

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em
Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental
PPGSSA

Dissertação

**Estudos para Simulação da
Qualidade da Água no Alto
Curso Rio das Velhas: Rio
Itabirito-MG.**

Raphael Ricardo da Silva

2020
Ouro Preto



UFOP

RAPHAEL RICARDO DA SILVA

**ESTUDOS PARA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO
ALTO CURSO RIO DAS VELHAS: RIO ITABIRITO- MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental - Mestrado profissional da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental.

Orientador: Prof. Aníbal da Fonseca Santiago.

Ouro Preto, julho de 2020.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586e Silva, Raphael Ricardo da .
Estudos para simulação da qualidade da água no Alto Curso Rio das Velhas [manuscrito]: Rio Itabirito - MG. / Raphael Ricardo da Silva. - 2021. 105 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental.
Área de Concentração: Ambientometria.

1. Velhas, Rio das (MG) . 2. Rio Itabirito (MG). 3. Oxigênio Dissolvido - Pesos e medidas . 4. Oxigênio - Sistemas e padrões . 5. Qualidade das Águas (Qual-UFMG). 6. Equilíbrio químico - Balanço de carga. I. Santiago, Aníbal da Fonseca . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 502/504

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Raphael Ricardo da Silva

ESTUDOS PARA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO ALTO CURSO RIO DAS VELHAS: RIO ITABIRITO- MG

Dissertação apresentada ao Programa de de Pós-graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental - Mestrado profissional - da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental.

Aprovada em 12 de março de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Ana Leticia Pilz de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Luciano Miguel Moreira dos Santos - Instituto Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 30/03/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Anibal da Fonseca Santiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/03/2021, às 18:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0153610** e o código CRC **16BF2176**.

Dedico esse trabalho ao município de Itabirito que me adotou por filho em seu berço esplendido e ao Serviço Autônomo de Saneamento Básico municipal, pelo apoio e por acreditar no potencial dessa pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jesus autor e consumidor da minha fé, meu escudo e baluarte, sem o qual eu não teria chegado até aqui.

Sem dúvidas agradeço a minha amada esposa, Sra. Daiane Silva, que com ternura e companheirismo incentivou-me durante toda essa caminhada. Aos meus amigos pelas palavras de incentivo.

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade de desenvolver ciência e pelo meu estimado orientador e do programa, Aníbal da Fonseca Santiago que sempre incentivou e compartilhou o saber. Sou grato ainda pelos mestres do programa que com sabedoria contribuíram para a construção do meu aprendizado.

Manifesto gratidão ao Serviço Autônomo de Saneamento Básico municipal de Itabirito, na pessoa da Sra. Heloisa Cristina França Cavallieri que sempre foi uma incentivadora para que essa pesquisa acontecesse e ao Sr. Wagner José da Silva Mellilo que permitiu que essa obra se concretizasse nas dependências do SAAE-Itabirito.

RESUMO

O rio Itabirito está localizado no município de Itabirito, pertencente à rede hidrográfica do alto curso rio das Velhas na região central do estado de Minas Gerais. Simular a qualidade da água para verificar a capacidade de suporte de carga orgânica na bacia do município de Itabirito se mostra relevante, já que a confluência de suas águas com as águas do rio das Velhas são responsáveis por abastecer 70% da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

A proposta é, a partir do levantamento histórico da qualidade da água e pluviosidade, simular as variáveis de Demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), Oxigênio dissolvido (OD) e vazões fluviométricas no QUAL-UFMG.

O QUAL-UFMG foi criado com base no QUAL2-E, desenvolvido pela US Environmental Protection Agency (USEPA) que, por sua vez, utiliza as equações de Streeter-Phelps. Consiste em uma plataforma composta por planilhas de Excel com campos para entrada de dados referente à qualidade da água do rio bem como suas características hidráulicas. Relevante ferramenta de modelagem da qualidade da água de rios o QUAL-UFMG tem sua utilização no processo de gerenciamento dos recursos hídricos.

No levantamento histórico de qualidade as variáveis que mais influenciaram para a depleção do Índice de Qualidade da Água foi *E. coli* e turbidez tanto em períodos chuvosos quanto nos períodos secos.

O programa QUAL-UFMG 2017 foi utilizado em um trecho de aproximadamente 15 km e evidenciou capacidade de autodepuração devido ao gradiente de reaeração que o trecho urbano possui por características hidráulicas naturais da bacia. No entanto, a simulação não se ajustou ao modelo proposto na pesquisa o que permite novos estudos utilizando as mesmas variáveis usadas para o presente estudo.

O coeficiente de desoxigenação, isto é, k_1 representa a taxa de degradação da matéria orgânica e os resultados da pesquisa variaram entre 0,003 a 0,743 d^{-1} no período chuvoso e 0,003 a 0,234 d^{-1} no período seco. Valores típicos de k_1 em condições de laboratório base 20 C° para águas de rio são de 0,08 a 0,020. Logo, os resultados da pesquisa se mostraram superiores aos valores estimados na bibliográfica clássica.

Os resultados para o coeficiente de reaeração superficial (k_2) foram consideravelmente mais elevados em relação aos valores usualmente encontrados por meio de métodos empíricos. Por isso para a simulação da modelagem na plataforma do QUAL-UFMG considerou-se utilizar os valores determinados na bibliografia.

De modo geral, os estudos desta dissertação fornecem subsídios para futuras simulações da qualidade da água na bacia do rio Itabirito, propõem cenários e contribuem com informações que podem subsidiar revisões na política pública de gestão das águas do município e no investimento em novas tecnologias para o Serviço de Saneamento Básico.

Palavras-chaves: Rio das Velhas; Rio Itabirito; Oxigênio dissolvido; Demanda bioquímica de oxigênio; QUAL-UFMG; Balanço de carga.

ABSTRACT

The Itabirito river is located in the municipality of Itabirito, belonging to the hydrographic network of the upper course of the Rio das Velhas in the central region of the state of Minas Gerais. Simulating water quality to check the organic load capacity of the Itabirito basin is relevant, since the confluence of its water with the waters of the Rio das Velhas are responsible for supplying 70% of the population of the Metropolitan Region from Belo Horizonte.

The proposal is, from the historical survey of water quality and precipitation, to simulate the variables of biochemical oxygen demand (BOD5), dissolved oxygen (DO) and fluviometric flow rates at QUAL-UFGM.

QUAL-UFGM was structured based on QUAL2-E, developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), which, in turn, uses the Streeter-Phelps equations. It consists of a platform composed of Excel spreadsheets with fields for entering data related to the quality of the river water and its hydraulic characteristics. A relevant modeling tool for river water quality, QUAL-UFGM has its use in the water resource management process.

In the historical quality survey, the variables that most influenced the depletion of the Water Quality Index were E. coli and turbidity in the rainy and dry periods.

The QUAL-UFGM 2017 program was used in a stretch of approximately 15 km and showed self-purification capacity due to the gradient of regeneration that the urban section presents due to the natural hydraulic characteristics of the basin. However, the simulation was not adapted to the model proposed in the research, which allows new studies using the same variables used in the present study.

The deoxygenation coefficient, that is, k_1 represents the rate of degradation of organic matter and the results of the research varied between 0.003 to 0.743 d⁻¹ in the rainy season and 0.003 to 0.234 d⁻¹ in the dry season. Typical values for k_1 under laboratory conditions of 20 ° C for river waters are 0.08 to 0.020. Therefore, the results of the research proved to be superior to the values estimated in the classic bibliography.

The results for the surface reoxygenation coefficient (k_2) were considerably higher than the values usually found by empirical methods. Therefore for the simulation of modeling on the QUAL-UFGM platform, the use of the values found in the bibliography was considered.

In general, the studies in this dissertation provide subsidies for future water quality simulations in the Itabirito River basin, propose scenarios and contribute information that can support revisions in public water management policy in the municipality and in investment in new technologies for Basic Sanitation Service.

Key-words: River das Velhas; River Itabirito; Dissolved oxygen; Biochemical oxygen demand; QUAL-UFGM; Loadbalance.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO GERAL	4
2.1. Objetivos Específicos.....	4
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
3.1. Aspectos Socioeconômicos	6
3.2. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Itabirito	7
3.3. Caracterização Morfológica	10
3.4. Caracterização Hidrológica.....	12
3.5. Caracterização Climática	13
3.6. Uso do Solo.....	13
3.7. Demografia.....	15
4. ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS	16
4.1.1. Índice de qualidade das águas em Minas Gerais.....	18
5. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS RELACIONADAS COM A MORFOLOGIA.	19
5.1. Vazão Fluviométrica.	19
5.2. Poluição de Rios por Matéria Orgânica	20
5.2.1. Autodepuração dos Rios	21
6. MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA	23
6.1. QUAL-UFGM.....	25
6.2. Coeficiente de desoxigenação (K_1)	26
6.3. Coeficiente de reaeração superficial (K_2).....	28
7. METODOLOGIA	31
7.1. Determinação dos pontos de coleta na bacia	31
7.2. Amostragens	32
7.3. Análises.....	33
7.3.1 Análise de amostragem em campo.....	33
7.3.2 Análise em Laboratório	34
7.3.3 Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>	34
7.3.4 Sólidos Suspensos Totais.....	35
7.4. Determinação da vazão fluvial	36
7.5. IQA	37
7.6. Determinação do coeficiente de desoxigenação (K_1)	38
7.7. Determinação do coeficiente de reaeração superficial (K_2).....	38
7.8. QUAL-UFGM 2017	38
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
8.1. Série histórica da qualidade da água da bacia do rio Itabirito entre 1998 a 2018.	40
8.2. Monitoramento da água da bacia hidrográfica do rio Itabirito realizado pelo IGAM em 2019.	46

8.3.	Índice de Qualidade de Água com dados primários – Monitoramento 2019.	48
8.4.	Carga poluidora dos empreendimentos	54
8.5.	Curva de Demanda Bioquímica de Oxigênio.....	54
8.6.	Curva do OD ao longo do trecho estudado	55
8.7.	Vazão nos cursos d'água.....	58
8.8.	Coefficiente de desoxigenação (K_1)	59
8.9.	Coefficiente de reaeração superficial (K_2).....	61
9.	RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DO MODELO QUAL-UFMG.....	65
10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A	77
	APÊNDICE B	83
	APÊNDICE C	103
	APÊNDICE D	105
	APÊNDICE E	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia do rio Itabirito	6
Figura 2 - Economia do município de Itabirito	7
Figura 3 - Mapa de uso e cobertura vegetal da Bacia do rio Itabirito	9
Figura 4 - Trechos Meândricos ao longo rio Itabirito.	11
Figura 5 - Trecho proximo ao lançamento da Estação de Tratamento de Esgoto de Itabirito .	12
Figura 6 - Uso e ocupação do solo na Bacia do rio Itabirito	14
Figura 7 - Estimativa do crescimento populacional geométrico do município de Itabirito.	15
Figura 8 - Processo de Autodepuração.	21
Figura 9 - Área de influência da vazão da bacia.....	31
Figura 10 - Coleta de campo	33
Figura 11 - Análise bacteriológica dos pontos de amostrados	35
Figura 12 - Determinação da vazão do rio	37
Figura 13 - Diagrama unifilar das seções estudadas do rio Itabirito contendo os tributários...	39
Figura 14 - Série histórica de pluviosidade e IQA (1998 a 2018) da bacia hidrográfica do rio Itabirito.	44
Figura 15 - Valores mais baixos de IQA (1° trim. 98, 2° trim. 98, 1° trim. 99, 4° trim. 08) e valores mais elevados de IQA (4° trim. 03, 3° trim. 04, 1° trim. 06, 3° trim. 06) da série histórica.	45
Figura 16 - Valores de IQA da estação de monitoramento do IGAM na bacia hidrográfica do rio Itabirito, para o ano de 2019.	47
Figura 17 - Principais parâmetros influenciadores nos resultados do IQA trimestral em 2019, pelo monitoramento do IGAM.	48
Figura 18 - Valores de IQA nos pontos amostrais da bacia hidrográfica do rio Itabirito no período chuvoso e seco.....	49
Figura 19 - Parâmetros mais influenciadores nos resultados do IQA no período chuvoso em 2019	50
Figura 20 - Parâmetros mais influenciadores nos resultados do IQA no período seco em 2019	51
Figura 21 - Resultados de DBO5 20° do período seco e chuvoso da campanha de 2019.....	55
Figura 22 - Resultado do perfil de OD da campanha do período chuvoso e seco em 2019.....	56
Figura 23 - Perfil topográfico do rio Itabirito dividido em 4 trechos de declividade homogênea.....	56

Figura 24 - Curvas de OD e DBO5 20°C ao longo da seção estudada do rio Itabirito no período chuvoso.....	57
Figura 25 - Curvas de OD e DBO5 20°C ao longo da seção estudada do rio Itabirito no período seco.....	57
Figura 26 - Comportamento do OD ao longo do rio Itabirito na estação chuvosa.....	65
Figura 27 - Comportamento da DBO5 ao longo do rio Itabirito na estação chuvosa	66
Figura 28 - Comportamento do OD ao longo do rio Itabirito na estação seca.....	67
Figura 29 - Comportamento da DBO5 ao longo do rio Itabirito na estação seca.	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Faixas do IQA de acordo com os estados.	17
Quadro 2 - Classe dos IQA,s e seu significado sanitário.....	18
Quadro 3 - Equações para previsão de coeficiente de reaeração superficial (k ₂).	30
Quadro 4 - Métodos padronizados adotados para as análises das amostras em laboratório. ...	34
Quadro 5 - Valores do coeficiente K ₂ no período chuvoso, segundo as equações de O'Connor & Dobbins (1958) e Owens et al. (1964).	62
Quadro 6 - Valores do coeficiente K ₂ no período chuvoso, segundo as equações de Tsivoglou-Wallace (1972) e Melching-Flores (1999).....	62
Quadro 7 - Valores do coeficiente K ₂ no período seco, segundo as equações de O'Connor & Dobbins (1958) e Owens et al. (1964).....	63
Quadro 8 - Valores do coeficiente K ₂ período seco, segundo as equações de Tsivoglou-Wallace (1972) e Melching-Flores (1999).	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do IQA e os pesos associados de acordo com a CETESB.	16
Tabela 2 - Valores típicos de coeficiente de desoxigenação (K1) (base e, 20°C).....	27
Tabela 3 - Valores típicos de coeficiente de reaeração K2 (base e, 20°C).....	29
Tabela 4 - Coordenadas geográficas e altitudes das seções o trecho estudado.	32
Tabela 5 - Vazão dos cursos d'água na estação chuvosa.	58
Tabela 6 - Vazão dos cursos d'água na estação seca.....	58
Tabela 7 - Resultados de K1 na estação chuvosa.	60
Tabela 8 - Resultados de K1 na estação seca.	60

1. INTRODUÇÃO

A água está entre os recursos naturais fundamentais, é a que possui maior destaque, pois sua disponibilidade é necessária a todo tipo de vida no planeta, bem como para a maioria dos meios de produção. É sabido ainda, que o uso da água pelo ser humano para qualquer finalidade resulta na deterioração da sua qualidade, limitando geralmente seu potencial de uso. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), as causas de abastecimento inadequado de água, incluem o uso ineficiente e a degradação da água pela poluição. Para isso, são necessárias ações corretivas que busca alcançar uma melhor gestão dos escassos recursos de água potável com foco particular na oferta e na demanda, quantidade e qualidade (ONU 2016).

As temáticas relacionadas à questão da água atravessam os tempos tendo por compreensão como fonte de vida para muitas manifestações culturais. O uso da água para diversas atividades, produtivo ou não, faz dela um elemento fundamental ao sistema social, político e econômico o que evidência interesses múltiplos e conflitos gerados pela sua abundância ou escassez.

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos-PNRH, instituída pela Lei Nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica é adotada como uma unidade territorial de planejamento que estabelece o processo de gerenciamento dos recursos hídricos e a implementação da política por meio dos seus instrumentos de gestão com intuito de regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos.

A classificação está diretamente ligada com o enquadramento do rio. E por ser um instrumento de gestão, conforme a PNRH, o enquadramento dos rios em classes determina os usos preponderantes, uma vez que, numa concepção de planejamento descentralizado e participativo, figura como ferramenta de integração entre a gestão de quantidade e de qualidade da água da bacia hidrográfica (CALMOM *et.al.* 2016).

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas está localizada na região central do estado de Minas Gerais. Dentro do limite topográfico da bacia, 51 municípios compõem rede fluvial do rio das Velhas. O alto curso rio das Velhas está localizado na região do quadrilátero ferrífero, importante região geoeconômica mineraria do Brasil. Além disso, a bacia abriga um dos principais mananciais de abastecimento urbano de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH, atendendo a mais de dois milhões de habitantes (HIDROAMBIENTAL (CBHVELHAS *et al.* 2013).

O rio Itabirito é uma importante rede hidrográfica da primeira unidade estratégica

territorial do alto curso rio das Velhas. Esse rio apresenta suas primeiras nascentes na porção noroeste da bacia e suas cabeceiras estão localizadas na vertente oeste da Serra da Moeda e situam-se em altitudes de 1.460 m a 1.520 m. Seu canal tem sentido norte percorrendo aproximadamente 23,5 km e atravessa a área urbana do município de Itabirito até o encontro com o córrego Luiza dos Santos ou Moleque. A partir de então, segue no sentido nordeste percorrendo aproximadamente 5,4 km até o encontro com o Rio das Velhas conforme caderno técnico de estudos de fragilidades ambientais do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio das Velhas (HIDROAMBIENTAL CBHVELHAS *et al.* 2013).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o município de Itabirito possui 51.288 habitantes e densidade demográfica de 94,6 hab/km². O censo do ano de 2010 aponta que o município possuía 45.499 habitantes e 83,76 hab/km² de densidade demográfica (IBGE 2018). Os dados mostram como houve crescimento de 11,37% na população do município no período de 8 anos o que o nos leva a refletir sobre a geração dos esgotos domésticos na bacia hidrográfica do rio Itabirito e os impactos ambientais negativos que o seu lançamento pode causar nos cursos de água, caso não sejam devidamente tratados.

É sabido que a introdução indireta de matéria orgânica em um corpo d'água resulta, indiretamente, no consumo de oxigênio dissolvido, e isso se deve ao processo de estabilização da matéria orgânica, realizados pelas bactérias decompositoras. Logo, os despejos de esgotos sanitários sem prévio tratamento podem promover depleção do oxigênio dissolvido no rio afetando as formas de vidas ali existentes.

A bacia do rio Itabirito está situada na porção central da província geológica do Quadrilátero ferrífero com área territorial 542,6 km² IBGE (2018), abrangendo os municípios de Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima (HIDROAMBIENTAL CBHVELHAS *et al.* 2013).

Por causa do seu posicionamento territorial, a presença de minerais de óxido de ferro é abundante o que favorece a exploração mineral desde os períodos áureos do ciclo do ouro na colonização. Com isso, as pressões ambientais sobre a bacia se intensificaram à medida que ocorreu avanço tecnológico no setor econômico minerário.

É importante ressaltar que há outras formas de uso do solo que contribuem para a degradação do alto curso rio das Velhas sendo elas atividades agrosilvopastoris, expansão imobiliária, indústria têxtil e de laticínios. Além da ocupação desordenada na mata ciliar, zonas de interflúvios e vertentes.

Diante desse cenário histórico de uso, ocupação e degradação ambiental existe a necessidade de buscar soluções mitigadoras para minimizar os impactos causados pelo

lançamento indevido nos recursos hídricos se torna cada vez mais necessário.

De acordo com Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no Brasil somente 46% dos esgotos é tratado já na região sudeste 67,3% são coletados e destes, apenas, 50,4% são tratados e posteriormente lançados nos recursos hídricos (SNIS 2017). O cenário de esgotamento adequado para o município de Itabirito era de 83,7 % (IBGE 2010), isto é, coleta sem tratamento primário e ou secundário. No entanto, com os investimentos que o município tem feito no setor de saneamento básico, além de interceptar o esgoto, atualmente, o município trata a nível secundário, aproximadamente 85% do volume coletado (SNIS 2017) ocupando a 4º posição na microrregião (IBGE 2019).

Diante do exposto, aproximadamente 15% dos esgotos domésticos gerados na sede urbana ainda são lançados *in natura* no rio Itabirito e mesmo com tantos esforços da Autarquia de Saneamento Básico do município, os esgotos gerados na zona rural não possuem formas adequadas de tratamentos contendo no máximo fossas negras por parte dos sítiantes. Além de poder existir contribuições por lançamentos clandestinos de outros tipos de efluentes que mesmo sendo de origem industrial, podem conter esgotos sanitários ou de características de esgotos domésticos, como abatedouro e laticínios.

Como já mencionado, o município cresceu relativamente e possui potencial crescimento econômico devido ao seu posicionamento geográfico no eixo BR 040, rodovia federal, o que favorece o escoamento da produção. Logo, a demanda por recursos hídricos pode aumentar e conseqüentemente o lançamento dos esgotos sanitários e industriais. Por isso é necessário simular a capacidade do rio Itabirito através da quantificação da carga orgânica que o sistema aquático tem condições de depurar em processo ecológico natural denominado de autodepuração.

Logo, a investigação da qualidade da água pode subsidiar estudos para aplicação de sistema de tratamento ou ampliação da tecnologia de saneamento já existente, além, de fomentar a elaboração de políticas públicas para a preservação da qualidade das águas do rio Itabirito. Como exemplo de ferramenta de gestão pode citar a elaboração de uma Portaria municipal, determinando os valores dos parâmetros para lançamento na rede de esgotamento da Autarquia de Saneamento. O que levaria em consideração o dimensionamento da Estação de Tratamento de Esgoto bem como o lançamento dos efluentes secundários. Outro subsídio é para os empreendimentos que possuem tratamentos privados, a Portaria poderia nortear os parâmetros de lançamento direto no rio Itabirito.

