumido para cada unidade de nitrito oxidado a nitrato	mgO_2/mgN_{nitri}	1,1	-

Fonte: Von Sperling (2014).

5.4.2 Lançamento de Esgotos domésticos e Carga Poluidora lançada

De acordo com Von Sperling (2018), os valores típicos de consumo de água per capita de população reportados na literatura (e considerados para esse trabalho) foram apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Faixas típicas do Consumo per capita de água - QPC utilizadas.

Faixa da população (hab)	Consumo per capita - QPC (L/hab.d)
< 5000	90 -140
5000 - 10000	100 -160
10000 - 50000	110 - 180
50000 - 250000	120 -220
> 250000	150 - 300

Fonte: Von Sperling, 2018, adaptado pela Autora (2022).

De acordo com Von Sperling (2018), a produção de esgotos corresponde aproximadamente ao consumo de água, no entanto, a fração de esgotos que adentra a rede coletora pode variar, devido a probabilidade de parte da água consumida ter sido incorporada à rede pluvial. Sendo assim, a fração de água fornecida que adentra a rede de coleta na forma de esgoto é denominada de coeficiente de retorno ($R = \text{vazão de esgoto} / \text{vazão de água}$). Os valores típicos variam de 40% a 100%, sendo que um valor usualmente adotado e que foi utilizado neste estudo tem sido o de 80% ($R=0,8$)

A partir dos valores de QPC apresentados no Tabela 15 e a população urbana de cada município, com uma taxa de retorno de 80% ($R=0,8$) e utilizando a equação 1.6 (VON SPERLING, 2018) tem-se:

$$Q_{dméd} = \left(\frac{Pop.QPC.R}{1000} \right) \text{ (m}^3\text{/d)} \quad \text{Equação 1.6}$$

dméd: média diária

Os valores das cargas poluidoras lançadas no rio Caratinga e nos tributários foram encontrados de acordo com a equação 1.7 de Von Sperling (VON SPERLING, 2014).

$$\text{carga (kg/d)} = \frac{\text{concentração(g/m}^3\text{)} \times \text{vazão(m}^3\text{/d)}}{1000(\text{g/kg})} \quad \text{Equação 1.7}$$

Obs.: $\text{g/m}^3 = \text{mg/L}$

5.4.3 Pontos de amostragem de Qualidade da água

Dados de qualidade da água são importantes para definir estratégias que busquem a conservação, a recuperação e o uso racional dos recursos, reduzindo conflitos e direcionando as atividades econômicas (IGAM, 2020). Na área de estudo, além do monitoramento realizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das águas - IGAM-MG, há também o automonitoramento realizado pela COPASA, no intuito de controlar o lançamento do efluente da ETE Caratinga.

Para esse trabalho, foram utilizados 4 pontos de monitoramento da área de estudo, sendo dois pontos monitorados pelo IGAM, e dois pontos de monitoramento pela COPASA.

A Tabela 16 descreve o código e operador, a descrição, a latitude e longitude e o nome de cada estação da área de estudo.

Tabela 16: Descrição das Estações Fluviométricas (ativas) de Monitoramento de Qualidade de Água localizadas na bacia hidrográfica do rio Caratinga- área de estudo.

Código operador	e Descrição	Latitude Graus decimais (°)	Longitude Graus decimais (°)	Nome da Estação
P1 - COPASA	Montante da ETE Caratinga	-19,738441	- 42,133250	Montante da ETE Caratinga
P2 - COPASA	Jusante da ETE Caratinga	-19,733817	- 42,133484	Jusante da ETE Caratinga
RD 056 - IGAM	Rio Caratinga a jusante do município de Caratinga	-19,726666	- 42,133055	Caratinga
RD 091 - IGAM	Próximo a nascente do rio Caratinga	-19,990000	-42,150000	Córrego do Pião

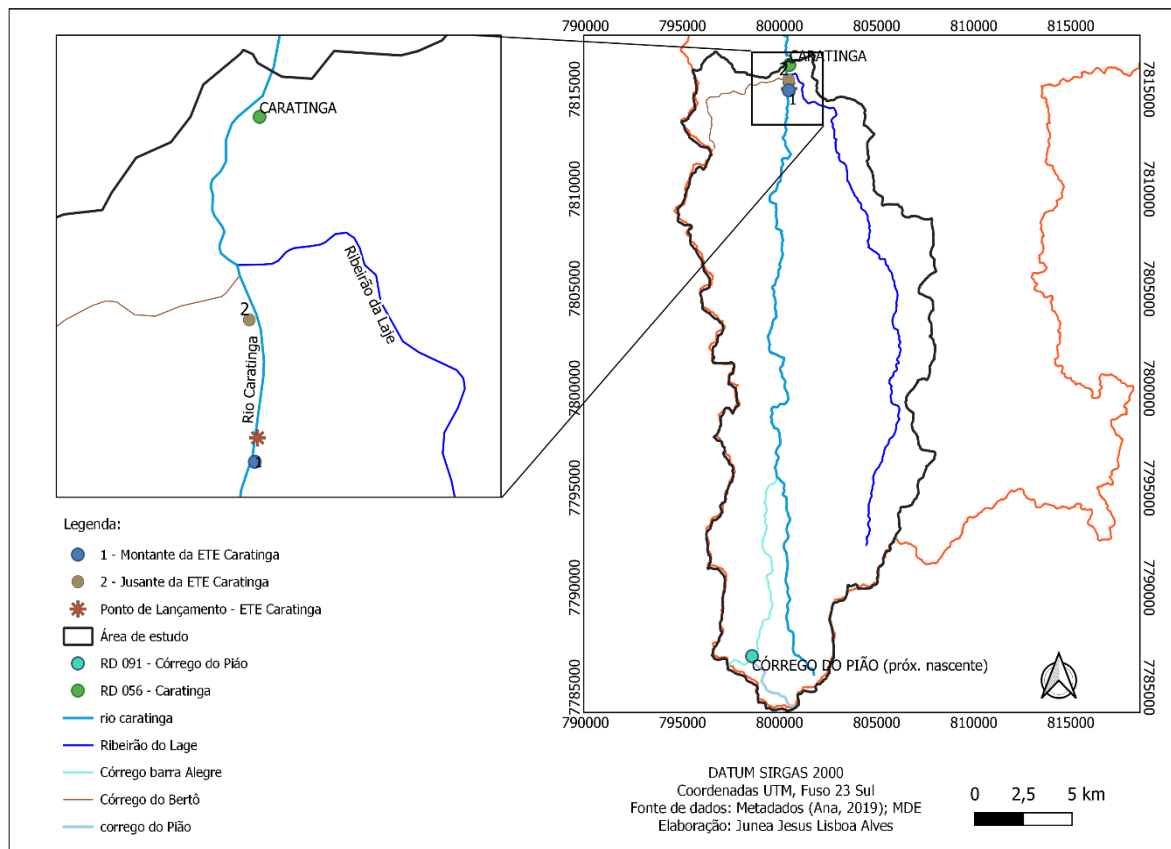
Fonte: IGAM (2020), HidroWeb (2020), COPASA (2021), adaptado pela Autora (2022).

5.4.4 Dados de Qualidade da água

Os dados de qualidade utilizados na modelagem, nesse estudo, são provenientes do monitoramento realizado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e das campanhas de monitoramento de qualidade da água do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). O monitoramento realizado pela COPASA e utilizado nesse estudo foram os dados obtidos nos meses de janeiro, abril e julho de 2020 e 2021. Já as campanhas realizadas pelo IGAM foram nos meses de janeiro, maio, julho e outubro de 2020 e 2021.

Foram utilizados quatro pontos/estação de monitoramento ao longo do rio Caratinga, sendo um a montante da ETE Caratinga (P1), outro a Jusante da ETE Caratinga (P2), monitorados pela COPASA e as Estações - RD 056 (Jusante do rio Caratinga) e RD 091 (Nascente do rio Caratinga) monitorados pelo IGAM, conforme Figura 7. Os quatro pontos de monitoramento de qualidade da água e o ponto de lançamento da ETE Caratinga na área de estudo são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Caratinga.



Fonte: Autoria própria (2022).

Além desses pontos (estações de monitoramento), foram identificados outros pontos na área de estudo, no entanto, todos eles encontravam-se com dados de qualidade da água incompletos e/ou desatualizados, não sendo possível a utilização neste estudo. Para a modelagem de qualidade da água, foram utilizados os dados dos anos de 2020 para a calibração e 2021 para a validação.

A Tabela 17 apresenta os valores médios e o desvio padrão (entre parênteses) utilizados na calibração e na validação da modelagem.

Tabela 17: Médias e desvio padrão (entre parênteses) dos dados da qualidade da água utilizados para a calibração e validação da modelagem matemática na área de estudo.

Estação	Período	DBO (mg/L)	OD (mg/L)
P1 Montante da ETE Caratinga	Calibração 2020	5,0 (0,4)	5,0 (1,3)
	Validação 2021	4,9 (1,4)	4,0 (0,2)
P2 Jusante da ETE Caratinga	Calibração 2020	5,0 (1,3)	5,0 (1,2)
	Validação 2021	5,0 (0,6)	4,0 (0,5)
RD 056 Jusante da ETE Caratinga	Calibração 2020	6,0 (1,2)	6,4 (1,0)
	Validação 2021	4,0 (0,8)	6,3 (1,4)
RD 091 Nascente do rio Caratinga	Calibração 2020	2,0 (0,0)	7,42 (0,4)
	Validação 2021	2,0 (0,0)	6,3 (1,0)

Fonte: IGAM (2021); COPASA (2020; 2021), adaptado pela Autora (2022).