Os modelos matemáticos de qualidade da água merecem especial destaque por apresentarem ampla aplicação no processo de gestão das águas (FLECK *et.al.* 2013). Podem

se mostrar eficientes para demonstrar as mudanças no estado físico, químico e biológico da água considerando vários cenários possíveis para a bacia.

O QUAL-UFMG é uma ferramenta aplicada para a modelagem da qualidade de água de rios (VON, SPERLING 2014). O programa é desenvolvido em planilhas do Excel e permitiu a modelagem das seguintes variáveis: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Nitrogênio Total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), Fósforo Total e suas frações (orgânico e inorgânico), Coliformes Termotolerantes ou *E. Coli*.

2. OBJETIVO GERAL

Utilizar o QUAL-UFMG para simular a qualidade da água em período seco e chuvoso e como subsídio quantificar o balanço de carga orgânica na bacia hidrográfica do rio Itabirito, nos trechos a montante e a jusante da Estação de Tratamento de Esgoto do município de Itabirito.

2.1. Objetivos Específicos

Caracterizar a bacia hidrográfica do rio Itabirito em seus aspectos ambientais, sociais, econômicos e geográficos;

Monitorar variáveis físicas, químicas e biológicas para analisar as características ambientais de qualidade da água por meio de duas campanhas no ano de 2019;

Relacionar as possíveis interferências antrópicas na qualidade das águas superficiais na bacia a partir da utilização dos parâmetros de qualidade da água e da determinação do Índice de Qualidade da Água (IQA);

Utilizar dados de variáveis física, química e biológica do IGAM para analisar histórico da qualidade da água da bacia e relacionar com a pluviosidade, considerando períodos secos e chuvosos por um período de 20 anos;

Estimar taxas de desoxigenação (k_1) e de reaeração superficial (k_2) por meio dos parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido e utilizar o programa QUAL-UFMG 2017 para simular a qualidade da água da bacia do rio Itabirito.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os rios brasileiros estão inseridos em um contexto onde os impactos ambientais interferem na disponibilidade, quantidade e qualidade das águas, isto é, as intensas atividades sociais têm levado a degradação dos recursos hídricos afetando diretamente a saúde pública das populações abastecidas. A Lei Federal 9.433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos prevê que a água é um bem de domínio público e de acesso a todos.

O alto curso rio das Velhas está inserido em uma porção que historicamente sofre alterações em seu sistema hidrográfico. Desde os períodos áureos da colonização, no denominado Ciclo do Ouro, devido à atividade minerária que atendiam os anseios da Coroa Portuguesa.

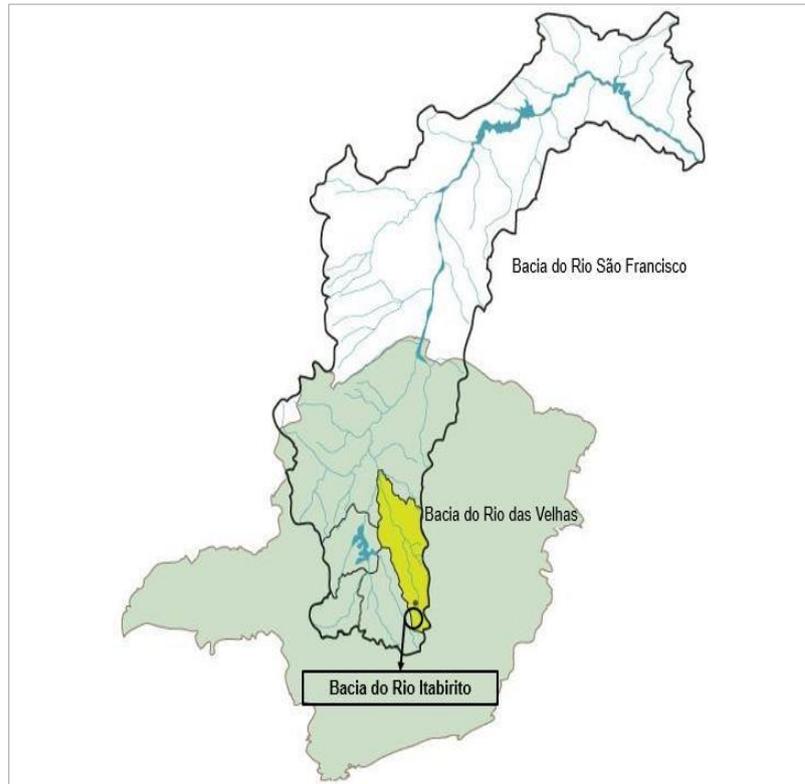
O aprimoramento das técnicas de extração mineral, a industrialização e o adensamento demográfico são fatores que em conjunto ou individualmente podem contribuir para a depreciação da valoração dos recursos hídricos tornando-o escasso ou inviável, seja por impossibilidade de uso devido à qualidade ou por disponibilidade quantitativa.

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) tem sua população abastecida através do sistema integrado que consiste em um conjunto de empreendimentos de abastecimento que são alimentados por sistemas produtores como rio Manso, Serra Azul, Várzea das Flores, Morro Redondo, Ibirité, Catarina e o rio das Velhas que são responsáveis por abastecer a maioria da população dessa região (COPASA 2019).

Logo, o alto curso rio das Velhas torna-se uma área de estudo que possui caráter de relevante interesse socioambiental, já que, as águas dessa seção da bacia são responsáveis por abastecer aproximadamente 70% da população da região metropolitana da capital de Minas Gerais (SAAE 2019).

Além do potencial de abastecimento que a unidade estratégica territorial possui, há uma forte atração para o fomento econômico de mineração de ferro o que contribui para o fortalecimento dos demais setores econômicos da região e favorece o fluxo migratório de pessoas em busca de emprego e renda e conseqüentemente melhor qualidade de vida. Na Figura 1 está a localização da bacia do rio Itabirito no estado de Minas Gerais.

Figura 1 - Localização da Bacia do rio Itabirito



Fonte: Rosa (2019).

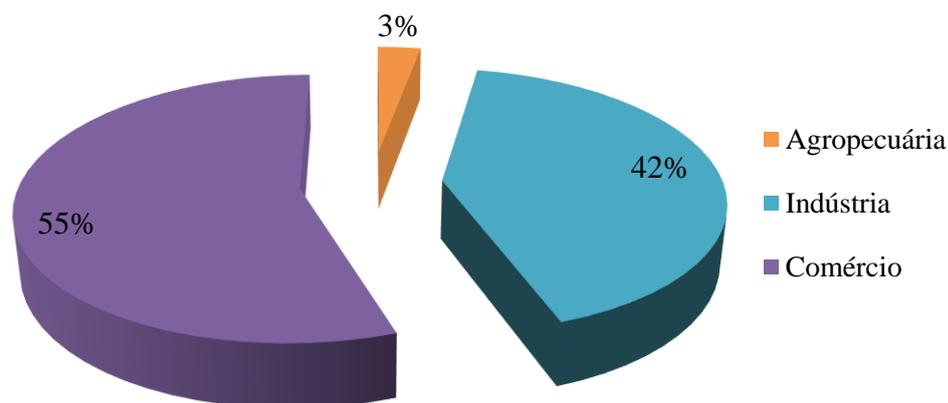
3.1. Aspectos Socioeconômicos

A diversificação econômica no alto curso da bacia do rio das Velhas é possível por causa de suas características geográficas o que pode intensificar esse processo de intervenção.

Atualmente as principais atividades desenvolvidas nesse trecho da bacia são as atividades de mineração de ferro, extração de quartzo, pedra sabão, turismo, atividades industriais, e comércio em geral.

Especificamente na bacia do rio Itabirito as principais atividades geoeconômicas são as atividades de mineração de ferro, agrosilvopastoris, extração de areia, atividades siderúrgicas, laticínios e indústrias têxteis. Além disso, há forte movimento no comércio instalado no centro da sede urbana do município de Itabirito. A Figura 2 ilustra as principais atividades econômicas desenvolvida na bacia hidrográfica do rio Itabirito.

Figura 2 - Economia do município de Itabirito



Fonte: Fecomércios Minas Gerais (2016).

3.2. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio itabirito

Segundo Guimarães (1953), a bacia do rio das Velhas, onde se insere o rio Itabirito, pode ser subdividida em alto, médio e baixo curso do rio das Velhas. O alto curso rio das Velhas, seção onde está situada a bacia hidrográfica do rio Itabirito, está predominantemente inserido no ecossistema de Mata atlântica.

De acordo com Veloso *et.al* (1991) a bacia do rio Itabirito está totalmente inserida no domínio de Mata Atlântica, no entanto, é comum identificar fitofisionomia característico do Cerrado como Campos Rupestre e Campos de Altitude. Essa transição de bioma é considerada por Ab'Sáber (2012) como zona Coren ou região de Ecotono.

A fitogeografia da bacia do rio Itabirito é marcada de Floresta Estacional Semidecidual (VELOSO *et. al* 1991), porém, devido à influência de fatores geológicos e morfológicos, é comum encontrar outras tipologias ecossistêmicas como Campos Cerrados nas áreas de média vertente, Campos Rupestres e Campos Ferruginosos sobre os afloramentos rochosos.

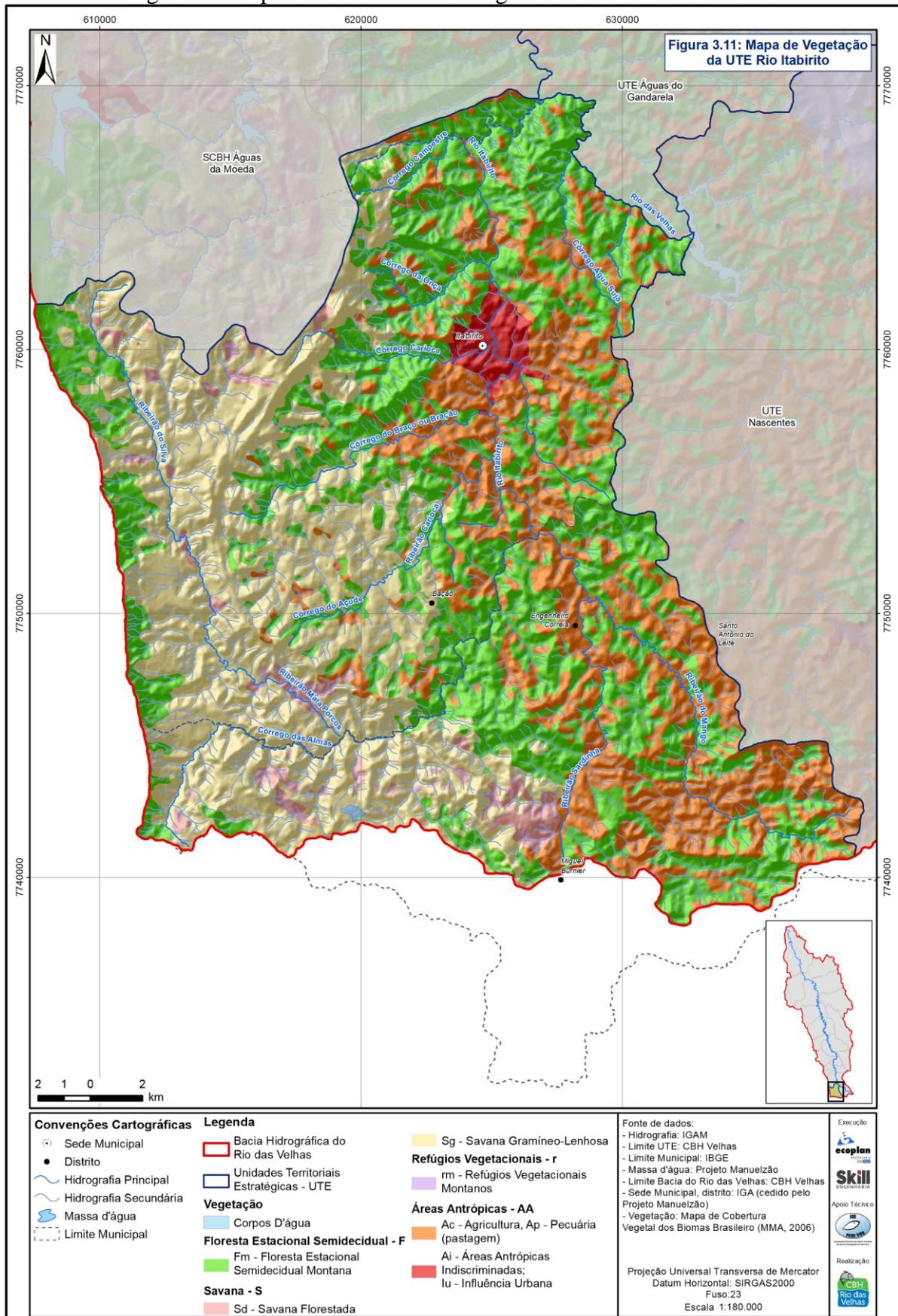
A vegetação dos Cerrados é bem antiga, teve seu desenvolvimento no período quaternário. Essa estrutura de paisagem é formada por solos lateríticos e planaltos tropicais interiorizados. A interpenetração da província florestal contígua Mata Atlântica pelo vasto domínio dos Cerrados se deu por meio da expansão dos vales de drenagem perenes. Sendo assim, a erosão fluvial e a expansão das galerias florestais tem sido do tipo remontante (AB'SÁBER 2012).

A fitogeografia de Mata Tropical Atlântica penetra pelos Campos dos Cerrados favorecendo as precipitações pluviométricas devido à taxa evapotranspiração. O que somado a outros aspectos, contribui para o regime das chuvas e conseqüentemente para o abastecimento dos lençõs freáticos das áreas de vale.

Myssior (2013b) realizou estudos e mostrou que a bacia hidrográfica do rio Itabirito possui fisionomias naturais em 68,81% de sua área de 541,58 km², sendo 34,56% formações campestres e 34,25% fragmentos florestais, mesmo tendo diferentes graus de perturbação antrópica.

A zona urbana corresponde a 5,82% da bacia, se restringindo apenas ao município de Itabirito, alguns de seus distritos e loteamentos, especialmente próximos a zona limitrófica com o município de Nova Lima. As áreas de atividades minerárias perfazem 5,44%, áreas destinadas às atividades agropecuárias representam 19,72% da bacia, 0,06% é utilizada para o reflorestamento de eucalipto, enquanto o restante, 0,15%, corresponde às massas de água (MYSSIOR 2013). A Figura 3 é o mapa que mostra o uso e a cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Itabirito.

Figura 3 - Mapa de uso e cobertura vegetal da Bacia do rio Itabirito



Fonte: CBH Rio das Velhas (2013).

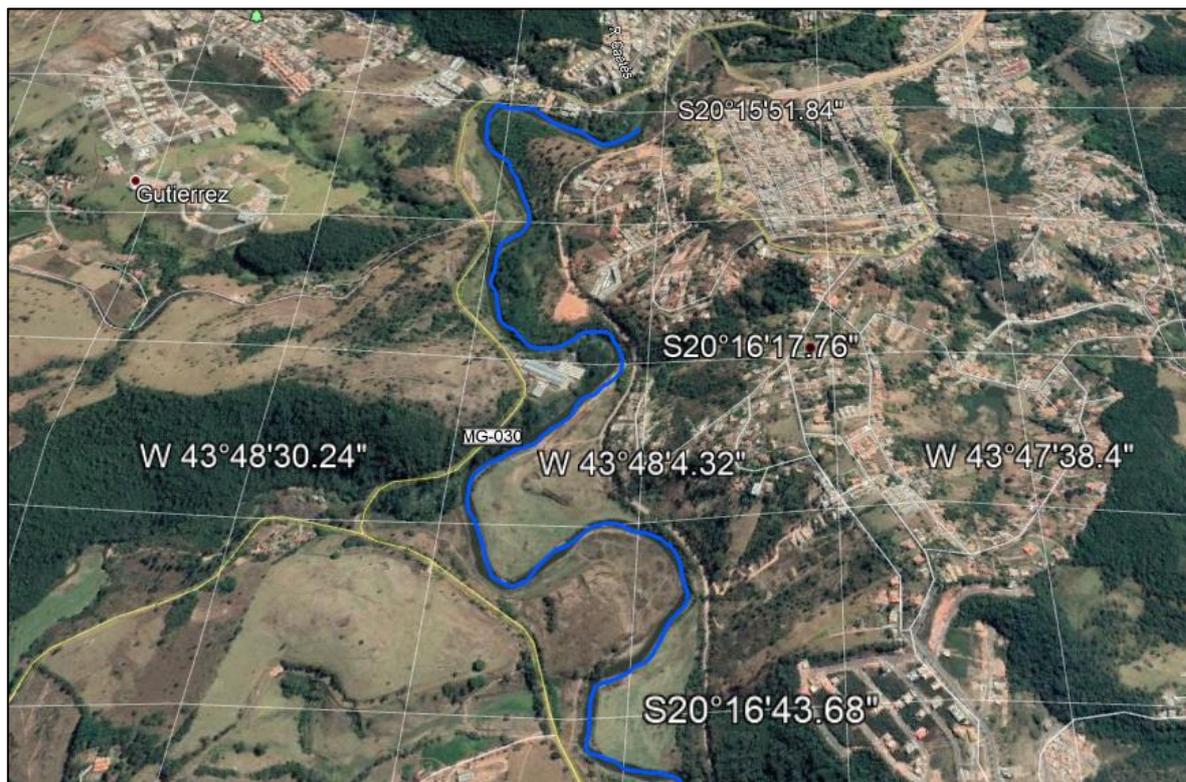
3.3. Caracterização Morfológica

Os aspectos morfológicos de um canal fluvial podem contribuir para informações concernentes à qualidade da água já que sua estrutura pode nos falar sobre sua velocidade, declividade e vazão. De acordo com Von Sperling (2014) os sistemas fluviais podem ser classificados de duas formas, em canais únicos e múltiplos. Na categoria de canais únicos encontramos os retilíneos, sinuosos, meandantes e tortuosos já na categoria de canais múltiplos são os ramificados, anastomosados, reticulados e deltaicos.

A morfologia do rio Itabirito é formada por trechos meândricos nas partes mais baixas, situadas a jusante da estação de tratamento de esgoto do município até a zona de confluência da margem esquerda do rio das Velhas. Nos pontos mais altos onde o Ribeirão Sardinha faz confluência com o Ribeirão Mata Porcos, formando o rio Itabirito, tem sua estrutura morfológica mais retilínea.

Na parte média do curso fluvial, onde há pressões antrópicas devido ao uso e ocupação desordenada, é evidenciado bancos de sedimentos e entulho de resíduos de enchentes o que lhe confere características anastomosadas. A Figura 4 mostra trechos meândricos em alguns trechos do rio Itabirito.

Figura 4 - Trechos Meândricos ao longo rio Itabirito.



Fonte: Google Earth (2021).

Ao longo do trecho de aproximadamente 70 km observaram-se corredeiras, afloramento rochoso e encachoeiramento conforme evidenciado na Figura 5, trecho a 100 metros depois do lançamento do esgoto tratado da estação do Serviço Autônomo de Saneamento Básico de Itabirito. Além disso, a formação de cânion é contemplada nas proximidades da confluência com rio das Velhas nos limites entre os municípios de Itabirito e Rio Acima.

Figura 5 - Trecho próximo ao lançamento da Estação de Tratamento de Esgoto de Itabirito



Fonte: Autor (2019).

3.4. Caracterização Hidrológica

A caracterização hidrológica em bacias hidrográficas se torna relevante no processo de planejamento ambiental e gestão dos recursos hídricos. A atenção dada, por exemplo, a técnicas de plantio e criação de animais que minimizem os impactos adversos sobre o balanço hidrológico e a qualidade da água que escoam superficialmente é parte do planejamento ambiental de forma a assegurar a disponibilidade de água na bacia. Este novo cenário no planejamento dos recursos hídricos só foi possível no Brasil, após sua estruturação legal, por meio da Constituição Federal de 1988 (LARENTIS 2004).

O rio Itabirito é o principal corpo hídrico dentro da área delimitada da unidade com aproximadamente 73 km de extensão (CBHvelhas 2013).

A unidade possui relevante índice de pluviosidade. Os meses de novembro a março (verão) possuem os maiores volumes de precipitação, sendo que o mês de dezembro costuma ser o mês mais chuvoso, com média de até 299,23 mm e o mês de julho, o mais seco, apresentando média de 7,27 mm conforme dados analisados da estação meteorológica localizada no município de Itabirito (ANA 2019).

Fatores relacionados ao clima e as características morfológicas da bacia contribuem para eventos hidrológicos como enchentes e inundações, entretanto as ações antrópicas

exercidas sobre o meio podem contribuir para esses eventos, além de refletir nas variantes de qualidade e quantidade de água do rio.

3.5. Caracterização Climática

Ribeiro (1993) define clima como um conjunto integrado de fenômenos que se fundem no tempo e no espaço, revelando uma unidade ou tipo passíveis de ser medido em sua extensão e duração. Já Nimer (1979) define clima como sendo sistemas transientes de circulação secundária onde apresenta perturbações atmosféricas relacionadas ao aparecimento de linhas de instabilidade, frentes, ciclones e anticiclones móveis que podem interferir nas condições de tempo meteorológico dos sistemas de grande escala.

O clima da região do alto curso rio das Velhas é o tropical de altitude, segundo classificação de Köppen, marcado por invernos secos e verões brandos e chuvosos. A temperatura média anual é de aproximadamente 17°C.