5.5. Calibração e validação do modelo - modelagem de cenário atual

Para a modelagem do cenário atual, foi realizado o levantamento dos dados de monitoramento dos pontos a montante e a jusante da Estação de Tratamento de Caratinga, bem como da nascente do rio Caratinga dos anos de 2020 e 2021.

Foi elaborada uma planilha para o rio principal, no trecho que compreende a área de estudo, incluindo os lançamentos de esgotos das cidades de Santa Bárbara do Leste, Santa Rita de Minas e da ETE Caratinga e os principais tributários do rio Caratinga. Os dados dos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água foram inseridos nas planilhas nos campos correspondentes, e, dessa forma, foi realizada a modelagem do cenário atual.

A partir da modelagem do cenário atual, foi realizada a calibração do modelo, que consiste em ajustar os parâmetros e coeficientes das equações para que as características físicas, químicas e biológicas do rio sejam as mais realísticas, ou seja, aproximando os resultados da modelagem aos dados reais medidos.

Foi utilizado neste estudo o método de obtenção do Erro quadrático médio (RMEQ) ou RMSE em inglês (*root mean-square error*) (Fórmula 1.8) para a calibração e a validação. Segundo Von Sperling (2014), o RMEQ apresenta um bom comportamento estatístico proporcionando uma medição direta do erro do modelo e se RMEQ for dividida pela média da variável observada ($RMEQ / Y_{obsmed}$), ela dá uma magnitude relativa do erro.

Foi utilizado também o recurso Solver do Excel, conforme recomendado por Von Sperling (2014) para otimizar o ajuste do modelo.

$$RMEQ = \sqrt{\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (1.8)$$

Onde:

Y_{obs} = valor observado

Y_{est} = valor estimado

n = número de dados

A validação busca confirmar os ajustes dos coeficientes e dos parâmetros obtidos na calibração do modelo. Para a validação foram utilizados os dados de monitoramento de qualidade de água do IGAM e COPASA referentes ao ano de 2021.

5.6 Análise de incerteza e sensibilidade

De acordo com Von Sperling (2014) a análise de incerteza é realizada por meio da aplicação de um elevado número de simulações (Simulação Monte Carlo). Em cada execução do modelo, seleciona-se um conjunto diferente de valores dos dados de entrada sobre os quais existe a incerteza. O valor é gerado aleatoriamente, segundo uma distribuição e dentro de uma

faixa ou critérios pré-especificados. Analisa-se, posteriormente, os resultados obtidos, criando resultados em termos de probabilidade (VON SPERLING, 2014).

No presente trabalho foi utilizada a distribuição uniforme e para realizar a simulação de Monte Carlo, foi utilizada uma planilha do Excel (VON SPERLING, 2014).

Diante de cada rodada do modelo, inseriu-se um conjunto de dados de entrada, sobre os quais se tem incerteza, com os quais foi feita a simulação, obtendo-se os dados de saída de forma convencional, e assim sucessivamente até completar o número de rodadas determinado, que, neste trabalho, foram 1000 rodadas.

Foram utilizados os pontos, inicial (RD 091) e o ponto a jusante da ETE Caratinga (P2) para a simulação do rio Caratinga.

Já a análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar o grau de influência de dados de entrada no resultado do modelo e assim definir em quais parâmetros do modelo os recursos técnicos e financeiros devem ser investidos. Neste trabalho, realizou-se a análise de sensibilidade, na qual simulou o modelo com valores diferentes do valor original para os dados de entrada da vazão e da temperatura para todos os parâmetros avaliados neste estudo (DBO e OD).

5.7 Simulação de cenários futuros

Os cenários simulados tiveram como referência os dados oriundos da COPASA-MG e do IGAM.

Em relação ao esgotamento sanitário, os dados foram obtidos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD, 2021) e no relatório do Atlas Esgoto da ANA (ANA, 2017). A Tabela 18 apresenta os índices de coleta e tratamento de esgoto dos municípios inseridos na área de estudo. Para os cálculos das populações dos municípios pertencentes a sub-bacia do rio Caratinga e que efetuam lançamento de esgotos brutos ou tratados no rio Caratinga levou-se em consideração os dados do total de habitantes de acordo com o IBGE dos Censos dos anos 2010 e 2022. Para estimar a população dos municípios no ano de 2033 e 2041 realizou-se uma projeção populacional através do método aritmético, conforme apresentado no Tabela 18.

O ano de 2033 foi adotado nesse estudo em virtude do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2019) que prevê um atendimento de 98% dos domicílios (urbanos) da região sudeste até 2033 e do novo Marco Regulatório do Saneamento Básico (Lei 14.026/2020). O Novo Marco Regulatório do Saneamento básico estabelece critérios no intuito de atingir a

cobertura de água e a coleta e tratamento de esgoto. Já o ano de 2041 foi inserido em virtude da meta estipulada pelo Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais PESB (2022) que é levar acesso adequado aos serviços de saneamento a 100% da população mineira até 2041.

De acordo com a lei 14.026/2020 as metas de atendimento são de 99% da população com água potável e 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020). Nesse sentido, estudos referentes a qualidade da água são de suma importância para o gerenciamento dos recursos hídricos e o alcance da universalização do saneamento básico.

Tabela 18: Índices de esgotamento sanitário dos municípios da área de estudo.

Municípios	Censo IBGE		Projeção Populacional aritmética (2033)	% da População urbana atendida por	
	População (2010)	População (2022)		Tratamento de esgoto (2021)	Coleta de esgoto (2021)
Caratinga	85.239	88.311	91.127	68	71
Santa Rita de Minas	6.547	6.214	5.909	0	86
Santa Bárbara do Leste	7.682	7.990	8.272	0	69

Fonte: IBGE (2010, 2022); SEMAD (2021); adaptado pela Autora

Verifica-se que apenas um dos municípios que se encontram inseridos totalmente na área de estudo possuem tratamento de esgoto. Todos os municípios possuem coleta de esgoto, sendo a média para a bacia de coleta sem tratamento de 75,33%.

O primeiro cenário proposto para a simulação utiliza os dados adquiridos pela COPASA-MG do monitoramento realizado para o esgoto bruto (antes do tratamento de esgoto) e os dados após o tratamento de esgoto, conforme tabela 19.

Tabela 19: Valores das concentrações dos parâmetros físicos e químicos no esgoto utilizados na modelagem matemática.

Parâmetro	DBO ₅ (mg/L)	N-Amon (mg/L)	O ₂ (mg/L)
Faixa-esgoto bruto	240 - 400	20 - 35	0-2

Concentração (mg/L)	Esgoto tratado UASB+Filtro biológico	-	>15	-
	DBO da ETE Caratinga	Afluente da ETE Caratinga	244	-
		Efluente da ETE Caratinga	47	

Fonte: Von Sperling, 2014; COPASA (2021), adaptado pela Autora (2022).

O segundo cenário proposto simula as diferentes porcentagens (60% e 90%) de eficiência da ETE Caratinga para remoção da DBO. Já o terceiro cenário simula a qualidade da água do rio Caratinga para os anos de 2033 e 2041, levando em consideração o aumento da população.

O município de Caratinga conta com uma população de 88.311 habitantes (IBGE, 2022) e segundo a SEMAD (2021) aproximadamente 70% do esgoto produzido pelo município recebe o devido tratamento.

De acordo com dados da Concessionária responsável pelo monitoramento da ETE Caratinga, a vazão média diária que é lançada no rio Caratinga é 50 L/s. A estação de tratamento de esgoto é composta por um sistema de reatores anaeróbios de manta de fluxo ascendente (UASB) seguido de filtros biológicos percoladores e decantadores secundários. De acordo com dados da COPASA (2021) a eficiência da ETE Caratinga no ano de 2020 ficou em torno de 81% em relação a remoção de DBO.

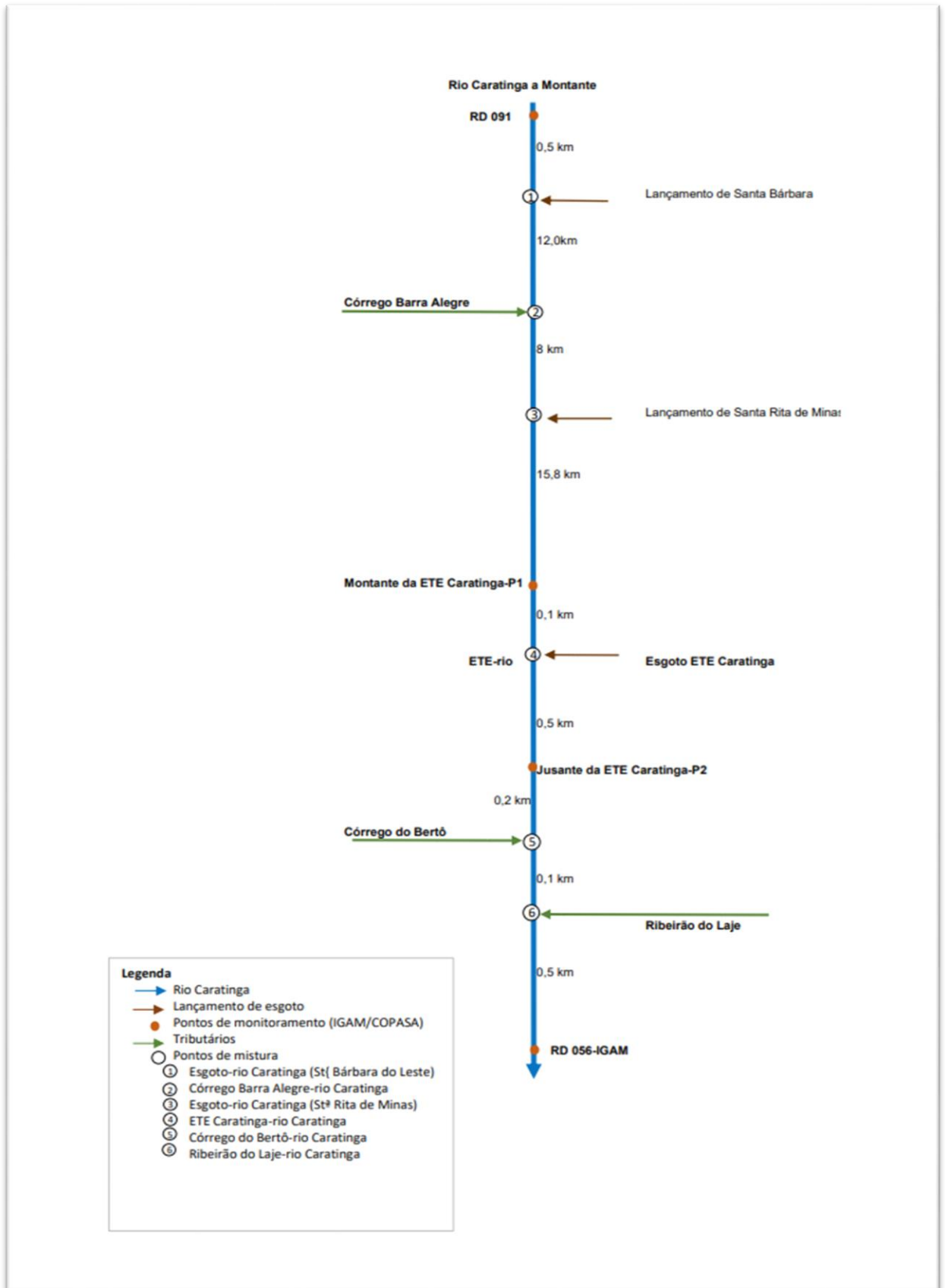
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Diagrama Unifilar

Foi utilizado o Software QGis, para definir os pontos de lançamentos, bem como a distância de cada ponto. Com essas informações, foi possível confeccionar o Diagrama Unifilar, que é a representação do sistema em estudo. Elaborou-se o diagrama unifilar, com a representação do rio principal, seus afluentes, os pontos de lançamento de esgotos dos municípios de Santa Rita de Minas, Santa Bárbara do Leste, ETE Caratinga e de vilarejos próximos ao Ribeirão do Laje, conforme ilustrado na Figura 8.

Observa-se, por meio do diagrama unifilar, a identificação de quatro pontos de monitoramento de qualidade da água no rio Caratinga (RD091, Montante da ETE, Jusante da ETE e RD 056). No diagrama unifilar está representado também os pontos de misturas (esgoto-rio e afluente-rio). Dos três municípios inseridos na área de estudo, apenas o município de Caratinga possui Estação de tratamento de esgoto. De acordo o Atlas esgoto, ANA (2017), o esgoto da cidade de Santa Rita de Minas é lançado *in-natura* no rio Caratinga.

Figura 8 - Diagrama unifilar do rio Caratinga no trecho modelado - área de estudo.



Elaboração: Autora (2023).

6.2 Declividade e perfil longitudinal- área de estudo

A partir do MDE, foi gerado o perfil longitudinal do trecho do rio Caratinga da área de estudo apresentado na Figura 9. A declividade do rio Caratinga foi calculada considerando todo o trecho, pois observou-se que o trecho em estudo é relativamente homogêneo entre si. O resultado da declividade é apresentado na Tabela 20. A declividade da bacia pode contribuir com o escoamento superficial e o carreamento de solos desprotegidos de vegetação e, além disso, é utilizada na definição dos coeficientes hidráulicos.

Figura 9 - Perfil Longitudinal do trecho do rio Caratinga-área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 20: Declividade de cada trecho em m/m.

Corpo Hídrico	Cota início-cota final	Intervalo	Declividade (m/m)
Rio Caratinga	820-560	da nascente até o km 37	0,0070

Fonte: Autora (2022).

*declividade: (cota início – cota final/distância trecho (m))

6.3 Vazão de lançamento de esgoto pelos municípios inseridos na área de estudo e Cargas poluidoras

Realizou-se a estimativa da vazão de lançamento de esgotos dos municípios de Caratinga, Santa Rita de Minas e Santa Bárbara do Leste. Foram utilizados dados das populações referentes aos anos de 2022 (IBGE, 2022) e da estimativa calculada (projeção populacional aritmética) a partir de dados do censo do 2010 e 2022 do IBGE para o ano de 2023. As Tabelas 21 a 23 apresentam os resultados da equação 1.6 para o lançamento de esgotos dos anos 2022, 2033 e 2041.

Tabela 21: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2022.

Município	População Urbana (2022)	QPC	R	Lançamento (m ³ /s)	Lançamento (m ³ /d)	Lançamento (L/s)
Caratinga	88.311	120	0,8	0,0981	8.477,85	98,1
Santa Rita de Minas	6.214	100	0,8	0,0057	497,12	5,7
Santa Bárbara do Leste	7.990	100	0,8	0,0073	639,20	7,3

Fonte: Elaborado pela Autora (2023) a partir de dados de IBGE (2010; 2022). Von Sperling (2014).

Tabela 22: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2033.

Município	População Urbana (2033)	QPC	R	Lançamento (m ³ /s)	Lançamento (m ³ /d)	Lançamento (L/s)
Caratinga	91.127	120	0,8	0,1012	8.748,19	101,25
Santa Rita de Minas	5.909	100	0,8	0,0054	472,72	5,47
Santa Bárbara do Leste	8.272	100	0,8	0,0076	661,76	7,65

Fonte: Elaborado pela Autora (2023) a partir de dados de IBGE (2010; 2022). Von Sperling (2014).

Tabela 23: Estimativa da vazão de lançamento de esgoto pelos municípios para o ano de 2041.

Município	População Urbana (2041)	QPC	R	Lançamento (m ³ /s)	Lançamento (m ³ /d)	Lançamento (L/s)
Caratinga	93.175	120	0,8	0,1035	8.944,8	103,52
Santa Rita de Minas	5.687	100	0,8	0,0052	454,96	5,26
Santa Bárbara do Leste	8.478	100	0,8	0,0078	678,24	7,85

Fonte: Elaborado pela Autora (2023) a partir de dados de IBGE (2010; 2022). Von Sperling (2014).

O município de maior porte (Caratinga) apresentou a maior contribuição na vazão do lançamento de esgoto, enquanto a menor contribuição foi do município de Santa Rita de Minas.

O município de Santa Bárbara do Leste possui 69,4% do seu esgoto coletado, mas não é tratado e 30,2% não é tratado e nem coletado. O município de Santa Rita de Minas possui 86,5% do seu esgoto coletado, mas não é tratado e 12,9% não é tratado e nem coletado (ANA, 2017).

De acordo com Von Sperling (2018) para avaliação e análise do impacto da poluição e da eficácia das medidas de controle, é necessária a quantificação das cargas poluidoras afluentes ao corpo d'água. A variação das cargas poluidoras relacionou-se com as vazões do esgoto e o porte do município. Dessa forma, o município de Caratinga apresentou valor maior de cargas poluidoras, seguido por Santa Bárbara de Leste e Santa Rita de Minas. A carga foi estimada pela relação entre a população e a carga per capita, Tabela 24. Utilizou-se valores de literatura conforme Von Sperling (2018).

Sendo:

- 54 g/hab.d para DBO
- 3,5 g/hab.d para N orgânico
- 4,5 g/hab.d para N amoniacal

Tabela 24: Cargas poluidoras estimadas para o ano de 2022.

Municípios	População urbana-2022	Carga DBO (kg/dia)	Carga N orgânico (kg/dia)	Carga N amoniacal (kg/dia)
Caratinga	88.311	4.768,8	309,08	397,39
Santa Rita de Minas	6.214	335,55	21,74	27,96
Santa Bárbara do Leste	7.990	431,46	27,96	35,95

Fonte: Elaborado pela Autora (2023) a partir de dados de IBGE (2010; 2022). Von Sperling (2014).

6.4 Modelagem de Cenário Atual, Calibração e Validação do Modelo

Os coeficientes calibrados, com auxílio da ferramenta solver, para a modelagem do rio Caratinga são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25: Valores dos coeficientes calibrados para a modelagem do rio Caratinga.

Coeficiente (1/d)	Rio Caratinga
K_1	0,12
K_d	0,15
K_s	0,20
K_{so}	0,06
K_{oa}	5,27
K_{an}	0,32

Elaboração: Autoria própria (2023).

O valor de 0,12 para o coeficiente K_1 se deu, provavelmente, devido a presença do lançamento de esgoto tratado no trecho do rio modelado. Efluentes tratados são considerados substâncias inibidoras, pois possuem uma taxa de degradação lenta. Isso ocorre devido à estabilização vagarosa do que resta do tratamento, já que a matéria orgânica facilmente assimilada foi removida (VON SPERLING, 2018). O valor calibrado de K_1 encontra-se dentro da faixa esperada (faixa de 0,12 a 0,24) para cursos d'água que recebem esgoto secundário de acordo com Von Sperling (2018). O coeficiente de decomposição (K_d) teve um valor de 0,15 demonstrando estar dentro do intervalo (faixa de 0,12 a 0,24) estabelecido para tratamento secundário.

A calibração e validação do modelo foram realizadas pelo método RMEQ, e a Tabela 26 apresenta os resultados do índice para o rio Caratinga. O índice RMEQ avalia a diferença entre os valores observados e estimados, e quanto mais próximo de zero o resultado, maior a semelhança entre eles.