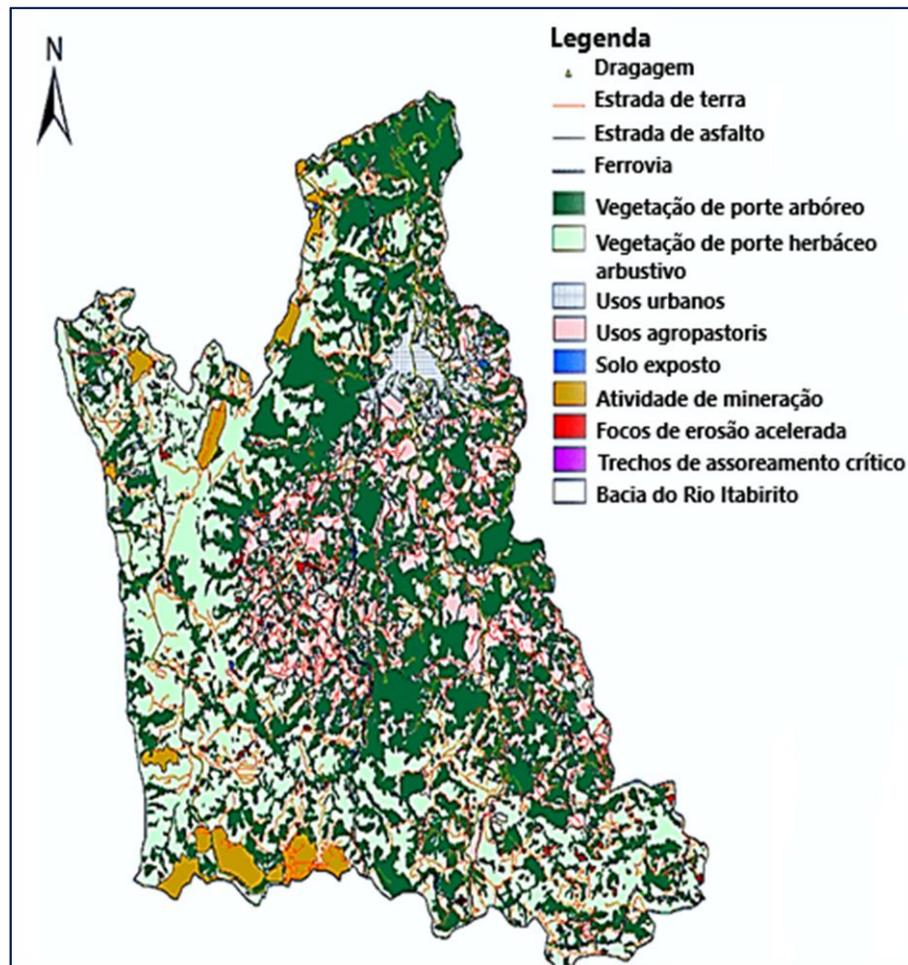
A sazonalidade é bem definida, o período de chuvas compreende os meses de novembro e abril enquanto o período de estiagem perdura entre os meses de maio e outubro. A precipitação anual fica entre 1800 a 2000 mm de acordo com (CBHVelhas 2013).

Os ventos que atuam na Bacia do Rio Itabirito sopram predominantemente do quadrante leste e são normalmente fracos com velocidades médias da ordem de 2,6 m/s (ATAÍDE 2010).

3.6. Uso do Solo

De acordo com a Lei nº 3.325/2019 que trata sobre o parcelamento de uso e ocupação do solo do município de Itabirito a sede urbana está dividida conforme Figura 6 (ITABIRITO 2019).

Figura 6 - Uso e ocupação do solo na Bacia do rio Itabirito



Fonte: CBHVelhas (2013).

O zoneamento ecológico e econômico de uma bacia é uma importante ferramenta que pode integrar planejamento ambiental e desenvolvimento sustentável. De acordo com Little 2006 *apud* Schubart (1998) zoneamento é o resultado técnico de uma descrição seguida de uma classificação em zonas de um dado território. Pode ser um processo administrativo que da base para fundamentar políticas públicas que vão orientar a ordenação do espaço territorial.

Como já dito a bacia hidrográfica do rio das Velhas é dividida em unidades estratégicas territoriais, sendo, alto, médio e baixo curso. A bacia do rio Itabirito está localizada no alto curso rio das Velhas considerada Unidade estratégica territorial- UTE 01.

A UTE-01 da bacia do rio das Velhas possui 79,2% de sua área superficial coberta por vegetação natural, sendo representada em 54,76% por áreas de cerrado e 22,8% por formações florestais (CBHVelhas 2013). Nesse contexto há quatro unidades de conservação (UC) inseridas parcialmente no território, somando aproximadamente 9.586,49 ha de áreas protegidas 17,47% da área total da dominação territorial da unidade (CBHVelhas 2013).

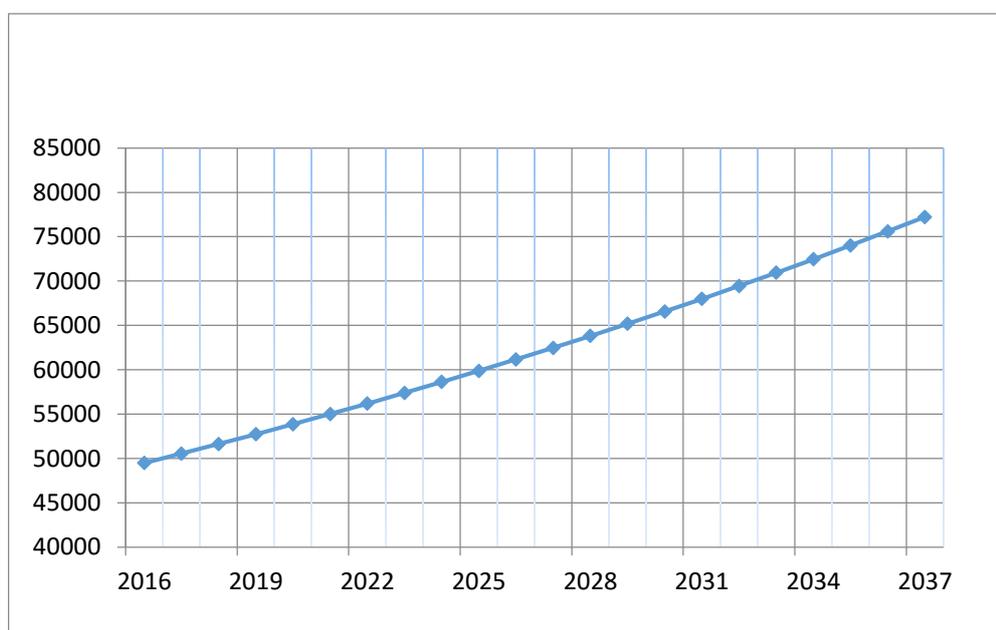
3.7. Demografia

O município de Itabirito pertence ao colar Metropolitano de Belo Horizonte. De acordo com IBGE (2018), sua população está em 51.281 habitantes e densidade demográfica 94,4 habitantes por km² se divide na área de toda a bacia do rio Itabirito. A maior parte da população de Itabirito vive na zona urbanas sendo, 9,6 % nas áreas rurais e 90,4 % na zona urbana.

Estudos de crescimento populacional geométrico do município de Itabirito mostra a curva de crescimento da população por um período de 20 anos conforme evidenciado na Figura 7 (SAAE 2017).

A projeção populacional pode ser descrita como sendo uma estimativa da população de um determinado território. Para essa pesquisa, estimar o crescimento populacional caracteriza-se de extrema relevância no processo de gerenciamento dos recursos hídricos e de saneamento básico uma vez que, fornece subsídio para o dimensionamento de novas tecnologias ambientais.

Figura 7 - Estimativa do crescimento populacional geométrico do município de Itabirito.



Fonte: SAAE (2017).

4. ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

Conhecer a qualidade e a quantidade das águas é uma ferramenta básica para definir estratégias que busquem a conservação, a recuperação e o uso racional dos recursos hídricos, reduzindo os conflitos e direcionando as atividades econômicas.

Para isso os Índices de Qualidade das Águas - IQA's, vêm sendo utilizados em programas de monitoramento por possuírem a capacidade de transmitir de forma concisa e objetiva para autoridades e para o público a influência que as ações antrópicas provocam sobre a qualidade dos ecossistemas aquáticos (IGAM 2016).

No Brasil, o IQA foi utilizado a partir de uma adaptação feita pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) de um estudo realizado em 1970 nos Estados Unidos pela National Sanitation Foundation (NFS). O Índice foi utilizado pioneiramente em 1975 pela CETESB, sendo adotado pelos demais estados brasileiros nas décadas seguintes, tornando-se o principal índice de qualidade de águas utilizado no país (SOUZA 2018).

O uso do índice baseou-se por meio de uma pesquisa de opinião realizada com especialistas em relação à qualidade de água, indicaram-se as variáveis a serem utilizadas e os pesos associados a estas. Inicialmente haviam sido sugeridas 35 variáveis, das quais 9 foram selecionados a compor o índice, a saber: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, potencial hidrogeniônico, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura da água, nitrogênio total, fosfatos, turbidez e sólidos totais (CETESB 2019). A Tabela 1 mostra os parâmetros e os pesos atribuídos a cada variável que compõe o IQA e a Equação 1 demonstra como é feito o cálculo do índice de qualidade.

Tabela 1 - Parâmetros do IQA e os pesos associados de acordo com a CETESB.

Parâmetros de qualidade da água CETESB	Peso(w)
Oxigênio dissolvido (OD mg/L)	0,17
Coliformes Termotolerantes (100 ml/NMP)	0,15
Potencial Hidrogeniônico – pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO ₅ ,20°C	0,12
Temperatura da água (°C)	0,10
Nitrogênio Total (mg/L NO ₃ ⁻)	0,10
Fosfatos (mg/L PO ₄ ³⁻)	0,10

Fonte: CETESB (2019).

O IQA é obtido pelo produtório ponderado dos nove parâmetros, segundo a Equação 1:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Equação (1)

Onde:

- IQA = Índice de qualidade de Água, variando de 0 a 100;
- q_i = Qualidade do parâmetro i obtido através da curva média específica de qualidade;
- w_i = Peso atribuído ao parâmetro, em função da importância na qualidade, entre 0 e 1;
- n = número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

A partir do cálculo efetuado pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, variando numa escala de 0 a 100, representado no Quadro 1 e no Quadro 2 são representadas as classes do IQA e seu significado sanitário.

Quadro 1 - Faixas do IQA de acordo com os estados.

Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: AL, MG, MT, PR, RJ, RN, RS.	Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: BA, CE, ES, GO, MS, PB, PE, SP.	Avaliação da Qualidade da Água
91 – 100	80 – 100	Ótima
71 – 90	52 – 79	Boa
51 – 70	37 – 51	Razoável
26 -50	20 – 36	Ruim
0 – 25	0 – 19	Péssima

Fonte: ANA (2019).

Quadro 2 - Classe dos IQA's e seu significado sanitário.

IQA	Avaliação da Qualidade da Água	Significado
91 – 100	Ótima	Águas apropriadas para tratamento convencional visando o abastecimento público.
71 – 90	Boa	
51 – 70	Razoável	
26 -50	Ruim	Águas impróprias para tratamento convencional visando o abastecimento público, sendo necessários tratamentos mais avançados.
0 – 25	Péssima	

Fonte: ANA (2019).

4.1.1. Índice de qualidade das águas em Minas Gerais.

Em Minas Gerais, o monitoramento da qualidade das águas superficiais é realizado pelo IGAM por meio do Projeto Águas de Minas. O programa que está em execução desde 1997 disponibiliza no Portal InfoHidro (ANA) uma série histórica da qualidade da água e atualmente conta com 588 estações de monitoramento distribuídas no estado (IGAM 2016). O IGAM trimestralmente publica um relatório de qualidade das águas superficiais de Minas Gerais.

A partir do ano de 2003 o Instituto Mineiro de Gestão das Águas mesclou pesos e parâmetros dos IQA's da National Sanitation Foundation (NSF) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) onde predominou os parâmetros da NSF com os pesos atribuídos pela CETESB. Nesse contexto no ano de 2013 o IGAM substituiu o uso da bactéria E. Coli pelos coliformes termotolerantes com intuito de estabelecer um índice mais próximo das características dos rios brasileiros (IGAM 2019).

A bacia hidrográfica do rio Itabirito possui monitoramento da qualidade da água realizada pelo IGAM, por meio de seis estações instaladas no município de Itabirito e Ouro Preto. Os dados utilizados para o cálculo do IQA da série histórica foram extraídos da estação BV035, localizada a jusante do município de Itabirito no alto da bacia do rio das Velhas.

Os monitoramentos datam desde 1997, com monitoramento a montante e a jusante da cidade de Itabirito. Desde então, os principais parâmetros relacionados à qualidade da água da bacia hidrográfica são analisados e divulgados trimestralmente por meio do portal do IGAM.

5. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS RELACIONADAS COM A MORFOLOGIA.

5.1. Vazão Fluviométrica.

Um sistema de canais fluviais de variadas ordens constitui um sistema fluvial que forma a bacia hidrográfica. Uma bacia hidrográfica ou de drenagem é denominada por divisores de águas onde são limitados por terrenos mais altos, isto é, limitadores topográficos. Os divisores de águas contribuem com o aporte de água e sedimentos para o sistema fluvial principal e seus afluentes (CARVALHO 2008).

A vazão do sistema fluvial é de extrema importância no processo de simulação e quantificação de carga orgânica uma vez que retrata a capacidade de assimilação dos nutrientes, lançados por despejos tratados ou de forma *in natura*.

Carvalho (2008) define vazão por volume de água que passa numa determinada seção do rio por unidade de tempo onde são consideradas as variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo, e é usualmente expressa em m^3/s .

Para a determinação da vazão existem alguns métodos utilizados que se dividem em automáticos e indiretos. É considerado método automático o uso de molinetes hidrométrico, doppler acústicos Automatic Doppler Current profiler – ADCP.

Para os métodos indiretos, ou seja, método manual de estimar vazão são necessárias ferramentas básicas como fita métrica, régua milimétrica, objeto flutuante e cronômetro. Nesse caso é estimada a largura e a profundidade média do canal fluvial onde o cálculo da vazão é conforme Equação:

área ($w \cdot h = A$) da seção estudada e a velocidade, isto é, $V = t/d$.

Onde:

- $Q =$ Vazão (m^3/s);
 - $A =$ Área da seção do rio (m^2) ($w \cdot h$);
 - $V =$ Velocidade do fluxo (m/s);
 - $h =$ Profundidade média na seção transversal do canal (m);
 - $w =$ largura do canal (m).
- Equação (2)

Pinto *et.al*, (2005) aborda outros métodos de aferição de vazão em canais fluviais que são por processos químicos e nível da água.

Por processo químico cita-se por injeção contínua de solução e o método por integração. No primeiro lança-se no rio a montante uma vazão constante q de solução padrão

onde a concentração é C. Na seção de medição coletam-se amostras durante um tempo no máximo igual àquele em que q não varia em relação às amostras que são dosadas. Sendo C_1 sua concentração média, tem-se que $Q = q \frac{C}{C_1}$ é o valor procurado, desde que possa desprezar q em vista de Q.

No método de integração, é lançado um volume V de solução de concentração C, e colhem-se amostras a jusante durante toda a passagem da nuvem no tempo T. Se C_1 é a concentração média de todas as amostras colhidas no tempo T, tem-se $VC = QTC_1$.

As substâncias normalmente utilizadas para nesse método são o cloreto de sódio, bicromato de sódio ou fluorceína. Alguns aspectos devem ser levados em consideração como a turbulência ativa em toda a massa de água e ausência de água parada para existir a renovação constante das massas em toda a seção considerada (PINTO, *et.al* 2005).

Para o método de medidas a partir do nível da água são utilizados dispositivos como calhas medidoras (calhas parshall) e vertedores. As duas instalações causam um represamento a montante que corresponde ao consumo de uma vazão por acumulação e que não está sendo medida (PINTO, *et.al*, 2005).

5.2. Poluição de Rios por Matéria Orgânica

Várias são as causas de poluição dos recursos hídricos por matéria orgânica, entretanto as principais fontes de poluição de água de rios geralmente estão associadas com o despejo inadequado de esgotos sanitários. Haja vista que os rios tendem a piorar sua qualidade nos trechos onde se concentra a maior parte da população, isto é, nos centros urbanos.

A introdução de matéria orgânica em um corpo hídrico resulta no consumo indireto de oxigênio dissolvido (VON SPERLING, 2005). Isso ocorre devido à presença de microrganismos decompositores que irão utilizar desse oxigênio para estabilizar a matéria orgânica.

Em alguns casos existem rios que conseguem se auto depurar, isto é, voltar a ter as condições ecológicas mais próximas do que era antes do despejo do esgoto *in natura*. No entanto, para que haja esse equilíbrio, são necessários alguns fatores relevantes como a capacidade de reaeração do rio, tempo e distância.

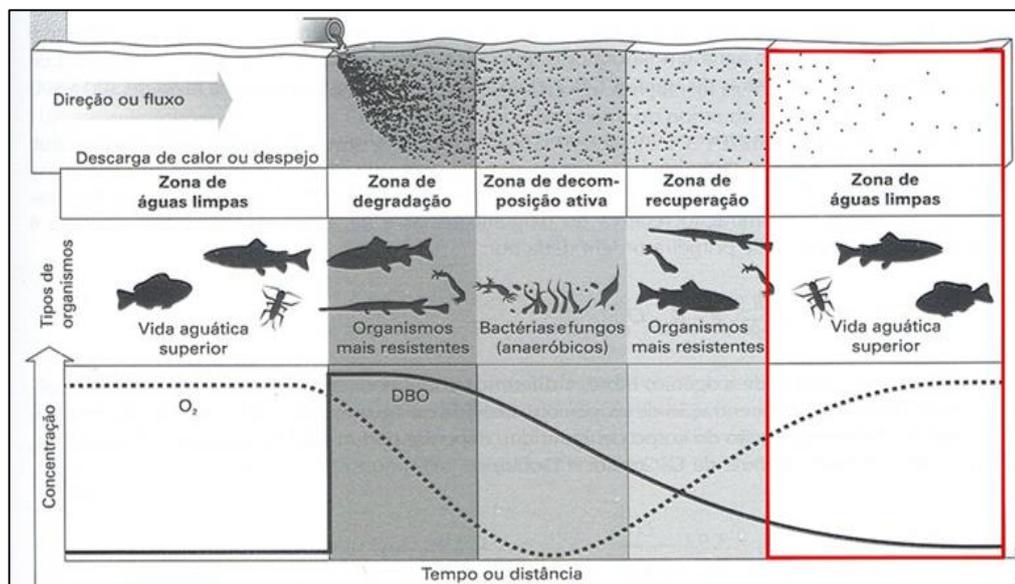
5.2.1. Autodepuração dos Rios

De acordo com Braga *et. al* (2005) a qualidade da água de rios pode ser representada e modelada por intermédio de algumas variáveis físicas, químicas e biológicas. Os principais parâmetros de interesse sanitário são a demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio e fósforo. Braga (2005) define DBO₅ (Demanda bioquímica de oxigênio) como a quantidade de oxigênio utilizado no processo aeróbio de organismos decompositores para a decomposição completa da matéria orgânica lançada na água.

O equilíbrio das variáveis de DBO₅, definida por Braga (2005) e OD leva ao processo ecológico denominado autodepuração. Von Sperling (2005) define autodepuração como o fenômeno vinculado ao reestabelecimento do equilíbrio no meio aquático após as alterações induzidas pelos despejos afluentes.

Diante do exposto é possível compreender o porquê há relevantes estudos referente a qualidade de água utilizando a variável de DBO₅. A Figura 8 ilustra a dinâmica do corpo d'água ao receber despejos de matéria orgânica em relação ao balanço de oxigênio dissolvido.

Figura 8 - Processo de Autodepuração.



Fonte: Braga *et. al* (2005).

É sabido que os poluentes ao entrarem em contato com o meio aquático sofrem diversas alterações em suas características físicas e químicas. Considerando que os corpos d'água não são estáticos e por si só apresentam movimento dado pela gravidade e as cotas altimétricas da bacia, é que os poluentes são transportados do seu ponto de despejo

alcançando outras regiões do ambiente aquático. Nisto se observa que quanto maior for à intensidade e a velocidade do escoamento e drenagem do rio, maior será a dispersão dos poluentes no meio líquido.

De acordo com Braga *et.al* (2005), há duas maneiras de difusão dos poluentes, a saber, molecular e turbulenta. A molecular em suma na maioria das vezes suas concentrações são nulas, todavia, na difusão turbulenta onde o escoamento da água provoca mistura mais rápida devido à existência de turbulência, observa-se maior interação entre os dois fluidos, isto é, a diluição que é o resultado do processo de mistura entre o despejo e a água presente no corpo de água.

O mecanismo bioquímico de um corpo de água é conhecido pela sua cadeia alimentar onde pode ser observado um equilíbrio que não necessariamente é estático entre a produção, o consumo de matéria e energia. Por isso quando a matéria orgânica biodegradável é lançada no meio aquático, os organismos decompositores começam imediatamente a degradar a matéria despejada e isso implica no consumo indireto de oxigênio dissolvido. Entende-se que quanto maior for à concentração de matéria orgânica presente no esgoto lançado, maior será o consumo do oxigênio dissolvido.

Considerando visão integrada da gestão ambiental dos ecossistemas, a compreensão da autodepuração de um rio é de fundamental importância para a tomada de decisões de cunho político. Na prática o conhecimento de autodepuração implica na utilização da capacidade de assimilação do rio, no estabelecimento de classes, enquadramentos e critérios de lançamentos.

Os rios funcionam como um reator por possuir características de reações semelhantes ao reator biológico de tratamento de esgotos sanitário. De acordo com Von Sperling (2014) os principais fatores para entender o rio como um reator biológico são: cinética de reações, balanço de massa, representação hidráulica de rios e equações de mistura.

Na maioria das vezes as reações que acontecem em rios são lentas, por isso conhecer a taxa de reação, isto é, processo de transformação de nutrientes presentes na massa líquida, se mostra relevante no processo de balanço de massa da bacia hidrográfica. Conforme Von Sperling (2014) a demonstração da relação da taxa de reação com a concentração do reagente e a ordem da reação é expressa pela seguinte equação conforme Equação 3 onde:

$$r = KC^n \quad \text{Equação (3)}$$

onde:

- r = taxa de reação ($ML^{-3} T^{-1}$);
- K = constante de reação (T^{-1});

- C = concentração do reagente (ML^{-3});
- n = ordem de reação.

6. MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA

Ao longo dos anos várias técnicas quantitativas foram elaboradas com intuito de determinar o impacto do lançamento de águas residuais nos rios. Estas técnicas vão desde os conceitos básicos de equilíbrio de massa utilizado em 1912, até o uso atual de softwares de computador na simulação da cinética de decomposição de poluentes lançados sem prévio tratamento no meio natural. (FLECK, *et. al* 2013).

É sabido que cada sistema aquático pode possuir comportamento hidráulico diferenciado, logo, vários modelos têm sido desenvolvidos para variados tipos de cursos hídricos. De acordo com Fan *et al.* (2009), ao longo dos anos, vários modelos de qualidade da água foram desenvolvidos para diferentes tipos de corpos d'água como rios, lagos e reservatórios. Alguns desses modelos têm incluído parâmetros básicos (OD e DBO), enquanto outros são mais criteriosos incluindo níveis de eutrofização e impactos por toxicidade.

Os primeiros estudos relacionados à modelagem da qualidade da água foram desenvolvidos em 1925, no rio Ohion nos Estados Unidos da América por Streeter Phelps com o principal objetivo de referenciar as fontes de poluição através do balaço de oxigênio consumido a jusante dos lançamentos de esgotos.

Em 1970 o modelo Water Analysis Simulation Program (WASP), desenvolvido para estudos de impactos de variados poluentes sobre a qualidade dos meios aquáticos. No ano de 1985 a USEPA (United States Environmental Agency) desenvolve e lança o modelo Qual2E que pode modelar até 15 variáveis de qualidade da água incluindo o parâmetro de algas (OPPA 2007).

A partir de Streeter Phelps vários modelos foram surgindo com intuito de compreender o cenário da qualidade das águas em bacias hidrográficas em várias partes do mundo. O modelo São exemplos, QUAL-2E de FISCHER (1995), QUAL-2K CHAPRA *et al.*, (2008) e o QUAL-UFMG (VON SPERLING 2007). Tais modelos são baseados nas equações de Streeter e Phelps, e têm sido muito utilizados em diagnósticos e prognósticos de irregularidades decorrentes da implantação de empreendimentos (BEZERRA *et al.* 2008).

A percepção ambiental nas últimas décadas pode ter favorecido o protagonismo social o que desencadeou maior preocupação pela preservação dos recursos hídricos, elevando o uso dos modelos matemáticos para a gestão e sustentabilidade das bacias hidrográficas.

Na França, por exemplo, foi desenvolvido um simulador, calibrado especificamente para averiguar a qualidade da água do rio Sena (EVENA *et.al* 2007). O simulador PROSER foi idealizado para determinar consumo de oxigênio dissolvido, após despejos de esgotos sanitários vindos das zonas do subúrbio parisiense o que se assemelha com o objetivo do modelo clássico de Streeter Phelps.

A modelagem aplicada no rio Sena considerou as sazonalidades meteorológicas francesa, permitiu verificar a saturação de oxigênio dissolvido (OD) em vários períodos, sobretudo nos mais secos, e calibrou as variáveis de acordo com a Diretiva Europeia para recursos hídricos. Nesse caso o modelo não tratou exatamente do cenário, mas, buscou mapear os impactos ambientais decorrentes da ocupação sem planejamento urbano.

Do mesmo modo o emprego de modelo matemático foi utilizado para validação e aplicação de modelos de Rede Neural Artificial (RNA) para o cálculo dos níveis de oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no rio Gomti na Índia, principal afluente do rio Ganges.

O método RNA aplicado para simular a qualidade da água na bacia hidrográfica do Gomti na Índia parte do emprego de onze variáveis de qualidade da água de entrada, medidas na água do rio durante um período de 10 anos a cada mês em oito locais diferentes. A parti disso foi elaborado coeficiente de determinação (R^2) (quadrado do coeficiente de correlação), do erro quadrático médio (RMSE) calculado a partir dos valores medidos e modelados das variáveis dependentes (SINGH *et. al*, 2009).

No Brasil o emprego de modelos matemáticos para simular qualidade da água tem cooperado com o balanço de carga poluidora, na determinação de curvas de permanência de qualidade de água e para analisar a capacidade de autodepuração de corpos d'água. Esse emprego de modelos pode ser ilustrado com o caso da bacia do Alto Iguaçu que concentra cerca de 30% da população urbana do estado do Paraná (FERREIRA *et.al* 2016). Os autores utilizaram o simulador SIHQAL que é pautado em métodos de diferenças finitas explícitas integradas com a equação de transporte de massa, para determinar demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD).

O trabalho desenvolvido na bacia do Alto Iguaçu mostrou relevante perspectiva para o gerenciamento ambiental, principalmente no tocante aos instrumentos de gestão de recursos hídricos, como o enquadramento, por exemplo.

Em 2009 a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul utilizou o modelo de qualidade de água QUAL-UFMG para simular a qualidade da água da bacia do rio Taquarizinho, sub-bacia da Bacia do Taquari, que é uma das áreas mais impactadas da região

do Pantanal gerando crescente discussão a respeito dos impactos ambientais existentes (RIBEIRO, *et. al*, 2009). A área de estudo possui considerável relevância hidrográfica, pois está situada na Bacia do Alto Paraguai (BAP), onde se encontra o Pantanal Sul mato-grossense. De modo geral os pesquisadores dividiram o rio em seções para calibrar o QUAL-UFMG e utilizaram a ferramenta Solver do Excel para simular as variáveis de oxigênio dissolvido e demanda química de oxigênio. Para a determinação do K_2 foi utilizado às equações em função da velocidade média e profundidade média das águas das seções, equação de Owens.

Diante do exposto o presente trabalho realizado na bacia hidrográfica do rio Itabirito, objetivou estudar a simulação da qualidade da água em período seco e chuvoso no ano de 2019 a partir da determinação das variáveis de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e vazão fluviométrica. Para a compilação do estudo realizou-se levantamento histórico da qualidade de água com dados fornecidos pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e dados de pluviosidade fornecida pela plataforma da Agência Nacional das Águas (ANA).

6.1. QUAL-UFMG

A plataforma QUAL-UFMG, criada por VON SPERLING (2007) tem sido utilizada para a modelagem da qualidade da água. O programa em Excel QUAL-UFMG, desenvolvido em planilhas, tem como objetivo possibilitar a modelagem de rios através da utilização de um modelo baseado no QUAL2-E, desenvolvido pela USA Environmental Protection Agency (USEPA) conforme já mencionado.

A calibração do modelo é feita por meio do ajuste de coeficientes, que podem variar dentro de faixas determinadas, o que permite adequar as relações matemáticas às realidades físicas da área de estudo.

O QUAL-UFMG permite a modelagem dos seguintes constituintes ao longo do rio: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Nitrogênio Total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), Fósforo Total e suas frações (orgânico e inorgânico), Coliformes Termotolerantes ou E. coli.

Em diversos estudos tem-se utilizado o modelo QUAL-UFMG para simular diversos cenários. Ide (2016) utilizou o modelo para simular cenários e prever ao longo do tempo o

comportamento do rio Taquarizinho localizado na Bacia do Rio Taquari em Mato Grosso do Sul.

O mesmo modelo foi aplicado para estudar a qualidade de rios como ferramenta para o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos na Região dos Lagos (RJ), no Distrito Federal, Rio Camapuã afluente do Rio Paraopeba em Minas Gerais e em estudo de balneabilidade do Rio das Velhas. Pela interface, com os gráficos gerados, e pela linguagem em português, o modelo tem sido usado em grande parte das aplicações em que se utilizam outros modelos como o QUAL-2E (MOURÃO 2010).

6.2. Coeficiente de desoxigenação (K_1)

Quanto maior a concentração de DBO, mais rapidamente se processará a desoxigenação do corpo d'água. A taxa de oxidação da matéria orgânica é proporcional à concentração de matéria orgânica ainda remanescente em um tempo "t" qualquer conforme demonstrado na Equação 4.

$$L = L_0 \times e^{-k_1 \times t} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

- L – Concentração de DBO remanescente no tempo t [mg/L];
- L_0 – Concentração de DBO no tempo t inicial [mg/L];
- t – Tempo [dia];
- k_1 – Coeficiente de desoxigenação [dia^{-1}].

A quantidade de oxigênio consumida durante um período do teste de DBO é expresso pela Equação 5:

$$y = L_0 - L \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

- y – DBO exercida em um tempo t [mg/L];
- L_0 – DBO remanescente no t inicial [mg/L];

- L – concentração de DBO remanescente no tempo t [mg/L].

A equação 6 representa a progressão da DBO exercida.

$$L = L_0 \times e^{k_1 \times t} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

- y – DBO exercida em um tempo t [mg/L];
- L₀ – DBO remanescente no t inicial [mg/L];
- t – tempo [dia];
- K₁ – coeficiente de desoxigenação [dia⁻¹].

O coeficiente de desoxigenação representa a taxa de degradação da matéria orgânica na água ao longo do tempo se relacionando com as características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras. Alguns processos estatísticos e matemáticos que são utilizados na determinação de k₁ são listados abaixo. Os cálculos são possíveis a partir de resultados obtidos em laboratório por meio de amostras de água bruta analisadas. Os dados de entrada para estes métodos são os valores de DBO exercida há vários dias. A Tabela 2 apresenta os valores típicos de k₁.

Tabela 2 - Valores típicos de coeficiente de desoxigenação (K₁) (base e, 20°C).

Origem	K₁ (dia⁻¹)
Esgoto bruto concentrado	0,35 – 0,45
Esgoto bruto pouco concentrado	0,30 – 0,40
Efluente primário	0,30 – 0,40
Efluente secundário	0,12 – 0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08 – 0,20

Fonte: Von Sperling (2007).

Estudo realizado por Freire (2009) utiliza a modelagem matemática proposta pelo modelo de Streeter Phelps (1925) no rio Pirapora no Paraná. Os autores acharam valores de k₁ entre 0,10 d⁻¹ e 0,35 d⁻¹ em período úmido da bacia, isto é, de outubro de 2008 a abril de 2009.

Couto *et al.* (2011) utilizou do mesmo modelo que (FREIRE 2009) na bacia hidrográfica do rio Doce para fazer comparação experimental sobre o consumo de oxigênio dissolvido em função do tempo em dias. Os autores utilizaram valores de k_1 tabelado e experimental e verificou que para o coeficiente de desoxigenação tabelado houve divergências em relação aos coeficientes experimentais da pesquisa.

6.3. Coeficiente de reaeração superficial (K_2)

A cinética de reaeração é definida conforme Von Sperling (2007) pela Equação 7, onde demonstra que a taxa de absorção de oxigênio está intrinsecamente ligada com o declínio existente.

$$L = D_0 \times e^{-k_2 \times t} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

- D – Déficit de oxigênio em um tempo t [mg/L];
- D_0 – Déficit de oxigênio inicial [mg/L];
- t – Tempo [dia];
- k_2 – Coeficiente de reaeração [dia^{-1}].

O déficit de oxigênio dissolvido é dado pela Equação 8.

$$D = C_s - C \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

- D – Déficit de oxigênio dissolvido [mg/L];
- C_s – Concentração de saturação no corpo d'água [mg/L];
- C – concentração de OD existente no tempo t [mg/L].

O k_2 representa a taxa de reaeração do rio. Conforme Jordão & Pessoa (2011) a reaeração de um rio pode ocorrer por meio de troca gasosa da superfície da massa líquida do corpo d'água e a atmosfera. Quando o oxigênio do rio é consumido para que ocorra a

estabilização da matéria orgânica, torna-se necessária a passagem do oxigênio da atmosfera para o rio a fim de que as concentrações estejam em equilíbrio.

De acordo com Von Sperling (2007), os valores de k_2 podem ser determinados através de:

- Valores médios tabelados;
- Valores em função das características hidráulicas do corpo d'água;
- Valores correlacionados com a vazão do curso d'água.

Na Tabela 3 estão expressos os valores típicos de k_2 , levando em consideração uma classificação generalista dos corpos d'água. Rios rasos apresentam $H < 1,5$ m e rios profundos $H > 1,5$ m.

Tabela 3 - Valores típicos de coeficiente de reaeração K_2 (base e, 20°C).

Corpo d'água	K_2 (d ⁻¹)	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	> 1,15	> 1,61

Fonte: Fair et al. (1973) e Arceivala (1981), apud Von Sperling (2007).

Por meio das condições hidráulicas do rio, k_2 pode ser estimado dentro de uma faixa restrita de aplicação, pelas equações de O'Connor & Dobbins, Churchill, Owens, Tsivoglou-Wallace e Melching-Flores em funções da velocidade média do fluxo na seção transversal do rio, profundidade média, declividade, largura e vazão do mesmo, como exposto no Quadro 3. (VON SPERLING 2007).

Quadro 3 - Equações para previsão de coeficiente de reaeração superficial (k_2).

Pesquisadores	Fórmula	Faixa de aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,73 \times v^{0,5} \times H^{-1,5}$	$0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$ $0,05\text{m/s} \leq v < 0,8\text{m/s}$
Churchill et al. (1962)	$5 \times v^{0,97} \times H^{-1,67}$	$0,6 \text{ m} \leq H < 4,0 \text{ m}$ $0,8 \text{ m/s} \leq v < 1,5 \text{ m/s}$
Owens et al. (1964)	$5,3 \times v^{0,67} \times H^{-1,85}$	$0,1 \text{ m} \leq H < 0,6 \text{ m}$ $0,05 \text{ m/s} \leq v < 1,5 \text{ m/s}$
Tsivoglou-Wallace (1972)	$32,6 \times v \times I$	$0,03 \text{ m}^3 / \text{s} < Q < 0,3 \text{ m}^3 / \text{s}$ Rios pequenos
	$15,4 \times v \times I$	$0,3 \text{ m}^3 / \text{s} < Q < 8,5 \text{ m}^3 / \text{s}$ Rios médios
Melching - Flores (1999)	$517 \times (v + I)^{0,524} \times Q^{-0,242}$	$Q < 0,556 \text{ m}^3 / \text{s}$
	$596 \times (v + I)^{0,528} \times Q^{-0,136}$	$Q > 0,556 \text{ m}^3 / \text{s}$

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007).

Do mesmo modo que há pesquisas voltadas para avaliar a desoxigenação, existem também, pesquisas direcionadas ao estudo da reaeração, utilizando algumas das metodologias citadas anteriormente nessa revisão.

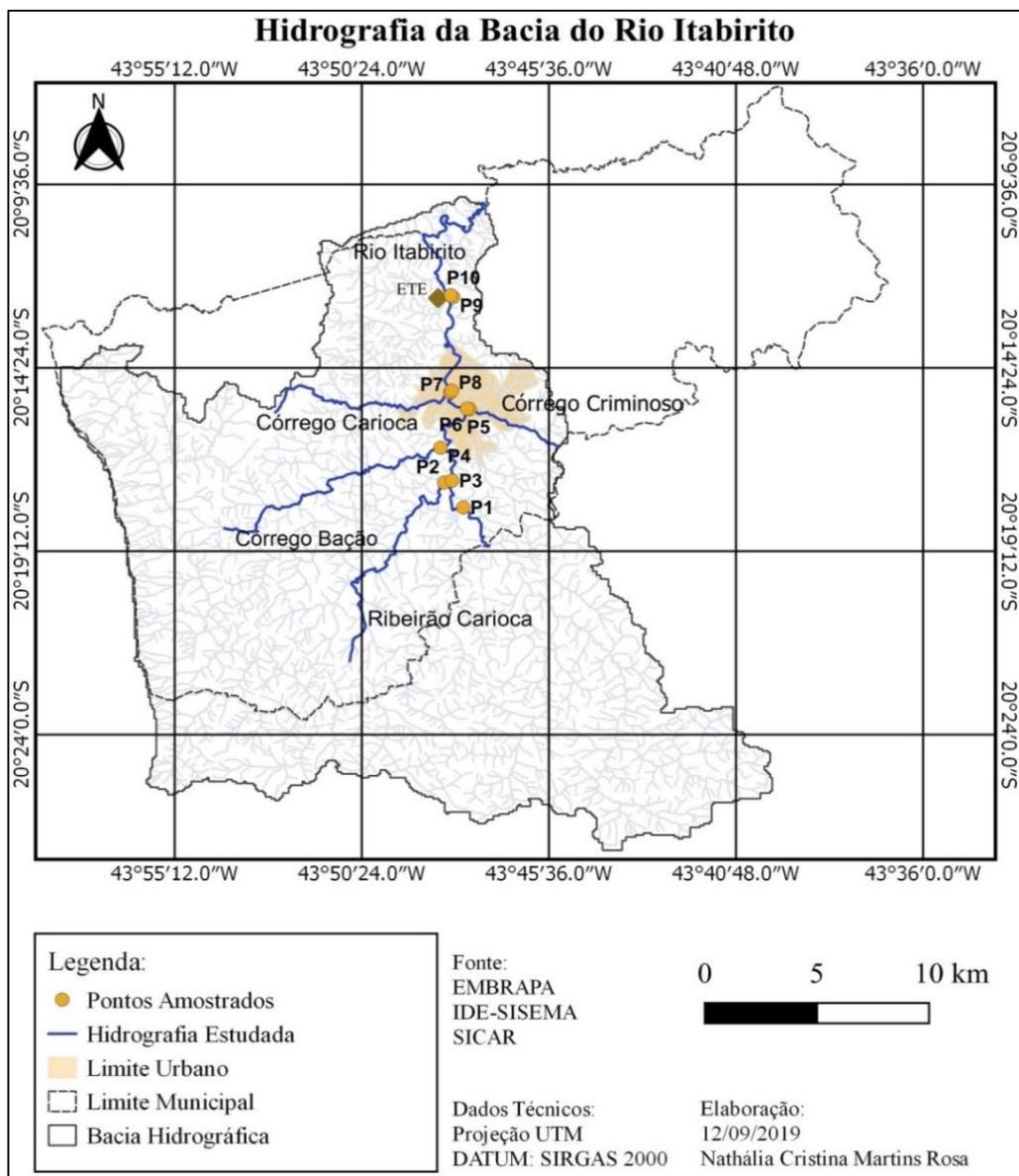
Estudo realizado por (BARROS *et al* 2011), no rio Turvo Sujo em Mina Gerais, pesquisou valores para coeficiente de reaeração em diferentes épocas do ano. Os autores conseguiram observar que os resultados de k_2 variaram entre 0,60 e 0,75 dia^{-1} . No rio Gualaxo do Norte em Minas Gerais Silva (2017) utilizou as mesmas equações de previsão de O'CONNOR & DOBBINS (1958) e OWENS *et al.* (1964) para quantificar o k_2 da bacia em períodos seco e chuvoso. A autora concluiu que existe uma relação entre a profundidade e a velocidade para os resultados de k_2 . Uma vez que a medida com que a profundidade do rio Gualaxo decrescia aumentava a velocidade os resultados de k_2 .

7. METODOLOGIA

7.1. Determinação dos pontos de coleta na bacia

Os pontos de amostragem foram determinados levando em consideração a composição geoeconômica da bacia e suas relevâncias socioambientais. Com o uso do programa Google Earth e a ferramenta QGis versão 3.4.11 foi possível delimitar a bacia e através do produto cartográfico os pontos foram determinados conforme Figura 9.

Figura 9 - Área de influência da vazão da bacia.



Fonte: Rosa (2019).

Em seguida foi realizado o georreferenciamento seguido da organização da cadeia de custódia, isto é, ficha de coleta de campo, que pode ser observada no Apêndice D. Os pontos georreferenciados e com altitude podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coordenadas geográficas e altitudes das seções o trecho estudado.

Código	Ponto	Latitude	Longitude	Altitude
P1	Rio Itabirito	20° 18' 3,07" S	43° 47' 47,76" O	892
P2	Ribeirão Carioca	20° 17' 23,90" S	43° 48' 17,19" O	877
P3	Rio Itabirito	20° 17' 20,92" S	43° 48' 5,11" O	876
P4	Córrego do Bação	20° 16' 29,29" S	43° 48' 22,81" O	867
P5	Córrego Criminoso	20° 15' 28,81" S	43° 47' 37,95" O	855
P6	Rio Itabirito	20° 15' 27,43" S	43° 47' 39,29" O	851
P7	Córrego Carioca	20° 15' 2,58" S	43° 48' 8,08" O	850
P8	Rio Itabirito	20° 14' 59,61" S	43° 48' 5,65" O	846
P9	Rio Itabirito	20° 12' 32,92" S	43° 48' 3,87" O	844
P10	Rio Itabirito	20° 12' 30,01" S	43° 48' 7,12" O	838

Fonte: Autor (2020).

7.2. Amostragens

Em 2019 foram realizadas duas campanhas de amostragem para investigar a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Itabirito. Foram consideradas as estações chuvosas e seca. A primeira coleta feita em 22/01/2019 na qual se buscou avaliar a qualidade no período chuvoso e na estação seca a coleta foi realizada 21/08/2019. O Índice de Qualidade das Águas foi determinado conforme metodologia de cálculo da ANA.

As amostragens no rio foram embasadas na Norma Brasileira (NBR) 9898/1987 estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) que trata sobre a preservação e técnicas de amostragem de efluentes e corpos receptores.

Para a coleta da água do rio foi usado amostragem da água superficial, balde de material inerte lançado contra a corrente com o auxílio de uma corda. A água do balde foi transferida para frascos de vidro na cor âmbar a fim de evitar reações fotoquímicas na amostra. Em cada ponto foi preenchido formulário de registro das condições ambientais como fatores meteorológicos e dados físico-químicos.