Tabela 26: Resultado do índice RMEQ para a calibração e validação do modelo para o rio Caratinga.

Parâmetro	Rio Caratinga	
	Calibração	Validação
DBO	0,66	1,07
OD	0,66	1,50

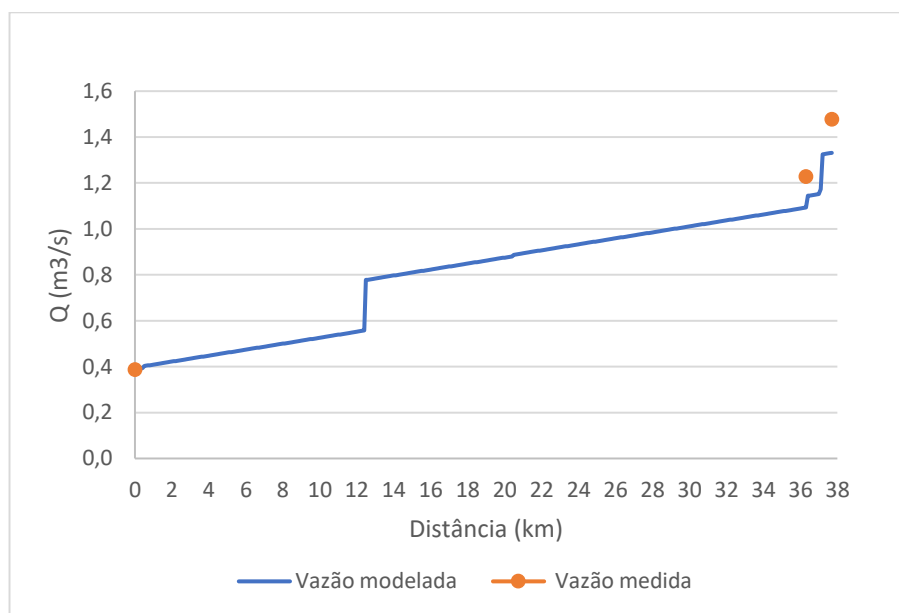
Elaboração: Autoria própria (2023).

Na calibração do rio Caratinga, tanto a DBO quanto o OD apresentaram resultados RMEQ de 0,66 para a calibração. Já para a validação o OD apresentou o valor de 1,50 e a DBO de 1,07. A existência de mais pontos de monitoramento ao longo do rio poderia contribuir para uma melhor calibração do modelo.

A Figura 10 apresenta a modelagem da vazão para o rio Caratinga. As vazões modeladas foram comparadas com vazões $Q_{7,10}$ disponíveis no Hidrotec e/ou vazões estimadas pela COPASA, nos pontos de monitoramento do rio Caratinga. O perfil de vazão do rio Caratinga apresentou os maiores aumentos de vazões logo após o encontro dos afluentes no rio Caratinga e após os lançamentos de esgotos.

No rio Caratinga, há dois pontos principais de acréscimo de vazão. No ponto, no km 12,5 e 37,2, são onde o Córrego Barra Alegre e Ribeirão do Lage, respectivamente, se encontram com o rio Caratinga, como mostrado no Diagrama Unifilar na Figura 8.

Figura 10 - Perfil da vazão modelada do rio Caratinga



Elaboração: Autoria própria (2023).

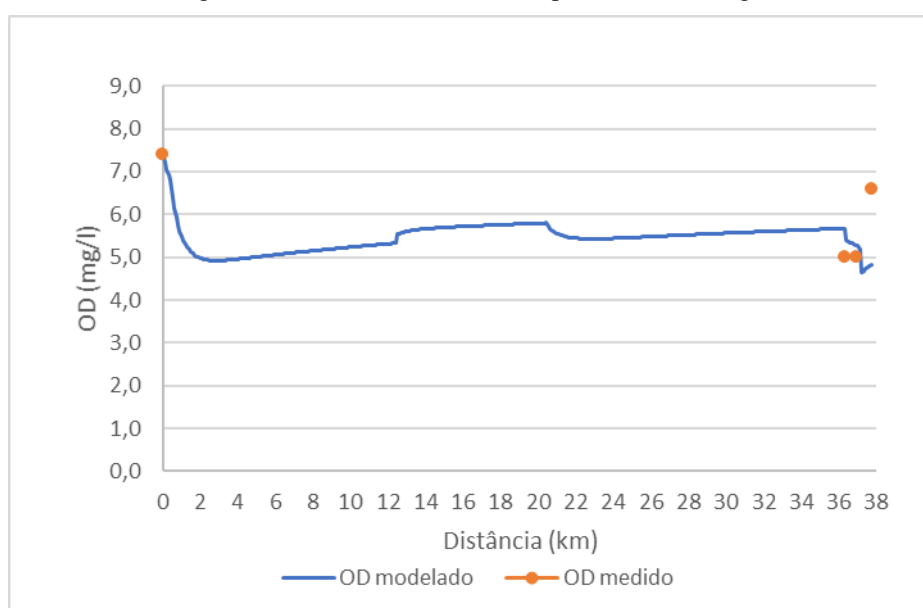
A Figura 11 mostra o comportamento do OD ao longo do rio Caratinga. Os valores estimados pelo modelo (OD modelado) são comparados com os valores observados nas estações e pontos de monitoramento (OD medido).

A concentração de OD (modelado) se mantém dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos classe 2, de igual ou maior que 5 mg.L^{-1} , em 90,5 % do trecho modelado, Figura 13. A menor concentração de OD ocorre no encontro do Ribeirão do Lage no rio Caratinga, km 37,2, o OD chega a uma concentração de $4,6 \text{ mg.L}^{-1}$

Já no km 36,3, local do lançamento do efluente da ETE Caratinga no rio Caratinga, o OD fica em torno de $5,4 \text{ mg.L}^{-1}$.

A curva da modelagem apresentou um melhor ajuste para o segundo e o terceiro ponto de monitoramento, ou seja, no ponto P1, monitorado pela COPASA, o OD ficou em torno de 5,7 na modelagem e 5,0 nos dados medidos e no ponto P2, também monitorado pela COPASA, a concentração de OD foi de 5,3 para o OD modelado e 5,0 para o OD medido. Segundo Von Sperling (2018) a altitude e temperatura causam variação na solubilidade do OD.

Figura 11 - Perfil do OD calibrado para o rio Caratinga.

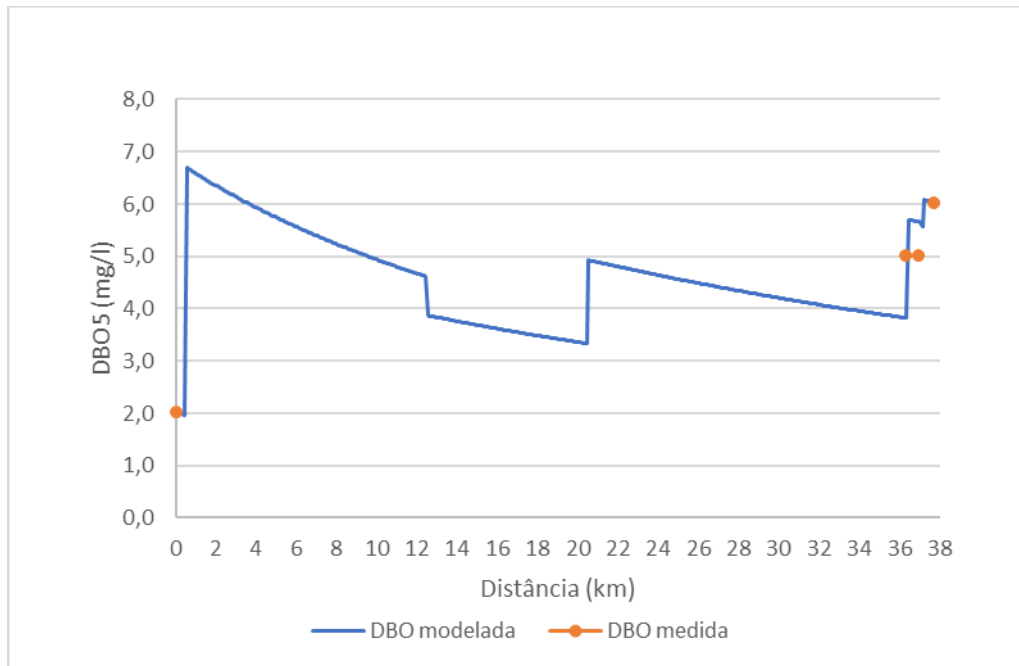


Elaboração: Autoria própria (2023).