7.3. Análises

7.3.1 Análise de amostragem em campo

As análises de potencial de hidrogênio, oxigênio dissolvido (OD), temperatura e condutividade elétrica, foram realizadas in loco para não dar variação nos parâmetros conforme Figura 10. Para a determinação dos resultados de OD, foi utilizado Sonda HACH 40 D HQ eletrodo LDO101, para determinação dos resultados de condutividade elétrica, pH Sonda HACH 40 D HQ eletrodo Intellical PHC101. A determinação da turbidez se deu através do Turbidímetro digital portátil da HACH modelo 2100Q.

Figura 10 - Coleta de campo



Fonte: Autor (2020).

7.3.2 Análise em Laboratório

O Quadro 4 mostra os métodos utilizados para cada análise de água bruta realizada no laboratório interno da Autarquia municipal de Saneamento Básico.

Quadro 4 - Métodos padronizados adotados para as análises das amostras em laboratório.

Parâmetro	Unidade	Método/Referência utilizado	Descrição do Equipamento
DBO	mg/L	Hach Diluição sem semente	-
DQO	mg/L	Hach 8000 /USEPA	Espectrofotômetro dr 6000 TM uv-vis - Hach/Reator DRB 200 Hach
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	10071- Hach	Espectrofotômetro dr 6000 TM uv-vis – Hach
Fósforo Total	mg/L	10127- Hach	Espectrofotômetro dr 6000 TM uv-vis - Hach/Reator DRB 200 Hach
Coliformes Totais/ E. Coli	mg/L	Colilert 9223 B (APHA, 2012)	-

Fonte: Autor (2020).

7.3.3 Coliformes Totais e *Escherichia coli*

O método usado para determinação de coliformes totais e *Escherichia coli* foi o método de Substrato Cromogênico-Fluorogênico. Primeiramente as amostras foram coletadas em frascos esterilizados e com tiosulfato de sódio. Foi adicionado em cada amostra, todo o conteúdo do frasconete de Colilert contendo o substrato Cromogênico. Em seguida, os frascos foram fechados e agitados levemente para dissolver o reagente.

As amostras foram homogeneizadas 25 vezes e o conteúdo dos frascos foi transferido para a cartela Quanti-Tray. A seladora foi ligada e pré-aquecida até que a luz verde acendesse, indicando que a seladora estava pronta para uso. Com o auxílio de uma goma, a cartela foi introduzida no compartimento da seladora.

As amostras foram incubadas a $35,0 \pm 0,5$ °C durante 24 horas. Passado esse tempo, as amostras foram retiradas da estufa e a coloração dos frascos foi visualizada. A interpretação

dos resultados foi feita utilizando a tabela de conversão que acompanha as cartelas. Para obter o número de coliformes totais foi contado o número de cavidades que apresentou coloração amarela e dessas as que apresentaram fluorescência sobre luz UV-365nm foram usadas para obter o resultado de *Escherichia Coli* e Coliforme totais. Os resultados foram obtidos na unidade de Número mais provável - NPM. A Figura 11 mostra a incubação das amostras de água bruta dos pontos amostrado.

Figura 11 - Análise bacteriológica dos pontos amostrados



Fonte: Autor (2019).

7.3.4 Sólidos Suspensos Totais

Os dados para a variável de Sólidos Suspensos Totais foram utilizados da série histórica do Programa de Qualidade das águas do Instituto Mineiro de Gestão das Águas uma vez que o Laboratório interno de monitoramento de qualidade de águas e efluentes da Autarquia de Saneamento Básico do município de Itabirito não possui recursos para realizar os ensaios da série de sólidos.

7.4. Determinação da vazão fluvial

A vazão fluviométrica foi determinada por meio de medição indireta, onde a vazão é estimada levando em conta alguns parâmetros como largura do leito fluvial, altura média e seção do fluxo hidráulico.

Para determinar a largura do rio Itabirito no Ponto 10 e dos tributários, foi usada uma fita métrica e em seguida, a profundidade média foi medida com uma régua milimétrica. A régua foi colocada em vários pontos na seção traçada e o valor médio foi obtido dividindo a soma dos valores medidos pelo número de pontos em que as medições foram feitas.

Mediu-se também a velocidade média do fluxo de água na seção vertical do canal com o auxílio de uma esfera de isopor de diâmetro 30 mm que foi posicionada no centro do curso d'água. Essa esfera percorreu uma distância conhecida e determinada em 2 metros pré-determinada em um dado tempo, com isso a velocidade do rio principal e dos córregos tributários foram obtidas conforme Equação 9:

$$V = \frac{d}{t} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

- V= Velocidade (m/s);
- d= Distância (metros);
- t= Tempo (segundos)

O método indireto, que se baseia na equação de continuidade dos escoamentos líquidos, consiste na média da velocidade média (m/s), na profundidade média (m) e na largura (m) da seção transversal do rio. A partir dos dados de largura, profundidade média do canal e velocidade a vazão foi calculada conforme Equação 10.

$$Q = A \times v \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

- Q – vazão (m³ /s);
- A – área da seção transversal (m²);
- v – velocidade média do escoamento (m/s).

A área da seção transversal foi obtida a partir da Equação 11.

$$A = L \times H$$

Equação (11)

Onde:

- A – área da seção transversal (m²);
- L – largura da seção (m);
- H – altura média da lâmina d'água na seção (m).

Figura 12 - Determinação da vazão do rio



Autor (2019).

Para o coeficiente de rugosidade, utilizaram-se as faixas de valores obtidas por THOMANN E MULLER (1987) e EPA (1987) apud VON SPERLING, (2007), para cursos d'água naturais, levando em consideração as características do rio ($n = 0,0975$).

7.5. IQA

Os dados coletados no site do Instituto Mineiro de Gestão das Águas no período de 1998 a 2018 foram lançados na planilha de cálculo, utilizada pelo órgão no Projeto Águas de Minas. Do mesmo modo foi para os resultados obtidos no ano de 2019 por meio das campanhas realizadas durante a pesquisa.

A planilha consiste num arquivo do tipo. “xls”, o programa realiza o cálculo do IQA com base nos pesos e correções que o próprio órgão estabelece a cada uma das 9 variáveis que são adotadas de acordo com a importância para a qualidade da água.

O valor final obtido é associado a uma classe de qualidade, “Excelente”, “Boa”, “Razoável”, “Ruim” ou “Péssima”. Para essa pesquisa, o software utilizado para o cálculo do Índice de Qualidade da Água foi o Excel da Microsoft® Office 2016.

7.6. Determinação do coeficiente de desoxigenação (K_1)

Os resultados da pesquisa foram tratados por meio do software Microsoft Excel 2016, que produziu as curvas de decaimento de Demanda Bioquímica de Oxigênio exercida em relação ao tempo de incubação. O coeficiente k_1 foi calculado pela Equação 4 e pelo método do ajuste não linear por mínimos quadrados, através da ferramenta Solver do Excel, considerando tempo em dia, DBO observada em cada dia de medição (mg/L^{-1}) e a DBO calculada (mg/L^{-1}) conforme VON SPERLING (2007).

7.7. Determinação do coeficiente de reaeração superficial (K_2)

As características hidráulicas como profundidade, velocidade, declividade e vazão foram os parâmetros utilizados para determinar o coeficiente k_2 por meio de modelos empíricos. Estudou-se as equações de O’CONNOR & DOBBINS (1958), CHURCHILL *et al.* (1962), OWENS *et al.* (1964), TSIVOGLU - WALLACE (1972) e MELCHING - FLORES (1999), levando-se em consideração a faixa de aplicação.

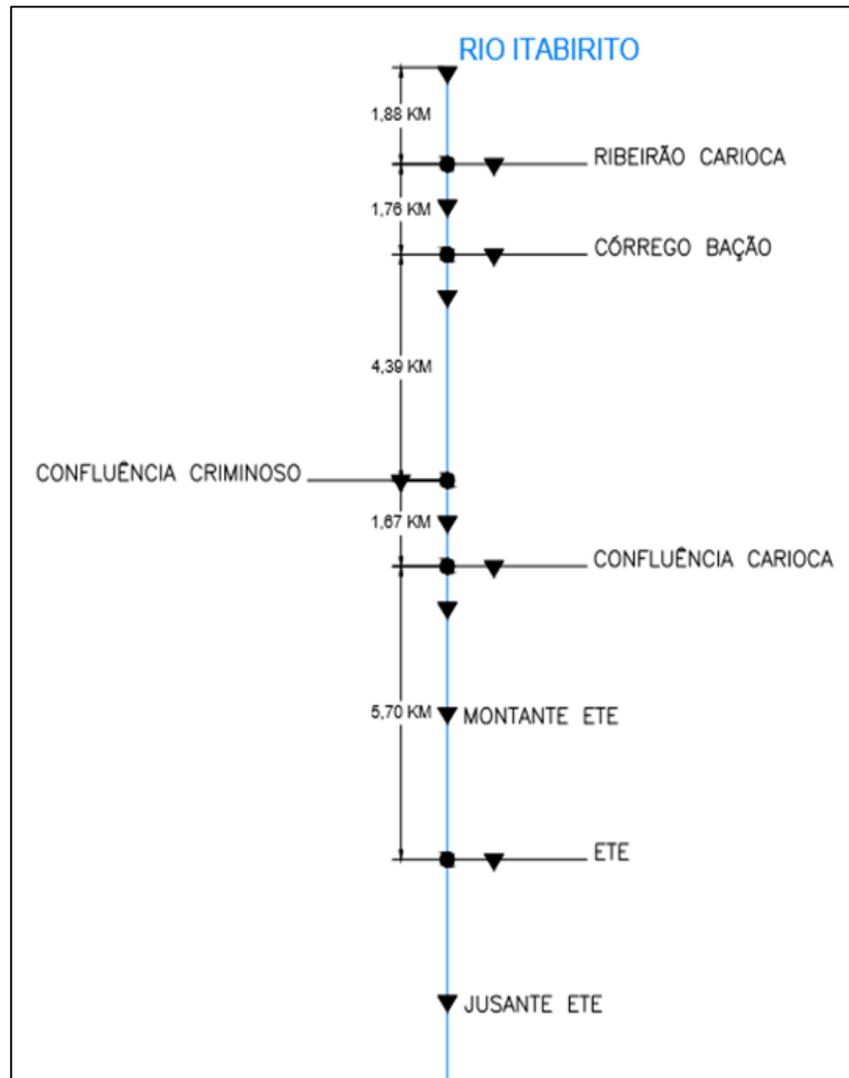
7.8. QUAL-UFMG 2017

A modelagem trabalhou os parâmetros OD e DBO ao longo do trecho estudado (15,10 km), correspondendo desde o primeiro ponto (P1) até o último ponto de amostragem (P10) e o delta da distância para a integração do comprimento para cada seguimento foi igual a 0,5 km.

A pesquisa não utilizou uma discretização mais precisa como sugere VON SPERLING (2007), pois segundo Rosa (2019) exigiria maior detalhamento nos dados de entrada para o ajuste do modelo.

Por meio do diagrama unifilar da bacia conforme Figura 13, é possível verificar a posição dos tributários que fazem parte do estudo e a localização dos pontos que foram realizados as amostragens.

Figura 13 - Diagrama unifilar das seções estudadas do rio Itabirito contendo os tributários.



Fonte: Rosa (2019).

Para melhorar o ajuste do modelo, estimou-se a vazão de contribuição doméstica de lançamento de esgotos nos cursos d'água da sede urbana de Itabirito, por meio da Equação 11.

$$Vazão\ doméstica\ \left(\frac{m^3}{dia}\right) = \frac{carga\ de\ DBO\ lançada\ \left(\frac{kg}{d}\right)}{concentração\ de\ DBO\ \left(\frac{mg}{L}\right)} \times 1000 \quad \text{Equação (11)}$$

Foi considerado a concentração de DBO mais diluída para o cálculo, dentre as sugeridas por VON SPERLING (2007), a dizer, 250 mg/L. O coeficiente de decomposição (kd) da matéria orgânica no rio foi baseado nas características hidráulicas do corpo hídrico,

vazão e profundidade, considerando a faixa de aplicação para profundidade entre 0,3 e 10 m e vazão entre 0,15 m³/s e 250 m³/s. Logo, kd foi obtido a partir da Equação 12.

$$Kd = 1,8 \times Q^{-0,49} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

- Kd – Coeficiente de decomposição da matéria orgânica [d⁻¹];
- Q – Vazão (m³ /s).

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1. Série histórica da qualidade da água da bacia do rio Itabirito entre 1998 a 2018.

Em um período de 20 anos a qualidade da água na bacia hidrográfica oscilou entre ruim e boa com valores de IQA que variaram entre 33,1 a 90,7 conforme evidenciado na Figura 14.

De 1998 a 2001 a qualidade da água na bacia variou entre ruim e razoável com IQA entre 54,2 no 2º trimestre de 1999 e 36,2 no 1º trimestre de 2000. Entretanto, na maior parte desse período a qualidade foi ruim.

No 4º trimestre do ano de 2003 houve melhoria na qualidade da água com IQA de 87,6, já no ano seguinte ocorreu oscilação entre ruim, razoável e bom entre os períodos trimestrais sendo 39,2, 60,3 e 60,3 para primeiro, segundo e terceiro trimestre respectivamente.

O ano de 2006 se manteve bom durante todas as campanhas de monitoramento do IGAM com IQA de 90,7. Entretanto, no ano de 2007 houve novamente redução na qualidade da água em 44,4% onde o IQA ficou de 40,9 a 53,3 e em 2008 de 33,1 a 52,4.

No período de 2010 a 2017 o IQA médio foi ruim de 46,2 que variou com razoável de 51,5 e 51,0 para o terceiro e quarto trimestre de 2012 respectivamente. Nesse período a qualidade se manteve razoável até o quarto trimestre de 2016 piorando em 2017 em 61% com IQA médio de 35,7.

O último ano da série histórica da qualidade da água da bacia, 2018, se mantém razoável com IQA de 54,3 que representa 64,8% de melhoria na qualidade em relação ao ano antecessor.

Em relação aos resultados mais baixos de IQA da série histórica, como esperado, o elevado índice pluviométrico característico do primeiro e quarto trimestre anual pode ter contribuído para a degradação da qualidade da água dos cursos d'água na bacia hidrográfica, como é possível observar na Figura 15.

O quarto trimestre de 2009 choveu mais que em todos os outros primeiros e quartos trimestres em vinte anos, nesse período o IQA foi razoável 57,0. O terceiro trimestre de 2006 registrou índice de pluviosidade menor que o quarto trimestre do ano de 2009, e o IQA para esse período em 2006 foi bom 90,7.

Em 2013 o índice pluviométrico foi o quinto maior da série histórica. Nesse período o IQA apresentou-se ruim em 48,3. Nota-se que para o período dos quartos trimestres, o IQA teve tendência em ficar ruim \leq a 49,0. No ano de 2008 nesse mesmo período o índice pluviométrico teve a segunda maior incidência e um IQA ruim de 33,1. Do mesmo modo o quarto trimestre de 2013 apresentou a quinta maior incidência de pluviosidade para esse período e IQA ruim de 48,3.

Analisando a série histórica dos IQA $\geq 80,0$ foram apresentados na maioria das vezes em períodos de menor incidência pluviométrica. No ano de 2004 o terceiro trimestre foi o segundo período com menor incidência pluviométrica e IQA bom de 87,6. Desse mesmo modo no ano de 2006 esse período apresentou o terceiro menor índice de incidência pluviométrica e IQA bom de 90,7.

A redução do escoamento superficial, em função das precipitações, e por consequência menor carreamento de poluentes nos cursos d'água, pode contribuir para a melhora no resultado do IQA. Entretanto, não há determinação de que a estação sazonal chuvosa está intrinsicamente relacionada com valores de IQA baixos, e o período seco com melhores resultados de qualidade de água, já que, algumas bacias hidrográficas tem capacidade de diluição significativa em detrimento à contribuição dos tributários.

No caso da bacia do rio Itabirito o SAAE iniciou interceptação de esgoto na sede urbana por volta do ano de 2006 como parte do projeto de instalação da estação de tratamento de esgoto da zona urbana do município. É sabido que as interceptações de esgoto podem contribuir para a melhoria da qualidade de água da bacia. Portanto, é possível relacionar a melhoria do IQA com as interceptações dos esgotos independente do índice de pluviosidade.

Saad et al. (2007), relacionou o decréscimo do IQA do reservatório Tanque Grande-SP com os maiores índices pluviométricos. O trabalho consistiu em analisar série histórica de 16 anos do reservatório onde considerou que em períodos chuvosos houve queda no índice de qualidade da água em consequência do aumento das concentrações de coliformes

termotolerantes. De acordo com os autores a interferência pode ter se dado devido às atividades de recreação humana e criação de gado.

Autores como DAMASCENO *et. al* (2015) identificaram melhores resultados de IQA na estação sazonal chuvosa. Os autores sintetizaram os resultados de IQA onde indicaram que a água do rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, no período menos chuvoso e chuvoso foi classificada, como "boa" e "ótima". Os autores fizeram uma relação com o aumento da turbidez e valores mais altos de coliformes termotolerantes na estação menos chuvosa. Os resultados apontaram que no período de menor vazão do rio, os valores para essas variáveis foram maiores do que em relação à estação chuvosa. De acordo com os autores, neste período, a baixa taxa de precipitação, diminui a vazão e favorece maior concentração de efluentes no manancial, o que pode contribuir para elevar os valores dos coliformes totais e turbidez.

Carvalho *et. al* (2016) detectou na bacia hidrográfica do Ribeirão São José em Porto Nacional no estado de Tocantins, valores baixos de IQA em vários pontos da bacia. Os autores relacionaram os baixos índices à descarga doméstica, atividades agrícolas e drenagem da bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica do Ribeirão São José está localizada na região metropolitana de Palmas com uma população de 49.146 conforme censo do IBGE 2015. Possui características geográficas e interferências antrópicas semelhantes à bacia hidrográfica do rio Itabirito.

Os autores atribuem os valores baixos de IQA ao uso e ocupação do solo, uma vez que determinados pontos amostrais localizados na zona rural apresentaram valores melhores do índice.

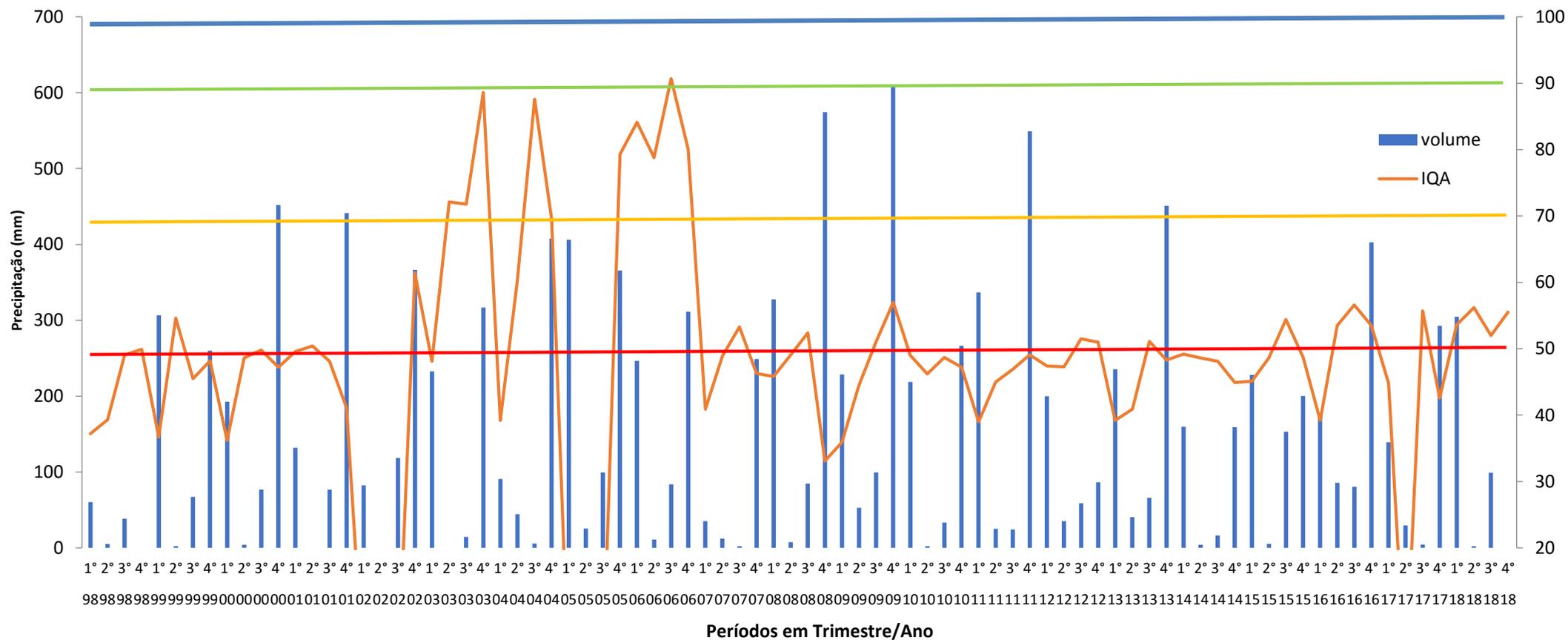
Estudos similares dos autores LOPES & MAGALHÃES (2008), ESTEVES & MENEZES (2011), RUBIO-ARIAS (2013), DRUMOND (2016) e ABED *et.al* (2017), relacionam as variações nos valores do índice de qualidade de água com as contribuições de despejos de efluentes industriais, domésticos e a drenagem da bacia. Característica semelhante ao da bacia hidrográfica do rio Itabirito que teve seu IQA variado por causa do escoamento da bacia além de sofrer interferências por despejos de efluentes industriais, esgotos domésticos *in natura* e atividades de agropecuária.

Na Figura 15 estão expressos os resultados mais baixos e os mais elevados do IQA da série histórica da bacia hidrográfica do rio Itabirito. Os valores de *E. coli* e de turbidez foram as variáveis que mais contribuíram para o IQA ruim. Esses valores foram observados na sazonalidade chuvosa da bacia no primeiro e no segundo trimestre de 1998 onde a precipitação para esses períodos foram 60,5 mm e 1 mm. No primeiro trimestre de 1999 e quarto trimestre de 2008 com precipitação 306,9 mm e 574,3 mm respectivamente. Mesmo

não havendo incidência pluviométrica para o segundo trimestre de 1998, as variáveis de coliformes termotolerantes e turbidez permaneceram ruins. Isso porque na baixa pluviosidade os despejos tendem a ficar concentrados na bacia podendo elevar o grau de turbidez e a concentração de patógenos.

Os IQA's mais elevados foram observados tanto em períodos secos quanto no chuvoso. Na sazonalidade seca, isto é, terceiro trimestre de 2006 e terceiro trimestre de 2004 o IQA foi de 90,7 com precipitação de 83,7 mm e IQA 87,6 não havendo registro de precipitação para o terceiro trimestre de 2004. Na sazonalidade chuvosa observada no primeiro trimestre 2006 e no quarto trimestre de 2003 o IQA foi 84,4 com precipitação de 246,4 mm e IQA 88,6 com precipitação de 317 mm respectivamente.

Figura 14 - Série histórica de pluviosidade e IQA (1998 a 2018) da bacia hidrográfica do rio Itabirito.

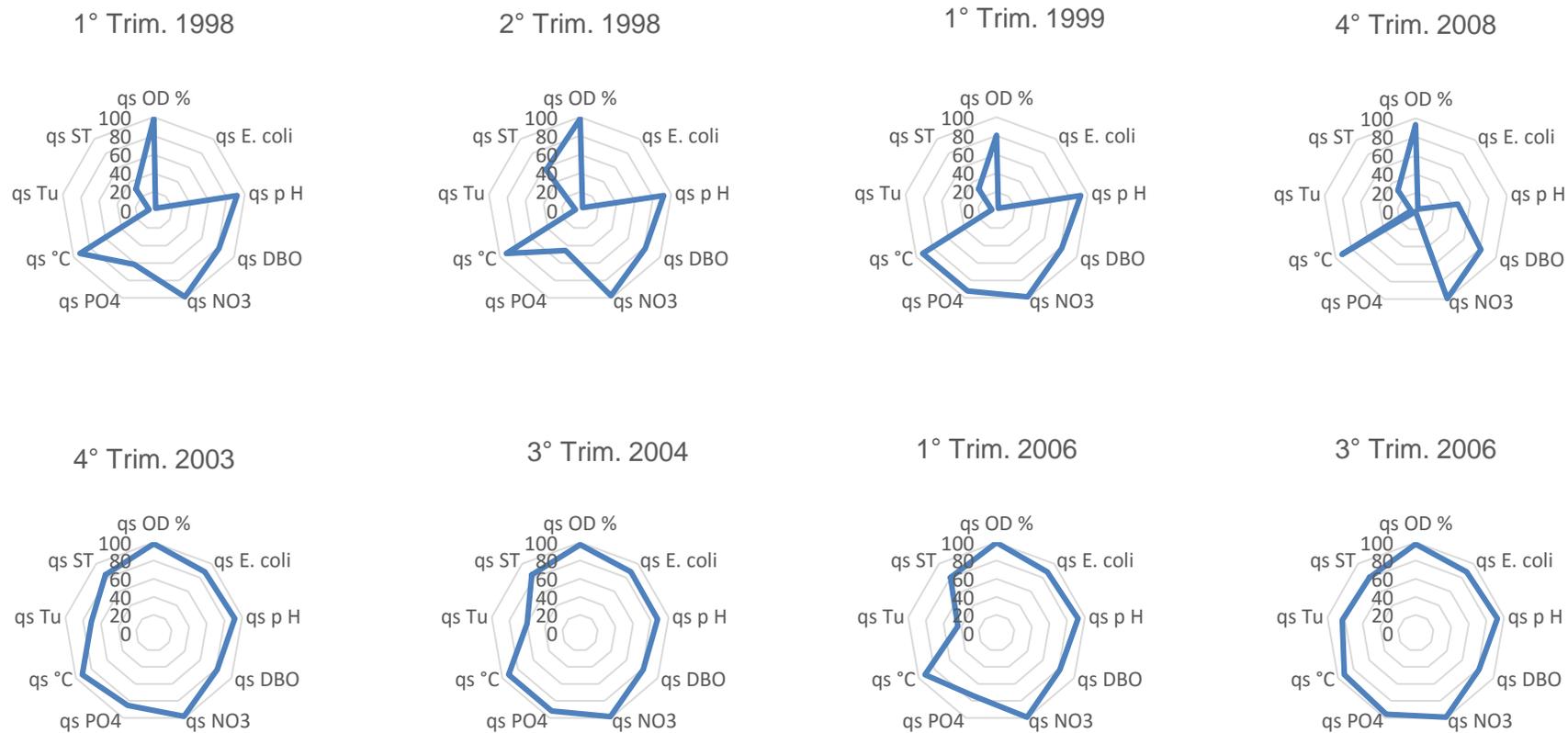


Legenda:

- IQA Ruim (26 a 50)
- IQA Razoável (51 a 70)
- IQA Bom (71 a 90)
- IQA Excelente (91 a 100)

Fonte: IGAM * Não houve cálculo de IQA no 1°, 2° 3°/02 e 1°, 2°, 3°/2005 devido à ausência de dados.

Figura 15 - Valores mais baixos de IQA (1° trim. 98, 2° trim. 98, 1° trim. 99, 4° trim. 08) e valores mais elevados de IQA (4° trim. 03, 3° trim. 04, 1° trim. 06, 3° trim. 06) da série histórica.



Fonte: Autor (2019).

8.2. Monitoramento da água da bacia hidrográfica do rio Itabirito realizado pelo IGAM em 2019.

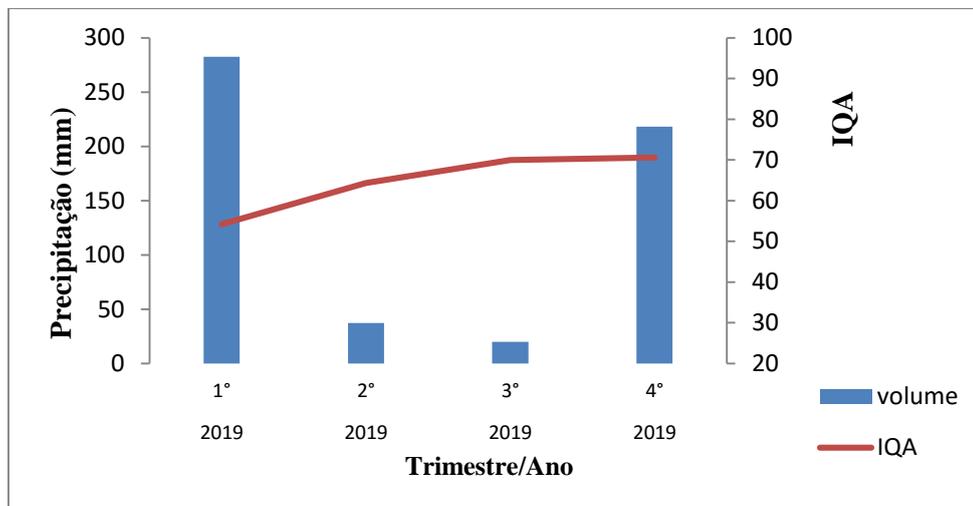
O ano de 2019 apresentou relativa baixa na pluviosidade sendo 282,5 mm para o primeiro trimestre, 37,2mm para o segundo, 20 mm para o terceiro e 218 para o quarto trimestre. A Figura 16 ilustra e relaciona os dados de pluviosidade e da qualidade da água da bacia.

O IQA determinado pelo monitoramento do IGAM, para o ano de 2019 oscilou entre 54,2 a 70,6. O primeiro trimestre foi o período que ficou com o menor índice de qualidade para o ano de 2019 que apresentou IQA razoável 54,2 e precipitação de 282,5 mm. No segundo trimestre houve avanço na qualidade, entretanto, permaneceu razoável 64,3. A baixa incidência na pluviosidade não interferiu na qualidade da água nesse período. Mesmo havendo melhoria da qualidade da água nos períodos, o IQA permaneceu razoável, porém, é relevante ressaltar que no terceiro e quarto trimestre o IQA ficou em 70,0 e 70,6 e precipitação de 20 mm e 218 mm respectivamente.

A análise da série histórica mostra que há uma tendência de maior incidência pluviométrica para o primeiro trimestre da bacia hidrográfica se comparado ao ano de 2019. Em 2018 nesse mesmo período a precipitação foi de 304,6 mm e IQA razoável de 53,6. No ano de 2015 a precipitação foi 227,9 mm e IQA ruim de 45,1 já para o ano de 1998, apresentou precipitação de 306,6 mm e IQA ruim de 36,7.

O índice pluviométrico pode não estar condicionado como fator de deterioração da qualidade da água. Ao se avaliar a série histórica, observa-se que para o primeiro e segundo trimestre de anos anteriores ao ano de 2019, houve períodos em que ocorreu relevante incidência pluviométrica, entretanto, a qualidade da água não sofreu interferência se comparado com os outros anos para o mesmo período.

Figura 16 - Valores de IQA da estação de monitoramento do IGAM na bacia hidrográfica do rio Itabirito, para o ano de 2019.



Fonte: IGAM, 2019 - Estação Lagoa Grande código 2043002.

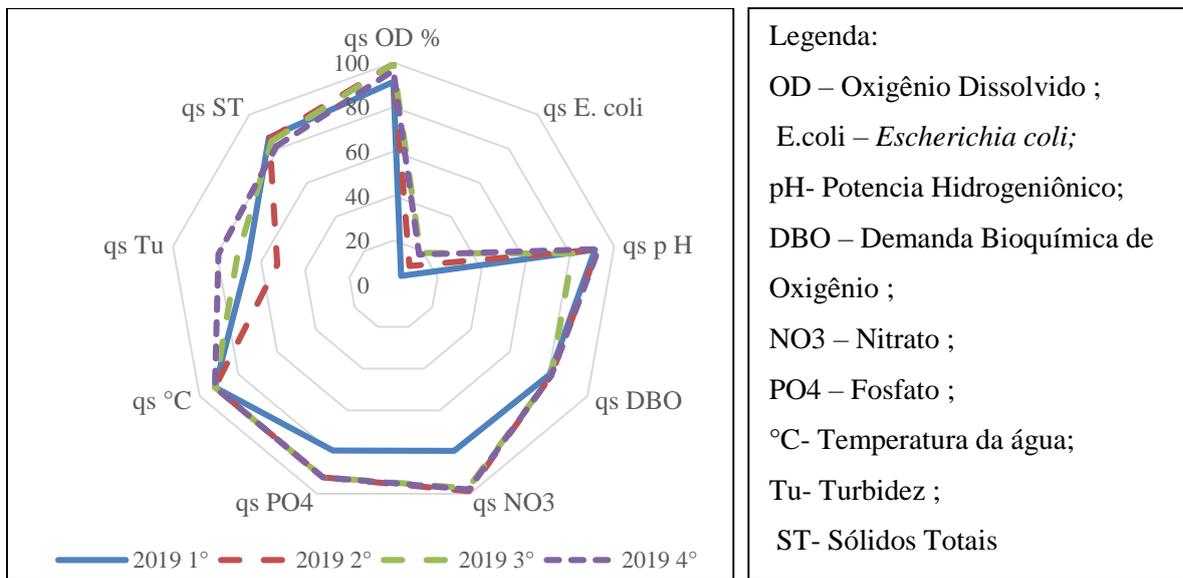
O parâmetro que mais contribuiu para a degradação da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Itabirito no ano de 2019 foi a *E. coli*. De acordo com o monitoramento do IGAM o único parâmetro significativo para o resultado final do IQA, como pode ser observado na Figura 17.

Para todos os trimestres do ano de 2019 o parâmetro *E. coli* se mostrou ruim, variando entre qs 11,17 para o primeiro trimestre, período em que não houve precipitação pluviométrica e qs 18,77 para o terceiro trimestre período em que também não houve chuvas. No quarto trimestre, período com maior incidência de pluviosidade em 2019, o qs para *E. coli* permaneceu ruim 17,81.

Do mesmo modo Glória (2014) ao analisar o rio Casca identificou variações nas concentrações de Coliformes fecais. A autora atribui essas variações a influência das pressões antrópicas sobre as águas da bacia hidrográfica. Marques (2016) relaciona os períodos secos e chuvosos da bacia do rio Santa Bárbara com a qualidade das águas. Dentre os parâmetros com maior destaque para a deterioração da água da bacia foi *E. Coli*, indicando que a contaminação dessa bacia se dá principalmente pelo lançamento de esgotos sanitários, independente do período analisado.

As altas concentrações de *E. Coli* na bacia hidrográfica do rio Itabirito pode estar associada com a descarga de esgotos sanitários, principalmente na mancha urbana quando recebe o tributário córrego Criminoso.

Figura 17 - Principais parâmetros influenciadores nos resultados do IQA trimestral em 2019, pelo monitoramento do IGAM.



Todos os parâmetros monitorados pelo IGAM, na bacia hidrográfica do rio Itabirito em 2019, atenderam os limites estabelecidos pela Resolução do CONAMA 357/2005 para classe 2, exceto para o parâmetro de *E. coli*, que além de contribuir para redução da qualidade da água, devido ao seu peso atribuído no cálculo, excedeu o limite máximo para águas classe 2 que é de 10×10^2 NMP/100 mL⁻¹.

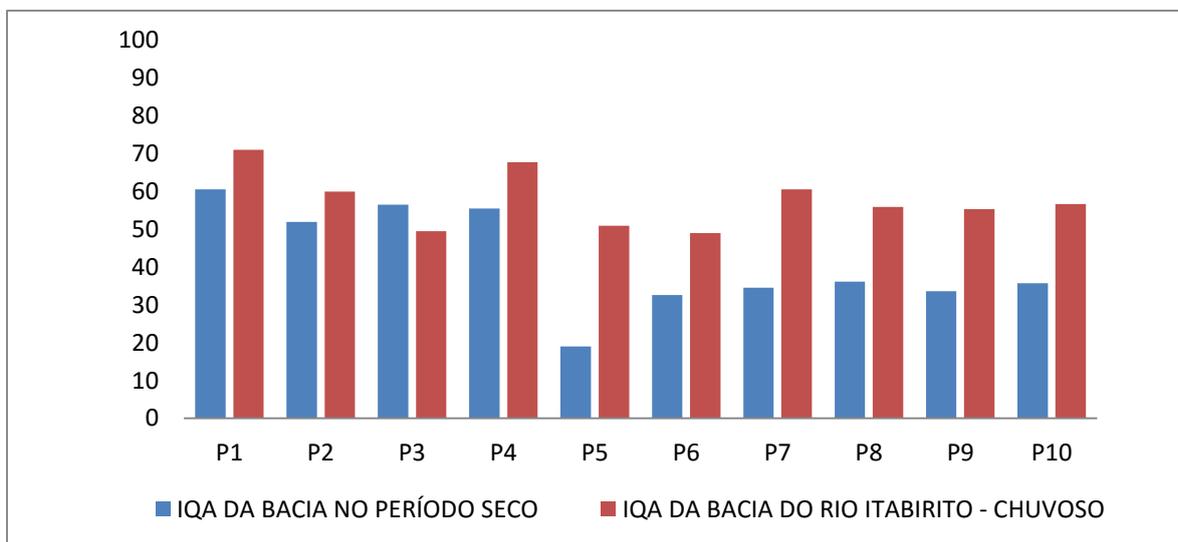
8.3. Índice de Qualidade de Água com dados primários – Monitoramento 2019.

Os resultados das campanhas de monitoramento da qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Itabirito variaram entre ruim e razoável, com IQA's oscilando entre 49,5 a 71,0 para a estação chuvosa e 19,0 a 60,5 para a estação seca conforme a Figura 18. As duas campanhas contemplaram dez pontos amostrais ao longo da bacia, levando em conta os principais tributários e suas confluências com o rio Itabirito. O tributário que apresentou pior qualidade na água foi o córrego Criminoso com IQA de 19,0 na estação seca. O que pode ter contribuído para a degradação da qualidade da água do rio Itabirito em 57,8 %.

O IQA do rio Itabirito a montante da confluência com o Córrego Criminoso foi de 56,6 e a jusante da confluência desse tributário foi 32,6. O baixo IQA observado no córrego Criminoso no período de estiagem pode estar relacionado com a elevada concentração de *E.*

coli $14,19 \times 10^3$ NMP/100mL, baixa concentração de oxigênio dissolvido 3 mg/L^{-1} , alta Demanda bioquímica de oxigênio 124 mg/L e elevada fração de Nitrogênio total 24 mg/L^{-1} .

Figura 18 - Valores de IQA nos pontos amostrais da bacia hidrográfica do rio Itabirito no período chuvoso e seco.



Fonte: Autor (2020).

Miranda (2017) detectou valores de $6,7$ a $9,1 \text{ mg/L}$ de nitrogênio total na sazonalidade seca, durante campanhas de avaliação da qualidade da água, na bacia hidrográfica do rio Distrito Jordão-SC de acordo com o autor as principais causas dos valores de nitrogênio, estão ligadas aos despejos de esgotos sanitários sem tratamento no rio.

A sub-bacia do córrego Criminoso recebe carga poluidora de efluente de atividade têxtil, além, de diversos despejos oriundos de lava jatos, funilarias, postos de combustíveis, oficinas mecânicas, laticínios e efluentes domésticos *in natura*. Estima-se que diariamente o córrego recebe carga de $20 \text{ kg/dia DBO } \text{mgO}^2/\text{L}^{-1}$ (SAAE, 2020) oriundo de despejos sanitários de domicílios não coletados pelo Serviço Autônomo de Saneamento Básico do município.

Abaixo podem ser analisados os parâmetros mais influenciadores nos resultados de IQA no período chuvoso conforme Figura 19 e os mais influenciadores no período seco conforme Figura 20.

Figura 19 - Parâmetros mais influenciadores nos resultados do IQA no período chuvoso em 2019