O resultado da calibração da DBO para o rio Caratinga é apresentado na Figura 12. O ponto de monitoramento P1, localizado no km 36,3 apresentou para a DBO medida concentração de $5,0 \text{ mg.L}^{-1}$ e para a DBO modelada concentrações de $3,8 \text{ mg.L}^{-1}$. Já o ponto P2, localizado no km 36,9, apresentou para a DBO modelada e medida concentrações de $5,7 \text{ mg.L}^{-1}$ e $5,0 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente. A estação de monitoramento RD 056, localizada no Km 37,7 apresentou concentrações de DBO medida e modelada de $6,0 \text{ mg.L}^{-1}$. Esse aumento, ocorreu, provavelmente, devido à carga de DBO lançada no rio Caratinga pelo seu afluente (Ribeirão do Laje). Santos (2002) informa que os vilarejos e residências ao longo da bacia do Ribeirão do Laje lançam todos os efluentes domésticos *in-natura* nos cursos d'água, inclusive o distrito de Santa Luzia. Observa-se que no km 36,4 onde ocorre o lançamento pontual de esgoto da ETE Caratinga, ocorreu um aumento na DBO modelada. Pode-se considerar que a curva modelada teve um bom ajuste aos pontos medidos, uma vez que as concentrações ficaram

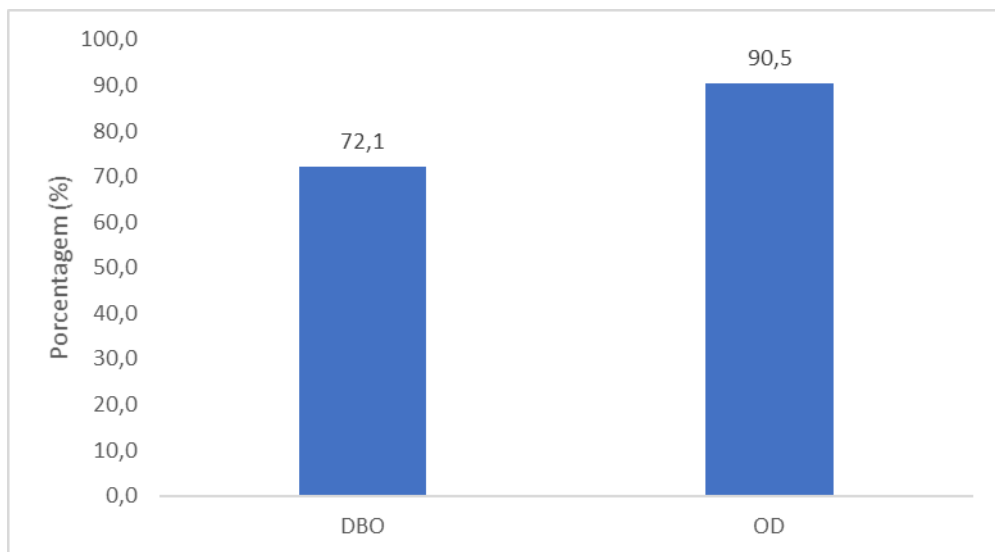
bem próximas e o maior desvio foi no ponto a montante do lançamento de esgoto da ETE Caratinga, com uma diferença entre os valores medidos e modelados de 1,2. A DBO medida no rio Caratinga manteve-se dentro dos limites estabelecidos em 72,1% pela CONAMA 357/2005 para rios classe 2, conforme Figura 13.

Figura 12 - Gráfico de calibração da DBO.



Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 13 - Extensão do trecho dentro dos padrões de lançamento-classe 2- Resolução CONAMA 357/2005

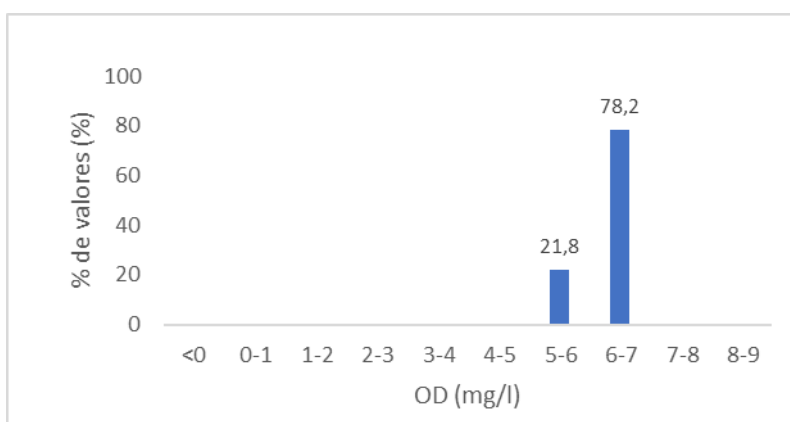


Elaboração: Autoria própria (2023).

6.5 Análises de incerteza e de sensibilidade

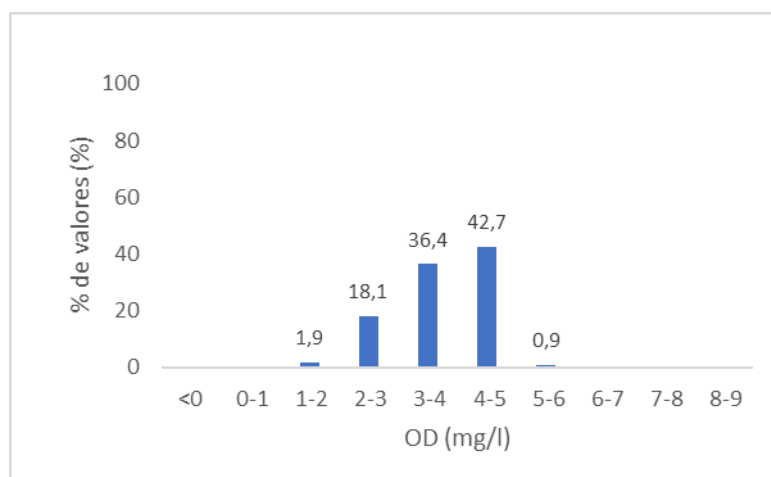
A incerteza dos dados de entrada é analisada com base em alguns erros possíveis como na estimativa de um dado de entrada, amostragem, medição, calibração ou análise de laboratório, dentre outros. Neste estudo, a análise da incerteza foi realizada por meio da simulação de Monte Carlo e avaliou-se o comportamento da variável OD em relação ao atendimento à resolução CONAMA 357/2005. Para o rio Caratinga foi aplicado na altura das duas estações de monitoramento (RD 091 e P2) conforme Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Distribuição de frequência de OD - rio Caratinga - RD 091.



Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 15 - Distribuição de frequência de OD - rio Caratinga- P2.



Elaboração: Autoria própria (2023).

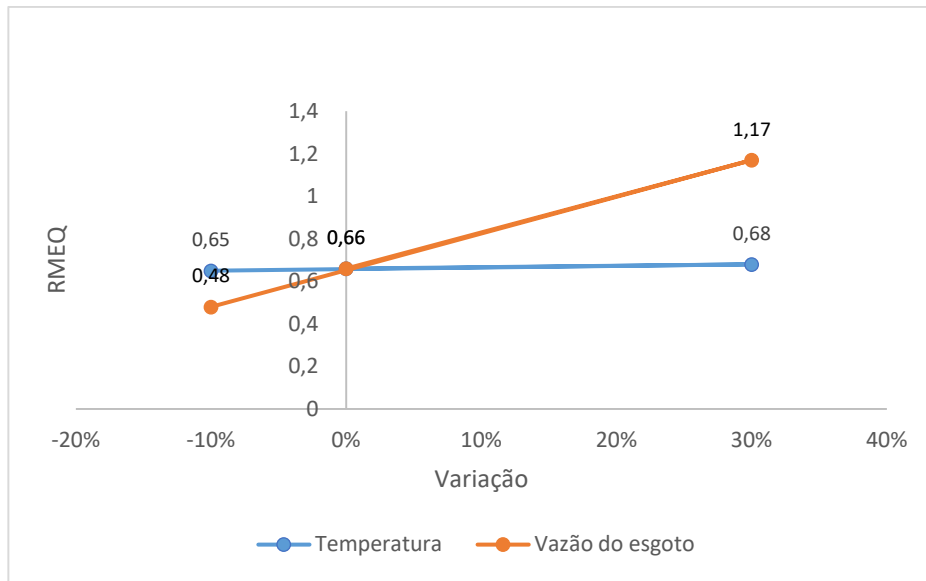
No primeiro ponto simulado, início do trecho (RD091), apresentado na Figura 14, a análise de incerteza indicou que a probabilidade de 21,8 % do resultado ficar entre a faixa 5-6 mg.L⁻¹, 78,2% entre 6-7 mg.L⁻¹. Na modelagem matemática o resultado encontrado para esse ponto foi de 7 mg.L⁻¹. No segundo ponto (P2), Figura 15, a probabilidade foi de 0,9% ficar entre 5-6 mg.L⁻¹, 42,7 entre 4-5 mg.L⁻¹, 36,4% entre 3-4 mg.L⁻¹ e 18,1% entre 2-3 mg.L⁻¹. Na calibração do modelo o valor modelado foi de 5,3 mg.L⁻¹. Entretanto, para os pontos subsequentes esses valores estiveram na faixa de 4,8 a 4,9 mg.L⁻¹.

Realizou-se análise de sensibilidade em relação a variação da vazão do esgoto e da temperatura para todas as variáveis modeladas (DBO e OD) em relação ao RMEQ.

Para a DBO, ao diminuir o valor da vazão de esgoto em 10% houve redução do valor do RMEQ em 27%, indo de 0,66 para 0,48, Figura 16. Para a temperatura, a diminuição em 10% não alterou significativamente o RMEQ para a DBO, que passou de 0,66 para 0,65, enquanto para o OD, o RMEQ passou de 0,66 para 1,59. Já no aumento da temperatura em 30% o RMEQ para DBO passou de 0,66 para 0,68 e do OD de 0,66 para 4,99, Figura 17. A temperatura interfere diretamente na disponibilidade de OD na água. O aumento da temperatura diminui a concentração de OD. Não houve alteração no valor do RMEQ para o OD ao diminuir a vazão do esgoto em 10%.

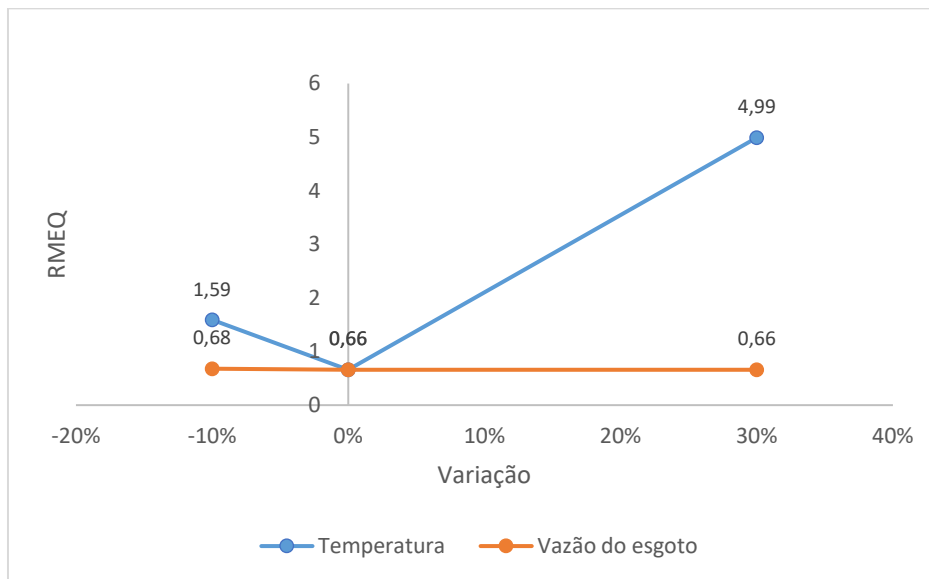
Ao aumentar a vazão de esgoto (30%), aumenta também a estimativa da carga orgânica lançada e, conseqüentemente, o valor do RMEQ também aumentou, passou de 0,66 para 1,17 para DBO. Já para o OD não houve alterações significativas, conforme Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Análise de sensibilidade para a variável DBO em relação ao RMEQ.



Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 17 - Análise de sensibilidade para a variável OD em relação ao RMEQ.



Elaboração: Autoria própria (2023).

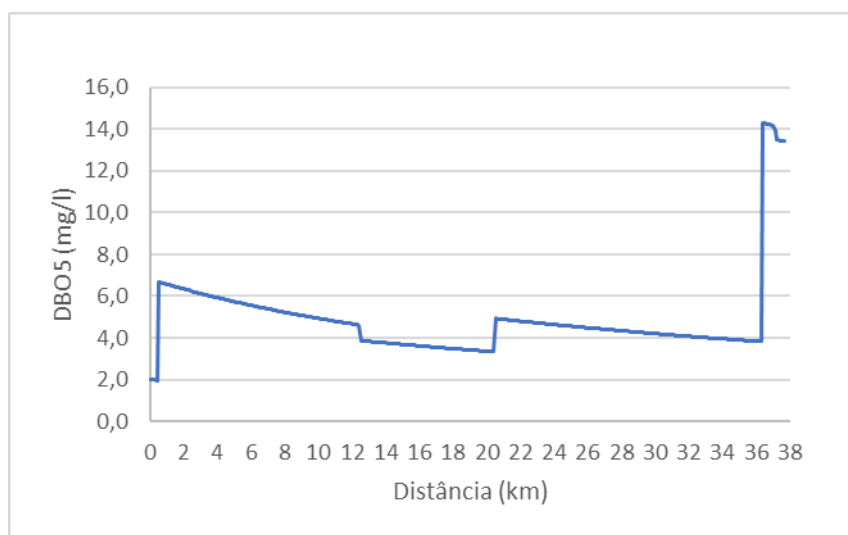
6.6 Simulação de cenários

A simulação de cenários para o rio Caratinga se baseou em propostas de implantação e eficiência da ETE Caratinga e, conseqüentemente, a redução das cargas dos poluentes que são lançados e o enquadramento conforme a Resolução CONAMA 357/2005 para classe 2.

No Cenário 1, Figura 18, foram simulados, por meio de dados de monitoramento da COPASA para o rio Caratinga, cenários pré e pós a implantação da ETE Caratinga. No cenário 2, foram simulados a eficiência da ETE Caratinga para 60% e 90% e no cenário 3, aumento da carga poluidora para os anos de 2033 e 2041.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações dos cenários.

Figura 18 - Simulação do cenário 1 – Concentração da DBO - pré-instalação da ETE Caratinga.



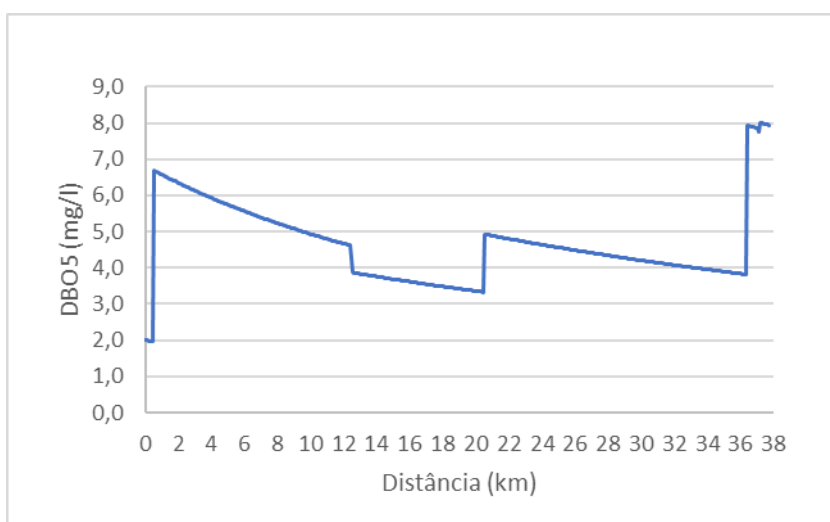
Elaboração: Autoria própria (2023).

A simulação da variável DBO para o rio Caratinga, apresentada na Figura 18, mostra o cenário anterior a instalação da ETE Caratinga, com um pico de concentração de DBO de 14,3 mg/l. Houve uma diminuição na concentração de DBO com o tratamento do efluente (pós ETE Caratinga) em relação ao cenário anterior (pré ETE Caratinga), porém, mesmo com os tratamentos propostos, a concentração de DBO a partir do km 37,2, não atendeu ao valor mínimo de 5 mg.L⁻¹ estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, implicando uma necessidade de verificar o impacto oriundo dos afluentes do rio Caratinga no referido rio, uma vez que o maior aumento ocorreu logo após o encontro do afluente Ribeirão do Laje no rio Caratinga. É importante analisar, também a possibilidade do aumento da eficiência da ETE Caratinga, uma vez, que mesmo a eficiência da ETE estando acima do valor mínimo (60% eficiência da remoção da DBO) estipulado pela Resolução CONAMA 430/2011, o valor

mínimo da DBO (modelado) a jusante do lançamento foi de 5,6 mg.L⁻¹, já a DBO medida foi de 5 mg.L⁻¹.

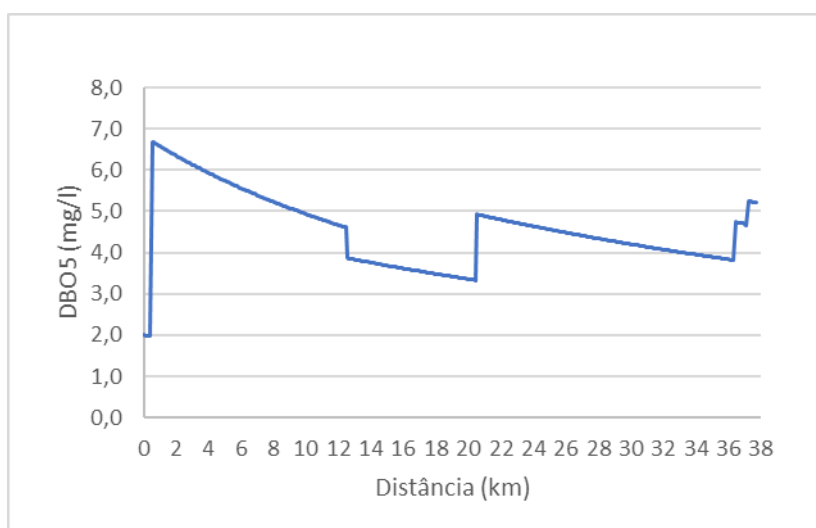
Com a simulação (cenário 2) do efluente para uma eficiência de remoção da DBO de 60% pode se observar que o rio ficou com uma alta concentração de DBO em todo o trecho após o lançamento de esgotos da ETE Caratinga, Figuras 19. De acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 a remoção mínima da DBO é de 60%. Já para a simulação de uma eficiência de remoção de DBO de 90% verifica-se que a concentração da DBO chegou a 5,2 mg.L⁻¹ no km 37,3 onde ocorre encontro do afluente Ribeirão do Laje no rio Caratinga.

Figura 19 - Simulação do cenário 2 - Eficiência da remoção da DBO de 60% - ETE Caratinga.



Elaboração: Autoria própria (2023).