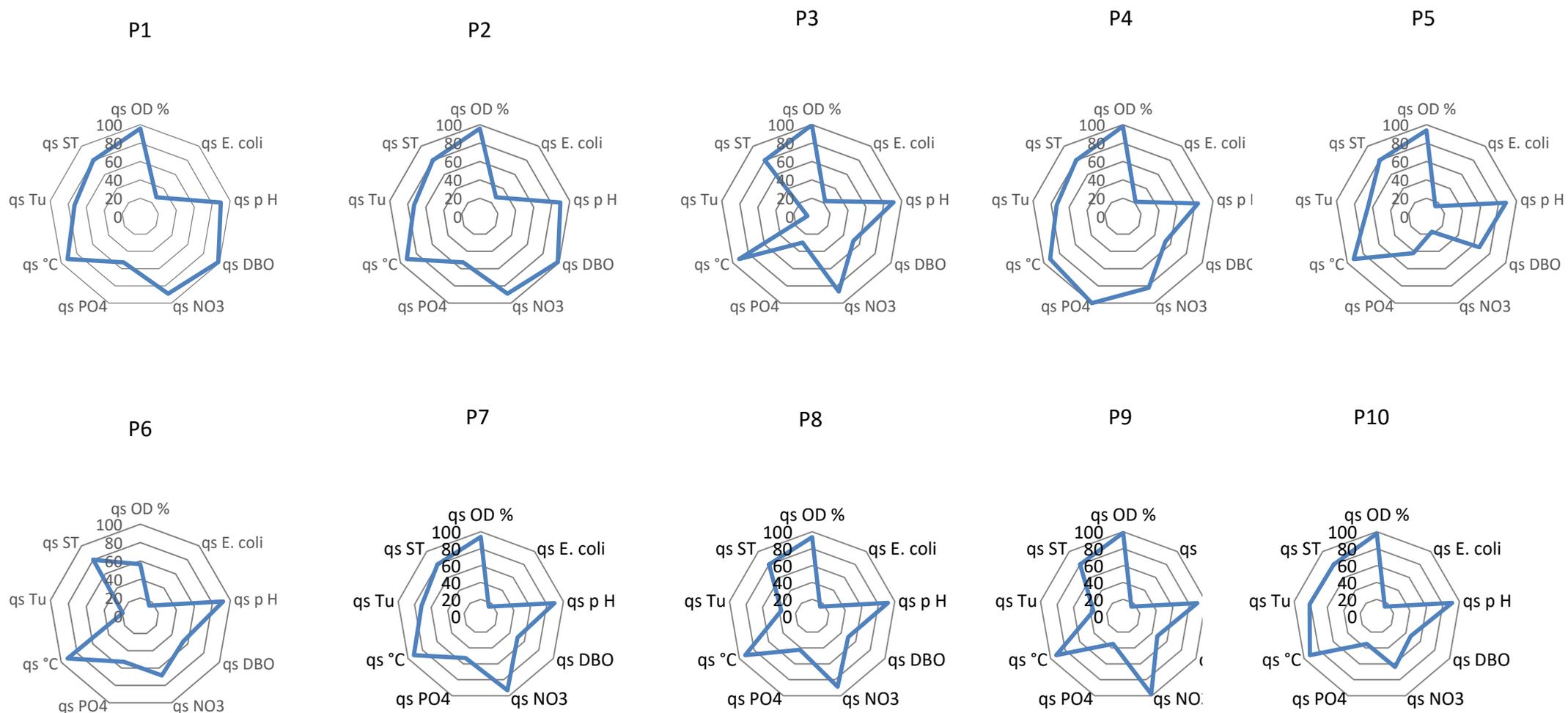
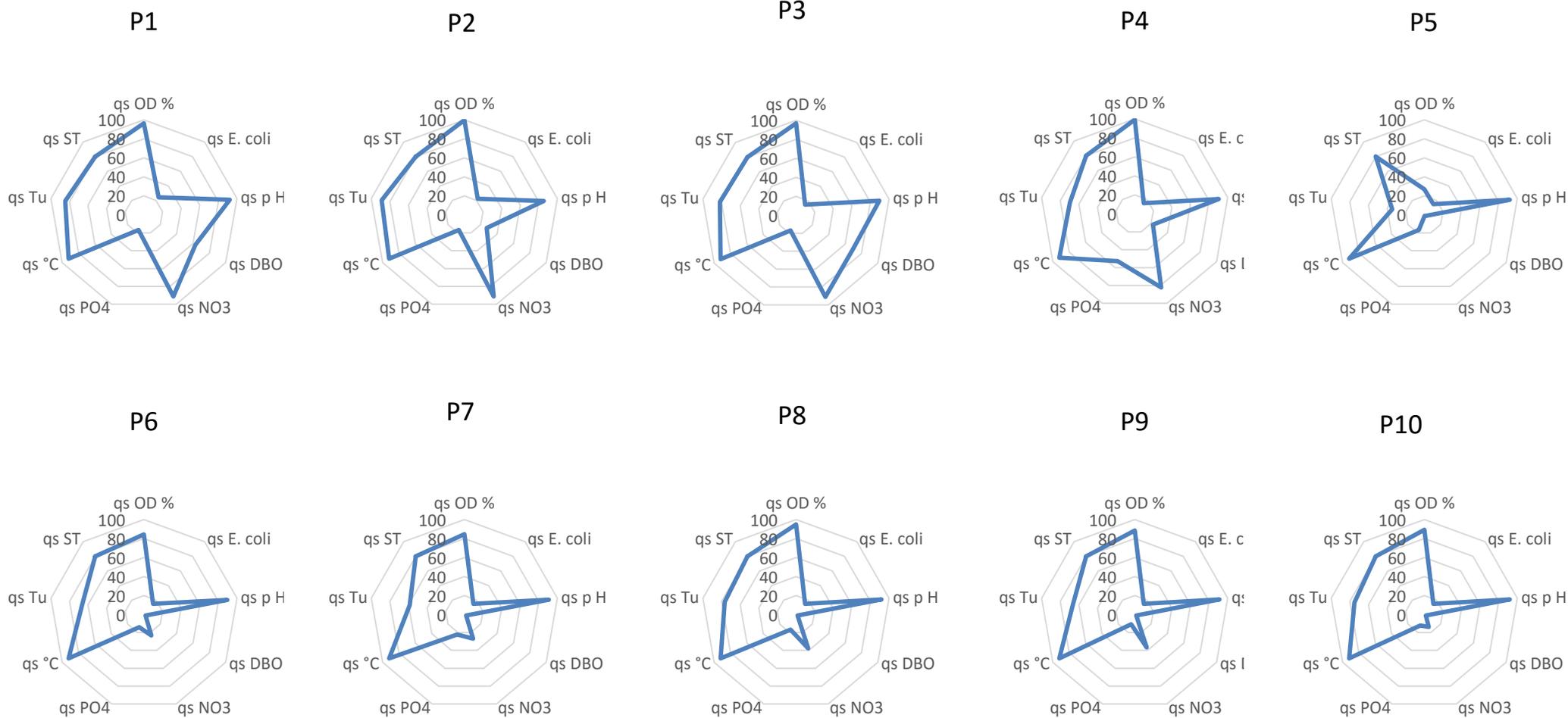


Figura 20 - Parâmetros mais influenciadores nos resultados do IQA no período seco em 2019



Fonte: Autor (2019).

Os parâmetros que mais contribuíram para a degradação da qualidade da água durante as campanhas realizadas em 2019 foram turbidez, *E. coli*, e demanda bioquímica de oxigênio. Todos os pontos amostrais da pesquisa apresentaram IQA ruim para a variável de *E. coli*, tanto na estação chuvosa quanto na seca.

Drumont (2016) ao determinar a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Xopotó também observou relevantes concentrações de *E. coli* o que segundo a autora confirma a contribuição de poluição fecal ao longo de toda bacia hidrográfica, indiferente dos índices pluviométricos e atividades antrópicas desenvolvidas nas áreas de influência.

A DBO teve IQA excelente nos pontos um (P1) e dois (P2), rio Itabirito e ribeirão Carioca, 98,52, para ambos os pontos no período chuvoso, entretanto, no período seco a qualidade deteriora e o IQA fica razoável e ruim, 62,99 e 27,25 respectivamente. O IQA da DBO no período seco começa a ser observado como razoável no ponto três (P3), rio Itabirito depois da confluência com o ribeirão Carioca e no ponto amostral quatro (P4), no córrego do Bação o IQA fica ruim. No período chuvoso, mantêm-se com IQA razoável do ponto amostral três (P3) até o ponto sete (P7) no córrego da Carioca, e nos pontos oito (P8) a dez (P10), rio Itabirito contemplando a montante e jusante da estação de tratamento de esgoto do Serviço Autônomo de Saneamento Básico de Itabirito, IQA ruim.

Fia *et al.* (2015), ao analisar a variação espaço-temporal da qualidade da água e das características tróficas dos principais cursos de água na micro bacia do ribeirão Vermelho em Lavras-MG, detectaram concentrações de DBO na estação seca que variou de 36,8 a 69,5 mgO₂/L em área urbana semelhante a bacia do rio Itabirito que variou no período seco entre 62,9 a 27,25 dentro da mancha urbana.

O parâmetro de turbidez no rio Itabirito em seus pontos amostrais três (P3), seis (P6) e oito (P8) se mostrou com IQA ruim no período chuvoso. O aumento da turbidez pode ser atribuído pela presença de extensa área com cobertura de campo e pastagem o que caracteriza a ação exercida pelo arraste superficial. Almeida (2003) evidenciou valores elevados para turbidez na bacia hidrográfica do rio Caí do município de Montenegro-RS no período chuvoso, que variaram entre 22,28 a 41,03 UNT. Oliveira e Schwarzbald (1998) obtiveram variação de 2 UNT até 661 UNT no rio Arroio Sampaio, valor esse muito alto, se comparado com os obtidos no Arroio da Cria. Fia *et. al* (2015) observou valores de turbidez na ordem de 18,1 a 482,8 para a estação chuvosa 26,1 a 47,4 UNT no período de estiagem.

Além da precipitação, altas temperaturas, de acordo com Hill *et al.* (1992) pode provocar aceleração dos processos biológicos e da entrada de material alóctone resultando em

grande produção de material orgânico particulado e por consequência, valores mais altos de turbidez. De acordo com o autor o material orgânico particulado existe em maior quantidade no verão, devido às altas temperaturas.

O rio Itabirito tem a qualidade de suas águas deterioradas quando atravessa a mancha urbana do município. Isso pode estar ligado ao fato de que mesmo, ocorrendo interceptação do esgoto sanitário na sede urbana do município, ainda há perdas no sistema de esgotamento sanitário, além de que, somente 70% do esgoto são coletados e os outros 30% lançados de forma *in natura* nos tributários e no rio Itabirito (SAAE 2020).

A bacia hidrográfica do rio Itabirito está inserida tanto no contexto rural quanto urbana e, por sua vez, sofre interferências antrópicas na qual são características comuns em ambos os locais. Na zona urbana a contaminação se dá de forma pontual e difusa no meio rural. Desta maneira, a degradação da qualidade da água atribuída às elevadas concentrações de *E. coli* podem estar associadas ao escoamento superficial e carreamento de partículas contaminadas por fezes bovinas e equinas para os corpos d'água, assim como, por lançamento de esgoto doméstico *in natura*.

Até o ponto amostral três (P3), a bacia hidrográfica sofre interferência de atividades agropecuárias, por estar inserida na zona rural do município. O adequado uso do solo e em especial a predominância de culturas permanentes podem contribuir para os bons valores de IQA nos pontos um (P1) e dois (P2).

Do ponto quatro (P4) ao ponto dez (P10), a bacia está totalmente inserida na zona urbana. Os pontos cinco (P5) a oito (P8), córrego Criminoso e rio Itabirito respectivamente, são os que mais sofrem com interferência das atividades antrópicas. Nesses pontos, os recursos hídricos recebem esgoto doméstico *in natura* e efluente industrial oriundo de atividade têxtil, abatedouro de suínos e bovinos e de laticínios.

O ponto dez (P10), a jusante da estação de tratamento de esgoto do município, no período chuvoso apresentou melhor qualidade em relação ao ponto seis (P6), rio Itabirito após confluência com o córrego Criminoso, com IQA de 56,6 e 49,0 respectivamente o que pode mostrar que nesse trecho pode ter ocorrido autodepuração devido à declividade da bacia nesse trecho.

8.4. Carga poluidora dos empreendimentos

No ano de 2019 a carga poluidora estimada lançada pelos empreendimentos foi determinada conforme a composição geoeconômica da bacia hidrográfica do rio Itabirito. As atividades têxteis contribuíram com lançamento de carga estimada em 4,2 kg de DBO por dia e vazão de 3.219,75 m³/d (SAAE, 2020) no córrego Criminoso. Nesse mesmo córrego há contribuições de efluente oriundo de atividades de laticínios que infelizmente não foi possível determinar a carga e despejos de esgotos sanitários proveniente dos domicílios, que não são interceptados pelo Serviço Autônomo de Saneamento Básico municipal. A carga estimada dos despejos dessas residências é de 20 kg de DBO/dia e vazão de 11,1 m³/d (SAAE 2020).

O rio Itabirito no ponto amostral um (P1), recebe contribuição de atividade de produção de bebidas. Em 2019 a carga média contribuinte foi de 40 mg/L⁻¹ de DBO por dia. Entre os pontos amostrais três (P3) e seis (P6), o referido rio recebe interferência por lançamento de efluente da atividade de abatedouro de suínos e bovinos. A carga de lançamento estimada em 2019 foi de 459 mg/L⁻¹. Não há dados da vazão de lançamento do esgoto dessa atividade nesse período.

No ponto dez (P10), o rio Itabirito recebe contribuição da carga de lançamento dos esgotos tratados pela estação do Serviço Autônomo de Saneamento Básico. A estimativa da carga de lançamento para o período das campanhas de qualidade da água foi 30 mg/L⁻¹ de DBO por dia e vazão média estimada de 80 l/s.

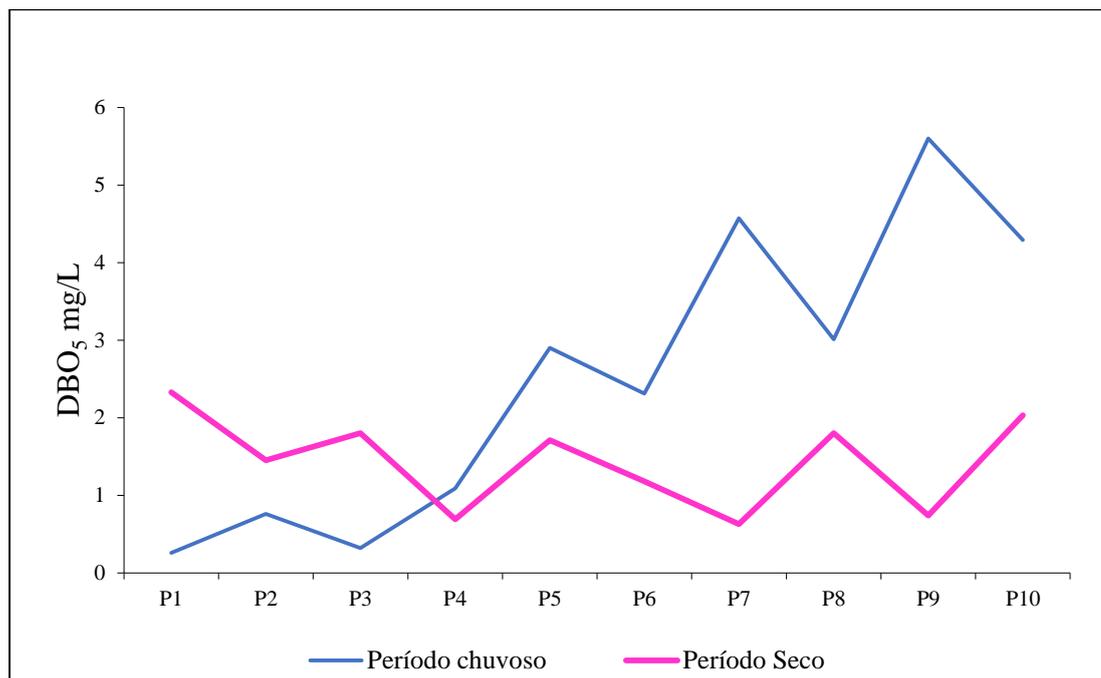
8.5. Curva de Demanda Bioquímica de Oxigênio

Durante as campanhas de monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Itabirito, foi determinado DBO para as duas sazonalidades, chuvosa e seca de 2019.

A partir dos pontos amostrais foi analisada a concentração de oxigênio dissolvido das amostras a fim de determinar a DBO. Os resultados de OD podem ser observados no Apêndice E.

A partir dos dados de oxigênio dissolvido das amostras incubadas por cinco dias a 20°C, foi elaborada a Figura 21 conforme Equação 8, a fim de determinar a demanda bioquímica de oxigênio dos pontos amostrados.

Figura 21 - Resultados de DBO₅ 20° do período seco e chuvoso da campanha de 2019.



Fonte: Autor (2020).

No período chuvoso os pontos seis (P6), sete (P7), oito (P8), nove (P9) e dez (P10) não atenderam a Resolução do CONAMA 357/2005 e a DN COPAM/CERH-MG 01/2008 para rios de classe II, que estabelece 5 mg/L^{-1} de DBO e na estação seca da campanha nenhum dos pontos amostrais ultrapassaram os limites da legislação.

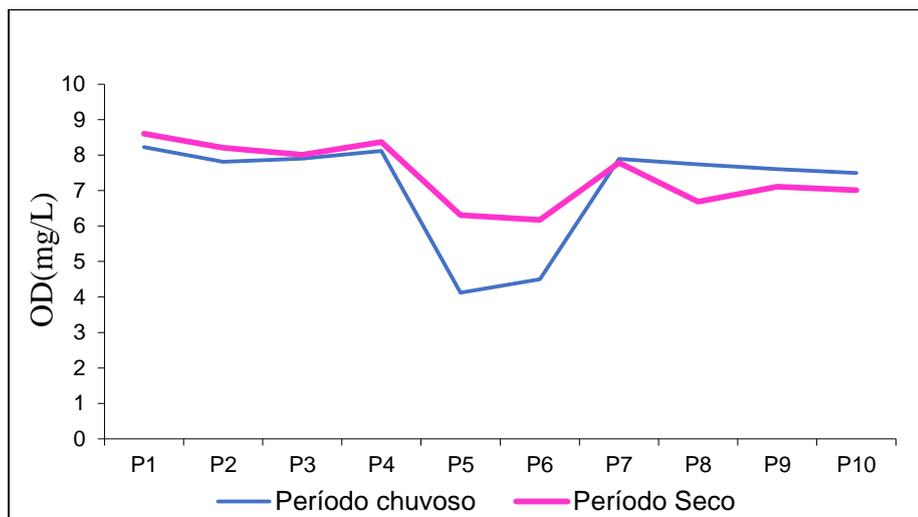
8.6. Curva do OD ao longo do trecho estudado

O OD monitorado ao longo dos pontos amostrais por período de cinco dias foi aplicado na estação seca e chuvosa. Para o período chuvoso a campanha foi do dia 12/01/2019 até o dia 17/01/2019. Nesse período o ponto cinco, apresentou a menor média de oxigênio dissolvido com $4,12 \text{ mg/L}^{-1}$.

Nota-se na Figura 22 que o rio Itabirito, ponto amostral seis (P6), tem sua classe alterada para o parâmetro de OD, após receber contribuição do córrego Criminoso, ponto cinco (P5). De acordo com a Resolução do Conama 357/2005 e a DN CERH 01/2008, rios de classe II, devem manter níveis de oxigênio dissolvido em 5 mg/L .

Na estação seca todas as aferições de OD atenderam os limites exigidos pela legislação. O ponto amostral com menor concentração de OD nesse período foi o ponto seis (P6), com média de $6,17 \text{ mg/L}$ e o maior foi identificado no ponto um (P1) com $8,60 \text{ mg/L}$.

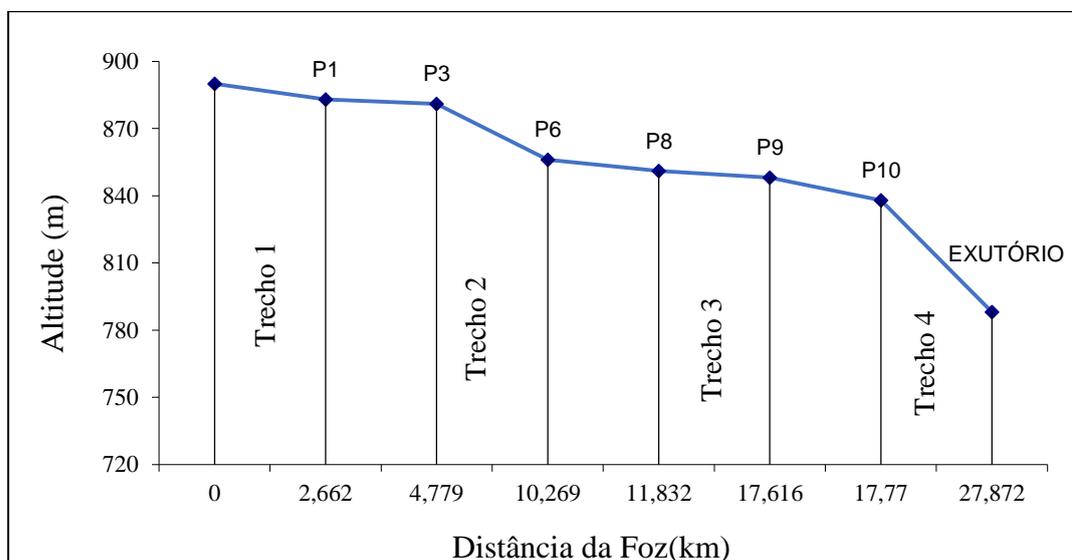
Figura 22 - Resultado do perfil de OD da campanha do período chuvoso e seco em 2019.



Fonte: Autor (2020).

Mesmo com a curva de depleção nos pontos cinco (P5) e seis (P6), o monitoramento evidenciou que a bacia apresenta capacidade de reabilitação dos níveis de oxigênio dissolvido. Para visualizar a declividade do trecho estudado, elaborou-se o perfil topográfico do rio Itabirito, onde evidencia-se a declividade acentuada em alguns pontos, como mostra na Figura 23. De acordo com o perfil topográfico apresentado é possível observar que a parte estudada do rio se apresenta bastante encachoeirado em alguns segmentos. Destaca-se o trecho, compreendido entre os pontos três (P3) e nove (P9) com desnível de 40 m aproximadamente.

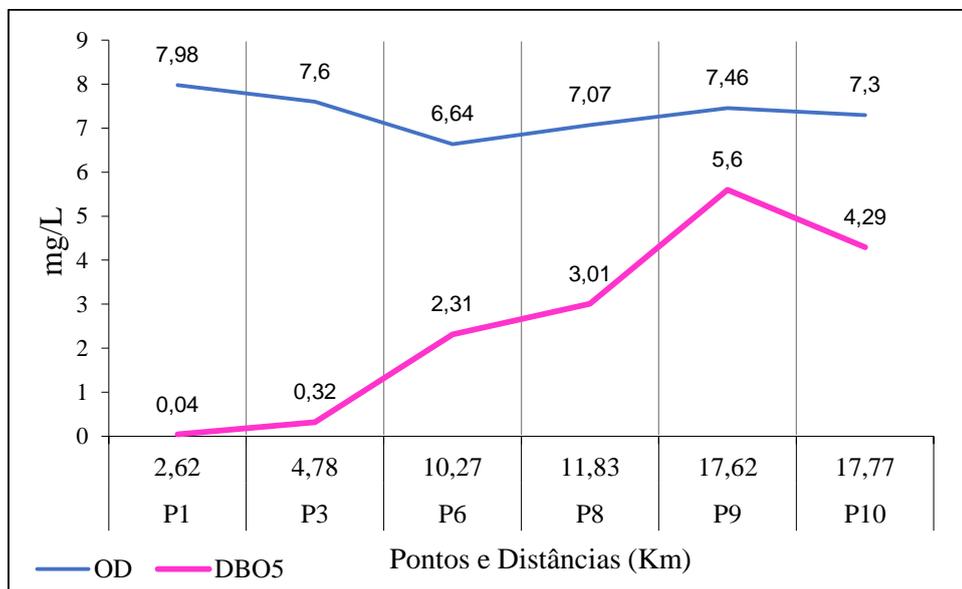
Figura 23 - Perfil topográfico do rio Itabirito dividido em 4 trechos de declividade homogênea.



Fonte: Autor (2020).