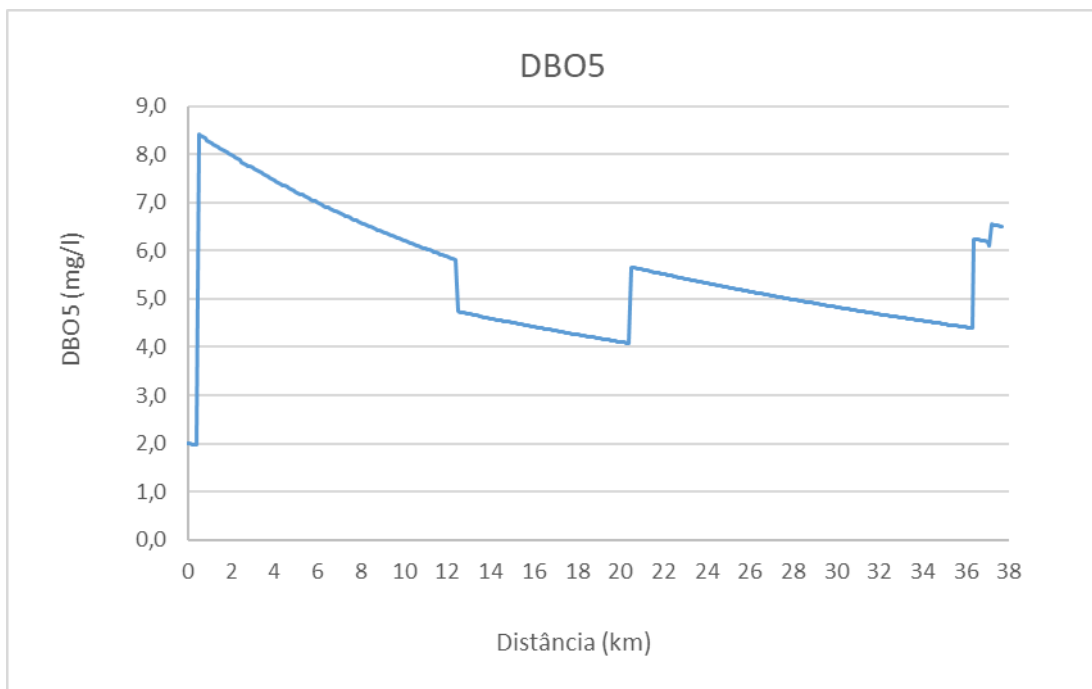
Figura 20 - Simulação do cenário 2 - Eficiência da remoção da DBO de 90% - ETE Caratinga.



Elaboração: Autoria própria (2023).

As Figuras 21, 22, 23 e 24 apresentam o perfil da demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido ao longo do trecho do rio Caratinga. Comparando o comportamento dessas variáveis em um cenário atual e em cenários projetados para 2033 e 2041 (cenário 3) em que se leva em conta o aumento da população e, conseqüentemente, o aumento do lançamento de esgotos no rio Caratinga. De acordo com o IBGE (2022) ocorrerá um decaimento da população de Santa Rita de Minas para cenários futuros, entretanto, mesmo com a diminuição do lançamento de esgoto do município de Santa Rita de Minas, a concentração da DBO chega a 6,8 mg/l no km 20. Isso se dá em virtude do aumento da concentração de esgoto da cidade de Santa Bárbara do Leste anteriormente.

Figura 21 - Simulação do cenário 3 –projecção da concentração da DBO para 2033.



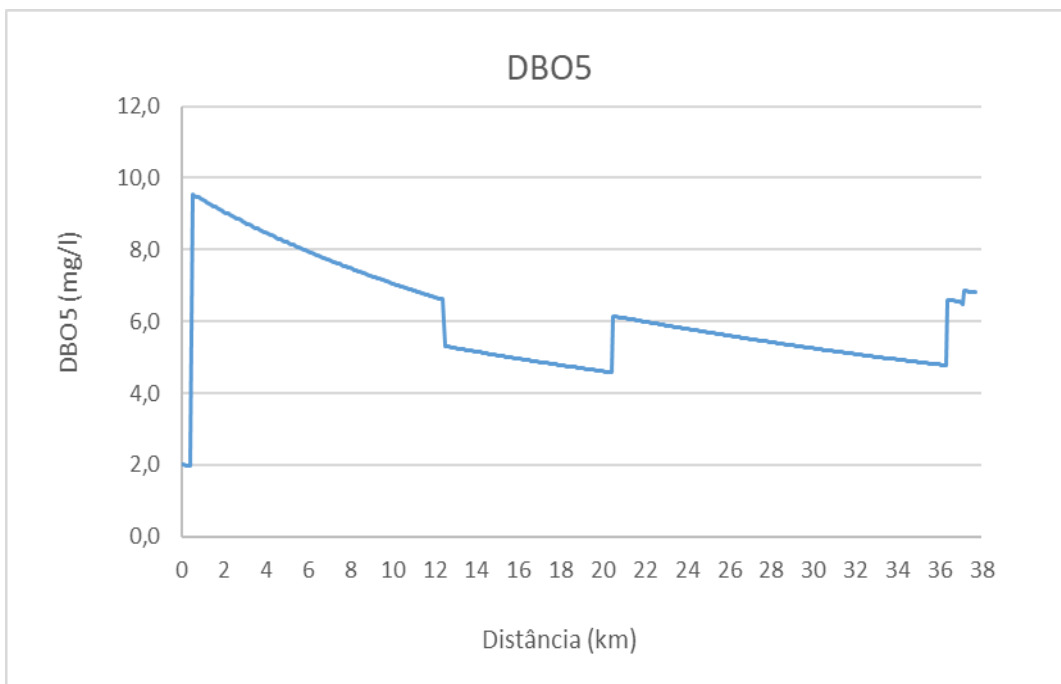
Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 22 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da OD para 2033.



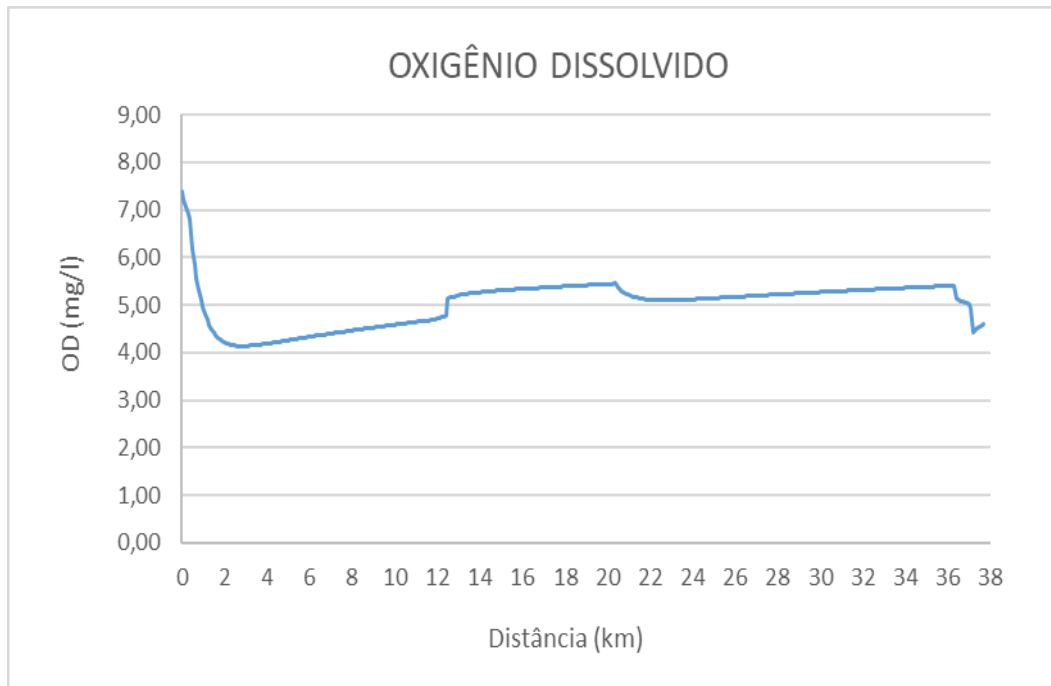
Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 23 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da DBO para 2041.



Elaboração: Autoria própria (2023).

Figura 24 - Simulação do cenário 3 –projeção da concentração da OD para 2041.

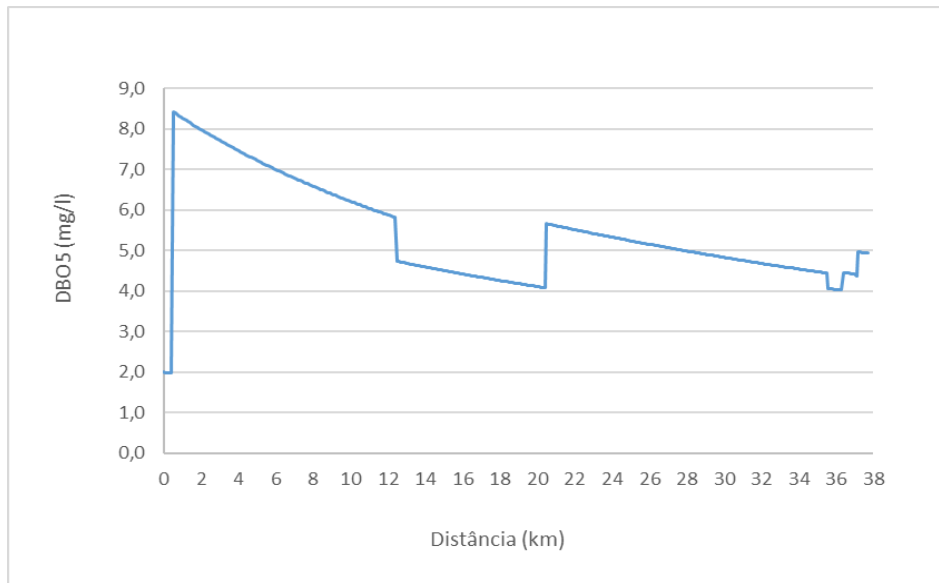


Elaboração: Autoria própria (2023).

Os resultados das simulações para os anos de 2033 e 2041 para os parâmetros DBO e o OD mostram que nos dois cenários de projeção, a DBO se mantém fora dos limites estabelecidos para a Resolução CONAMA 357/05 em mais de 90% do trecho modelado.

Além dos cenários propostos, foi realizado também, cenários para verificar qual a eficiência necessária da ETE Caratinga para atender o enquadramento de classe 2 da Resolução CONAMA 357/05, para cenários de 2033, a partir do km 36,4 (lançamento da ETE Caratinga). Diante das simulações, verificou-se que a eficiência mínima para atendimento ao CONAMA 357/05 em 2033, com a mesma estrutura da ETE instalada, atualmente, é de no mínimo 94% de eficiência da remoção da DBO, Figura 25.

Figura 25 – Eficiência necessária para enquadramento-Classe 2 – CONAMA 357/05- 2033.



Elaboração: Autoria própria (2023).

De forma geral, as simulações propostas mostraram resultados importantes em relação ao rio Caratinga e o impacto da ETE Caratinga na qualidade de água do referido rio. Verificou-se que o Ribeirão do Laje pode estar contribuindo no aumento da concentração da DBO no rio, o que pode ser justificado pela concentração populacional na área deste Ribeirão, e pela falta de tratamento de esgotos em todos os municípios da área de estudo, e nas áreas próximas ao Ribeirão da laje. Para a melhoria da qualidade da água do rio Caratinga, a implantação da ETE e a eficiência da mesma é fundamental para reduzir a concentração dos poluentes e mantê-los dentro dos limites estabelecidos por toda a extensão do rio. Os resultados encontrados mostraram que é preciso priorizar ações quanto ao tratamento de esgotos para os municípios pertencentes a sub-bacia do rio Caratinga, uma vez que para enquadramento do corpo hídrico na classe 2 de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 para os anos de 2033 e 2041 e a população estimada, apenas a ETE Caratinga, atualmente instalada, não será suficiente para tal enquadramento, salvo se aumentar a eficiência em no mínimo 94% da remoção da DBO.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da modelagem matemática de qualidade da água do rio Caratinga mostrou uma resposta satisfatória em relação aos parâmetros analisados, com um bom desempenho tanto para a DBO quanto para OD.

A simulação de cenários, com o aumento da eficiência do tratamento na ETE Caratinga (eficiência de 90% da remoção da DBO), apresentou redução significativa na concentração da DBO e proporcionou o enquadramento para classe 2 conforme a Resolução CONAMA 357/2005 de aproximadamente 75% do trecho analisado para DBO e 90,7% para OD. Constatou-se que, nas simulações, o maior aumento da DBO ocorreu após o encontro do afluente do Ribeirão do Laje no rio Caratinga. A melhoria dos dados de calibração possivelmente seria melhor com um maior número de estações de monitoramento (salienta-se que a maioria das estações de monitoramento do trecho em estudo estavam inativas) ou com base em medidas reais em campo, no entanto, houve dificuldade de obtenção desses dados em campo devido aos recursos e tempo requerido para levantá-los.

Ao realizar análise de incerteza, observou-se que para a variável OD cerca de 42,7% da concentração pode estar entre 4 e 5 a jusante do trecho modelado. Na análise de sensibilidade, a temperatura influenciou diretamente no RMEQ do OD e, conseqüentemente, na concentração do OD. Já a DBO mostrou-se sensível a vazão de esgoto.

O modelo QUAL-UFGM e as simulações realizadas possibilitaram verificar o processo de autodepuração do rio Caratinga, demonstrando meios para melhoria das condições naturais do referido rio, confirmando como a modelagem pode ser útil no gerenciamento de recursos hídricos de forma preditiva e, inclusive, permitindo intervenções em locais onde se deve concentrar esforços por meio da simulação de diversos cenários.

Sugere-se realizar outros estudos com um maior número de seções de monitoramento ao longo do trecho analisado e um maior número de campanhas de coletas de água, incluindo outros parâmetros de qualidade da água para uma melhor representação dos processos de autodepuração do rio Caratinga. É importante também simular o afluente Ribeirão do Laje, uma vez que nas simulações apresentadas nesse estudo, verificou-se que a DBO aumentou logo após o encontro do referido afluente no rio Caratinga, demonstrando, possivelmente, o impacto no aporte de matéria orgânica e nutrientes oriundos desse tributário no rio Caratinga.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. L.; RODRIGUES, A.L; NOGUEIRA, I.G; XAVIER, F; MONTE-MOR R. C. A. Governança da água e políticas de Gestão: o caso do comitê da bacia hidrográfica do rio das Velhas. **Research, Society and Development**. v. 11. n. 3. jan./fev. 2022.

<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.25890>. Acesso em: 10 julho. 2022.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasil. 2017. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

BRASIL. **Lei nº 9.433 de 8 de fevereiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal. Brasília, DF: Presidente da República, [1997]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 20 abril 2021.

BRASIL. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Brasília, DF: Presidente da República, [1981]. Disponível em: [L6938 \(planalto.gov.br\)](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm) Acesso em: 20 abril 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2020/lei/114026.htm Acesso em: 01 jun. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Saneamento Básico, 2019. Disponível em: <https://ondasbrasil.org/wp-content/uploads/2020/09/Plansab-revisado-2019.pdf> Acesso em: 01 jun. 2023.

BRASIL. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF: Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) [2005]. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 20 set. 2020.

CARNEIRO, Grazielle Cristina Assis. Modelagem matemática e análise estatística multivariada aplicadas à avaliação da qualidade da água da sub-bacia hidrográfica do alto Paraopeba. 2021. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA) Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos *et. al*. Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Brasília: Ministério das Cidades, 2008. 76 p. Nota: Realização do NUCASE – Núcleo Sudeste de Capacitação.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais, 2022. Relatório Técnico da ETE Caratinga.

ECOPLAN – LUME 2010. Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Caratinga. PARH Caratinga (2010). Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Caratinga.pdf>. Acesso em 20 de abril de 2021.

ECOPLAN – LUME. 2010. Plano Integrado De Recursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio Doce. Relatório Executivo. 2010. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acesso em 30 de maio de 2022.

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**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira, v. 1, n. 7, p. 47-62, 2013. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/view/4206/pdf>. Acesso em: 27 jan. 2020.

FRAGA, M. de S.; REIS, G. B.; SILVA, D. D.; MOREIRA, 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**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 145-160, fev./mar. 2020. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0017>. Acesso em: 14 mai. 2022.

GOMES, S. H. R.; GUEDES, H. A. S.; SIQUEIRA, T. M.; CORRÊA, L. B.; ANDREAZZA, R.; HÜFFNER, A. N. Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFGM. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. [s.l.], v. 23, n. 2, p. 275-285, mar./abr. 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018169332>. Acesso em: 27 jan. 2020.

HIDROTEC. **Atlas Digital das Águas de Minas**. Universidade Federal de Viçosa (UFV). 2007. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/>. Acesso em: 12 out. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html> Acesso em: 10 out. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2022/Previa_da_Populacao/POP2022_Municipios_20230622.pdf Acesso em: 10 out. 2021.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/21>. Acesso em: 03 jun. 2020.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/21>. Acesso em: 03 jun. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **The Millennium Development Goals Report 2015**. United Nations. Nova York, 2015. Disponível em:

<http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Resources/Static/Products/Progress2015/English2015.pdf>.

Acesso em: 21 out. 2020.

PAULA, T. P. de. **Diagnóstico e Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Trecho do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 2011. 256 p. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2011-2/1223-thiago-pires-de-paula-mestrado>.

Acesso em: 11 set. 2021.

PESB. Plano estadual de saneamento básico de Minas Gerais. 2022. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2022/SANEAMENTO/PRODUTOS/P2_V2_Tomo_II_PESB_Rev03_TSI.pdf Acesso em: 19 abr. 2023

SANTOS, Vera Lúcia Martins. Qualidade da água e saúde das famílias: o caso da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão do Laje. Dissertação (Mestre em ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2002. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/9187/1/texto%20completo.pdf> Acesso em: Out. 2023.

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Panorama Abastecimento de água e esgotamento sanitário. Minas Gerais. 2021. Disponível em: https://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/12543/panorama_abastecimento_de_agua_e_esgotamento.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Relatório Hidrometeorológico 2015). Acesso em: 15 ago. 2022.

SILVA, G. T. I.; SILVA, V. A. Autodepuração em corpos d'água. 9ºENTEC- Encontro de Tecnologia. nov. 2015 [SILVA et. al.pdf](#). Acesso em: jan. 2022.

SILVA, M. M. A. P. de M.; FARIA, S. D.; MOURA, P. M. Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. [s.l.]. v. 22. n. 1. p. 133-143. jan./fev. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017134420>. Acesso em: 10 out. 2021.

SILVA, S. R. da.; SILVA JUNIOR, M. A. B. da.; LIMA, E. E. S. de. Analysis and modeling of water quality as a contribution to the preliminary framework proposal for the Una River (Pernambuco/Brazil). **Revista Ambiente & Água**, v. 13 n. 6, e2251. 2018. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2251>. Acesso em: 30 set. 2021.

SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2020. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 17 ago. 2020.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Série Histórica. **Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento**. 2020. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 03 maio de 2022.

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). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 18, n. 3, p. 275-288, jul./set. 2013.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000300010>. Acesso em: 16 out. 2020.

TUNDISI, J. G. Ggovernança da Água. *Revista UFMG*, v. 20, n.2, p. 222-235. 2013. <https://doi.org/10.35699/2316-770X.2013.2698>. Acesso em: 10 maio 2022.

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2015. **Nature-Based Solutions for Water**. França, 2015. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244834>. Acesso em: 25 janeiro 2022.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. vol. 7, 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte (MG): Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), v.7, 1ª Ed., 588 p, 2007.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. vol. 1, 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.