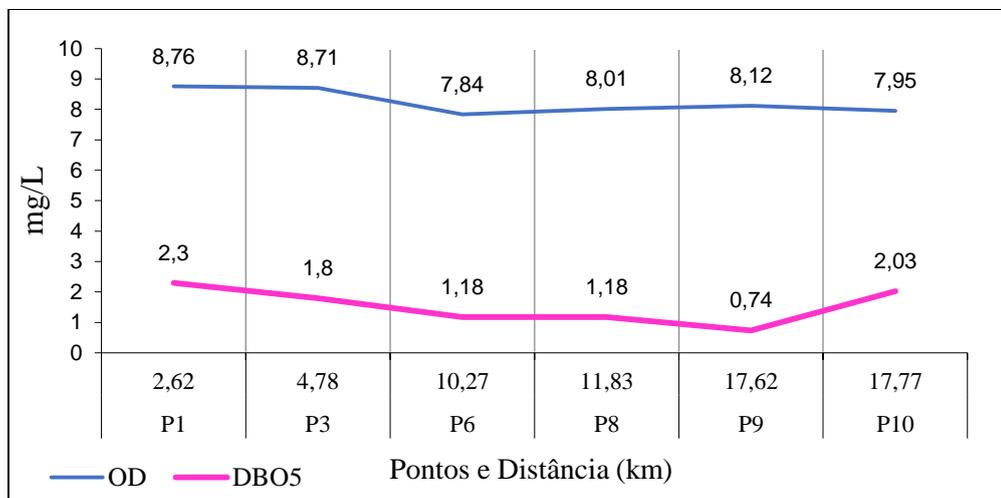
No período chuvoso ocorre depleção do OD dentro da área urbana, no ponto seis (P6), e que do mesmo modo a DBO₅ cresce, isso demonstra que está ocorrendo consumo, provavelmente devido à oxidação da matéria orgânica oriunda do lançamento de esgotos. Explica-se esse fato devido ao trecho, correspondente a área urbana, apresentar declividade acentuada. Acarretando maior turbulência das massas de água, o que resulta em mais aeração. Este último faz com que a demanda por oxigênio seja reduzida. As Figuras 24 e 25 evidenciam os resultados de OD e DBO tanto no período chuvoso quanto no seco.

Figura 24 - Curvas de OD e DBO₅ 20°C ao longo da seção estudada do rio Itabirito no período chuvoso.



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Curvas de OD e DBO₅ 20°C ao longo da seção estudada do rio Itabirito no período seco.



Fonte: Autor (2020).

8.7. Vazão nos cursos d'água

A vazão na estação chuvosa e seca do rio Itabirito e dos principais tributários foi obtida através do produto da velocidade média pela área da seção transversal. Os resultados encontrados estão na Tabela 5 e 6.

Tabela 5 - Vazão dos cursos d'água na estação chuvosa.

CURSO D'ÁGUA	LARGURA (m)	ALTURA média (m)	ÁREA (m²)	VELOCIDADE (m/s)	Q/m³/s
Ribeirão Carioca	2,50	1,00	2,50	0,2	0,50
Córrego Bação	4,60	0,80	3,70	0,6	2,22
Córrego Criminoso	4,80	0,30	1,45	0,3	0,44
Córrego Carioca	5,10	0,15	0,76	0,4	0,30
Rio Itabirito Montante ETE	15,00	2,50	37,5	0,41	15,38

Fonte: Autor (2020).

Tabela 6 - Vazão dos cursos d'água na estação seca.

CURSO D'ÁGUA	Largura (m)	Altura média (m)	Área (m²)	Velocidade (m/s)	Q/m³/s
Ribeirão Carioca	2,50	0,28	0,70	0,12	0,08
Córrego Bação	4,60	0,28	1,29	0,12	0,15
Córrego Criminoso	4,80	0,05	0,24	0,16	0,04
Córrego Carioca	5,10	0,09	0,46	0,2	0,09
Rio Itabirito Montante ETE	15,00	2,00	30,00	0,09	2,70

Fonte: Autor (2020).

O rio Itabirito apresentou maior vazão na estação chuvosa. As análises de campo foram realizadas no mês de janeiro de 2019. Ressalta-se que o mesmo recebe contribuições dos tributários ao longo da bacia, das águas subterrâneas e de efluentes domésticos que são

despejados de forma *in natura* em alguns trechos da bacia.

O córrego do Bação foi o tributário que mais contribuiu com a vazão do rio Itabirito ($2,2 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$) o que corresponde a 13% da vazão do mesmo a montante da estação de tratamento de esgoto.

Nota-se que a profundidade média da seção estudada no rio Itabirito, variou entre 2,0 a 2,5 m entre as sazonalidades seca e chuvosa respectivamente. A velocidade da água foi maior na coleta realizada em janeiro de 2019 ($0,41 \text{ m/s}^{-1}$), data também em que a vazão foi maior ($15,38 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$), enquanto a menor velocidade foi verificada na coleta realizada no mês de agosto ($0,09 \text{ m/s}^{-1}$) cuja vazão foi de $2,70 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$.

Na estação seca, o rio apresentou queda na vazão em aproximadamente 80% em relação ao período chuvoso. Além das baixas precipitações nesse período, o rio recebe menor carga hidráulica dos seus tributários.

O período de maior vazão no rio Itabirito apresentou melhor IQA em relação ao período de menor vazão, sendo razoável de 56,6 e no período chuvoso e IQA ruim de 35,7 no período seco.

8.8. Coeficiente de desoxigenação (K_1)

Todos os valores de k_1 foram calculados e apresentados na Tabela 7 e 8, período chuvoso e seco respectivamente. Não houve necessidade de realizar correção da temperatura em nenhuma das amostras incubadas, já que durante a realização dos experimentos, conservou-se em 20°C , que é a temperatura de referência do coeficiente. Os resultados com as curvas do oxigênio dissolvido das amostras, ao longo tempo incubado, bem como as planilhas dos eventos, encontram-se no Apêndice B.

Os coeficientes de desoxigenação variaram entre 0,003 a $0,743 \text{ d}^{-1}$ no período chuvoso e 0,003 a $0,234 \text{ d}^{-1}$ no período seco não caracterizando com os valores típicos mencionado na bibliografia clássica que são de 0,08 a $0,20 \text{ d}^{-1}$. Os pontos cinco (P5), sete (P7) e nove (P9), apresentaram os maiores valores de k_1 , estes implicam maiores taxas de estabilização da matéria orgânica. Neste contexto observou-se maiores concentrações de DBO para esses pontos.

Os pontos um (P1), dois (P2), três (P3) e quatro (P4) apresentaram taxa de estabilização mais lenta na sazonalidade chuvosa, em relação aos demais pontos amostrais. Isso se deve ao fato de sua localização estar a montante da zona urbana do município de

Itabirito, onde há menores ocorrências de lançamentos de efluentes, evidenciados pelas baixas concentrações de carga orgânica.

Tabela 7 - Resultados de K_1 na estação chuvosa.

Ponto	K_1 (d^{-1})	L_0 (mg/L)	DBO_5 (mg/L)	DBO_U (mg/L)
P1	0,014	46,75	0,04	0,26
P2	0,003	49,31	0,76	3,12
P3	0,006	29,29	0,32	2,72
P4	0,017	11,29	1,09	3,73
P5	0,743	5,21	2,90	3,83
P6	0,097	3,23	2,31	6,14
P7	0,251	6,00	4,57	6,03
P8	0,136	6,74	3,01	5,84
P9	0,371	6,06	5,60	6,46
P10	0,181	7,02	4,29	6,54

Fonte: Autor (2020).

Tabela 8 - Resultados de K_1 na estação seca.

Ponto	K_1 (d^{-1})	L_0 (mg/L)	DBO_5 (mg/L)	DBO_U (mg/L)
P1	0,003	588,58	1,56	1,43
P2	0,255	10,24	5,63	1,15
P3	0,234	3,18	1,52	1,11
P4	0,086	16,67	4,15	1,32
P5	0,076	161,89	30,00	12,28
P6	0,049	56,28	8,27	3,27
P7	0,068	95,85	16,45	6,87
P8	0,138	39,81	8,24	3,70
P9	0,023	120,93	5,65	4,16
P10	0,156	25,50	7,60	2,45

Fonte: Autor (2020).

Observa-se que o ponto dois (P2) na estação seca obteve taxa de estabilização mais elevada em relação à sazonalidade chuvosa. Isso pode estar associado às atividades de criação de bovinos e equinos na microbacia do ribeirão Carioca, que é evidenciado com o aumento da DBO_5 para esse período. Nota-se que na estação chuvosa a DBO_5 foi de <2 mgO_2/L e na

estação seca 5,63 mgO₂/L evidenciando relevante aumento.

8.9. Coeficiente de reaeração superficial (K₂)

Os resultados de k₂ variaram de acordo com os parâmetros de entrada na planilha e com as estações da campanha, visto que no período chuvoso os corpos hídricos apresentaram maior velocidade e maior volume se comparado com a estação seca.

Os coeficientes de reaeração obtidos por meio das equações de O'CONNOR & DOBBINS (1958) e OWENS *et al.* (1964), apresentam-se muito menores quando comparados às equações de TSIVOGLOU WALLACE (1972) e MELCHING-FLORES (1999) para as duas sazonalidades da pesquisa. Isto se deve à diferença de parâmetros considerados em cada equação para cálculo. As equações de previsão de O'CONNOR & DOBBINS (1958) e OWENS *et al.* (1964) consideram apenas a profundidade média e velocidade do rio, este primeiro parâmetro pode apresentar-se muito variável dependendo das características do trecho.

Por meio dos resultados obtidos, observa-se que o córrego Criminoso e o córrego Carioca apresentaram os maiores coeficientes de reaeração se comparado todos os pontos monitorados. Entretanto, no córrego Carioca observou-se K₂ maior que no córrego Criminoso para as ambas as estações. O fato de os córregos possuírem baixa profundidade e velocidade relativamente alta pode ter contribuído para elevados valores do coeficiente. De acordo com Sperling (2007), corpos d'água com tais características possuem maior facilidade de mistura completa, criando maiores turbulências na superfície, ou seja, qualificam maior reaeração na zona liminética d'água, e conseqüentemente, apresentam elevados valores para K₂.

Em contrapartida, as equações de TSIVOGLOU-WALLACE(1972) e MELCHING-FLORES (1999) levam em consideração a declividade e a vazão dos cursos d'água. Observou-se que os menores valores de k₂ foram identificados nos escoamentos com menores declividades, a saber, rio Itabirito e ribeirão Carioca, e os maiores valores foram encontrados no escoamento que apresenta maior declividade, a dizer, o córrego Carioca. Quando se compara os resultados obtidos de k₂, nesta pesquisa, com aqueles previstos na literatura. Com exceção do resultado encontrado a partir da equação de O'CONNOR & DOBBINS (1958) para o rio Itabirito, este, de acordo com o Quadro 5, apresenta-se como rios rápidos. O Quadro 6 apresenta os valores do coeficiente k₂ na estação chuvosa, segundo as equações de TSIVOGLOU-WALLACE (1972) e MELCHING-FLORES (1999). Estão no Quadro 7

valores do coeficiente K_2 na estação seca, segundo as equações de O'CONNOR & DOBBINS (1958) e OWENS ET AL. (1964) e no Quadro 8 segundo as equações de TSIVOGLOU-WALLACE (1972) e MELCHING-FLORES (1999).

Quadro 5 - Valores do coeficiente K_2 no período chuvoso, segundo as equações de O'Connor & Dobbins (1958) e Owens et al. (1964).

Curso d'água	Altura (m)	Velocidade (m/s)	O'Connor & Dobbins (1958)	Owens et al. (1964)
			$K_2(d^{-1})$	
Ribeirão Carioca	1	0,2	1,758	-
Córrego Bação	0,8	0,6	4,254	
Córrego Criminoso	0,3	0,3	-	21,942
Córrego Carioca	0,15	0,4	-	95,915
Rio Itabirito Jusante ETE	2,5	0,41	0,637	-

Fonte: Autor (2020).

Quadro 6 - Valores do coeficiente K_2 no período chuvoso, segundo as equações de Tsivoglou-Wallace (1972) e Melching-Flores (1999).

Curso d'água	Declividade (m/km)	Declividade (m/m)	Vazão (m ³ /s)	Tsivoglou-Wallace (1972)	Melching-Flores (1999)
			$K_2(d^{-1})$		
Ribeirão Carioca	28,32	0,0283	0,5	87,21	40,639
Córrego Bação	39,54	0,0395	2,22	365,35	60,017
Córrego Criminoso	38,8	0,0388	0,44	179,25	61,309
Córrego Carioca	77,49	0,0775	0,3	477,36	111,709
Rio Itabirito Jusante ETE	28,06	0,0281	15,38	87,21	25,713

Fonte: Autor (2020).

Quadro 7 - Valores do coeficiente K_2 no período seco, segundo as equações de O'Connor & Dobbins (1958) e Owens et al. (1964).

Curso d'água	Altura (m)	Velocidade (m/s)	O'Connor & Dobbins (1958)	Owens et al. (1964)
			$K_2(d^{-1})$	
Ribeirão Carioca	0,28	0,12	-	13,49
Córrego Bação	0,28	0,12	-	13,49
Córrego Criminoso	0,05	0,16	-	-
Córrego Carioca	0,09	0,2	-	-
Rio Itabirito Jusante ETE	2	0,09	0,417	-

Fonte: Autor (2020).

Quadro 8 - Valores do coeficiente K_2 período seco, segundo as equações de Tsvoglou-Wallace (1972) e Melching-Flores (1999).

Curso d'água	Declividade (m/km)	Declividade (m/m)	Vazão (m ³ /s)	Tsvoglou-Wallace (1972)	Melching-Flores (1999)
			$K_2(d^{-1})$		
Ribeirão Carioca	28,32	0,03	0,08	110,77	47,882
Córrego Bação	39,54	0,04	0,15	73,07	49,212
Córrego Criminoso	38,8	0,04	0,04	202,37	79,356
Córrego Carioca	77,49	0,08	0,09	505,26	103,8
Rio Itabirito Jusante ETE	28,06	0,03	2,7	38,89	22,13

Fonte: Autor (2020).

Nos estudos realizados por BARROS et al. (2011) e SILVA (2017), através da aplicação das equações de O'CONNOR & DOBBINS (1958) e OWENS *et al.* (1964), os autores encontraram valores elevados para k_2 , assim como neste trabalho. Os estudos mostram

que a utilização das equações baseadas em características hidráulicas, propostas por diferentes autores, levam a valores muito maiores do que aqueles apresentados por VON SPERLING (2007).

Nunes *et. al* (2008) ao estimar o coeficiente de reaeração das águas no rio Turvo Sujo, na bacia hidrográfica do rio Doce, obteve resultados que indicaram menores valores de K_2 no período seco e maiores valores no período chuvoso. Os autores atribuem os resultados pelo fato do período chuvoso as vazões serem maiores, alterando a velocidade e a profundidade da lâmina de água, provocando um aumento nos valores do coeficiente. Diferente do estudo do rio Itabirito, que apresentou resultados de k_2 maiores no período seco e menores no período chuvoso.

Freitas (2016) ao determinar os coeficientes de reaeração de um trecho do rio Piancó-Piranhas-Açu em Pombal Pernambuco encontrou valores de k_2 que se mostraram decrescentes ao longo dos meses (janeiro, fevereiro, março e abril) para os dois pontos analisados. A autora atribuiu o decaimento ao aumento do nível da água, pois o processo de reaeração superficial se torna mais lento em ambientes aquáticos cuja profundidade é mais elevada.

Almeida (2013), em estudo sobre condições de oxigenação de um trecho do rio Uberabinha em Minas Gerais estimou valores de k_2 em diferentes pontos e em vários meses do ano através da aplicação de das mesmas equações empíricas aplicadas para a bacia hidrográfica do rio Itabirito. Para a equação de O'CONNOR e DOBBINS (1958) o autor encontrou valores entre 0,99 a 1,07 d^{-1} . Para a equação de MELCHING e FLORES (1999) os valores encontrados variaram de 1,76 a 2,27 d^{-1} . Para a equação de OWENS *et al.* (1964) os valores variaram de 20,17 a 42,19 d^{-1} . O autor atribui a diferença entre os valores à diferença as condições hidráulicas dos diferentes pontos amostrados e a diferença nos parâmetros adotados pelas equações.

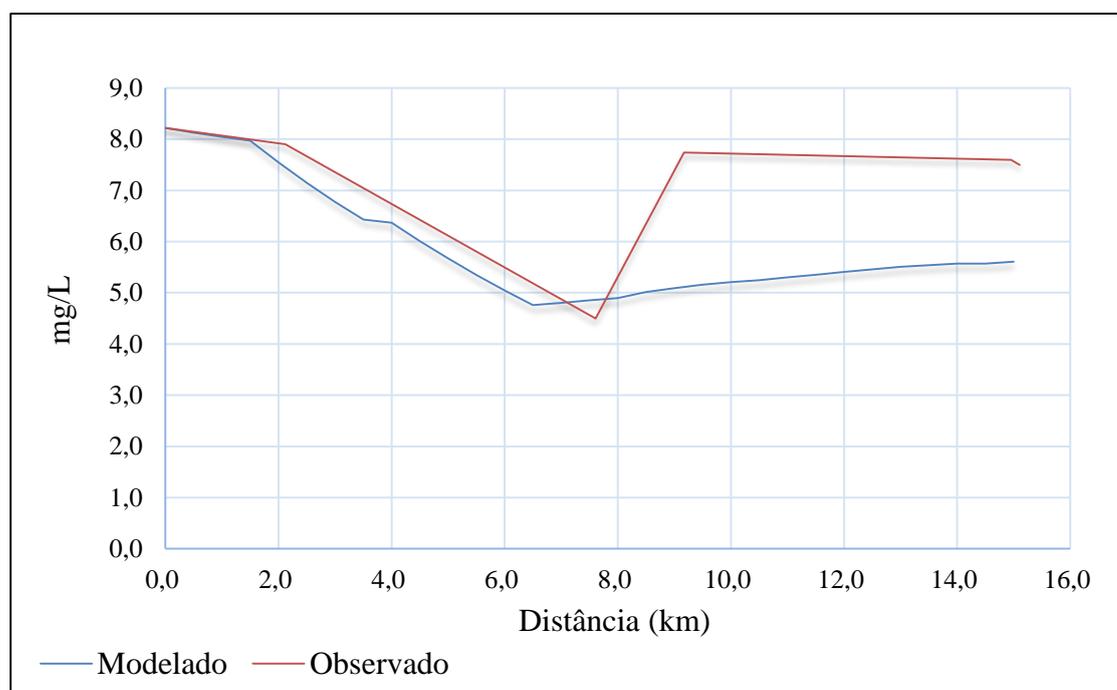
Os menores valores de k_2 para o rio Itabirito no período chuvoso pode estar atrelado ao ponto de amostragem escolhido para a pesquisa, já que nesse ponto o rio possui menor declividade e qualidade ruim para turbidez nesse período o que além de comprometer a turbulência do mesmo, os sólidos em suspensão podem interferir no grau de atenuação dos feixes de luz na massa líquida, inibindo a produção de oxigênio por meio de organismos fotossintético.

9. RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DO MODELO QUAL-UFMG.

Os dados de entrada na planilha possibilitaram calibrar o modelo para analisar o comportamento da DBO e do OD ao longo do trecho estudado na bacia. O modelo foi calibrado para as duas estações. Abaixo nas Figuras 26 e 27 respectivamente é possível avaliar o comparativo dos dois parâmetros, tanto no perfil do observado quanto no modelado na estação chuvosa de 2019.

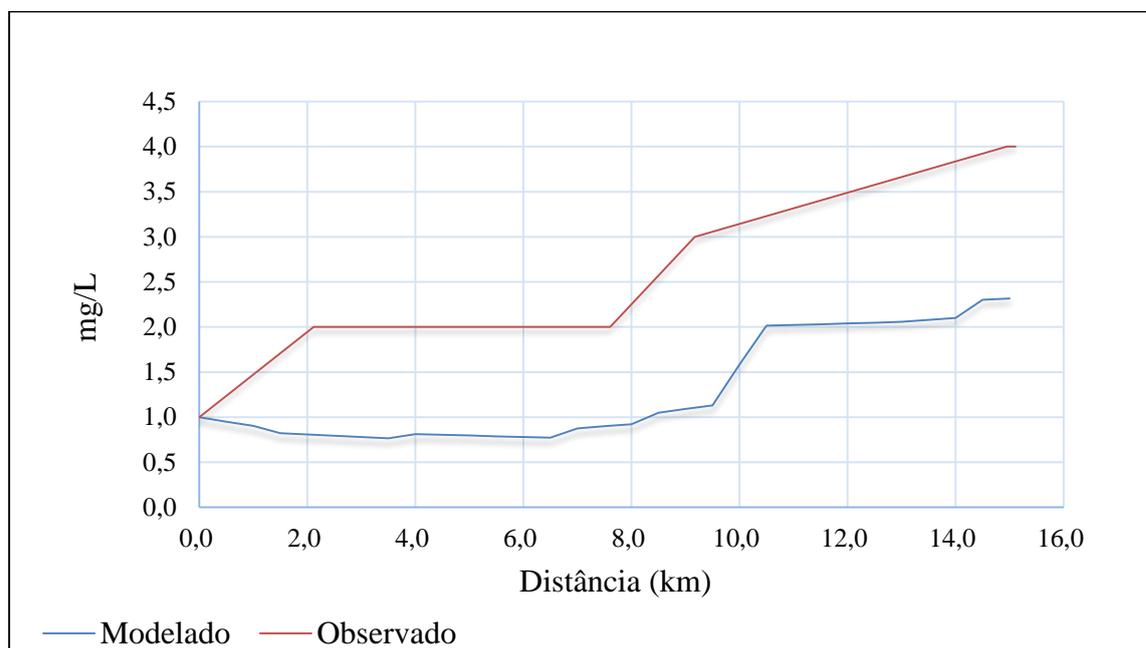
Mourão (2010) ao analisar os dados calibrados pelo modelo do rio Santa Bárbara mostra um baixo grau de ajuste da curva aos dados de campo em relação ao parâmetro de DBO.

Figura 26 - Comportamento do OD ao longo do rio Itabirito na estação chuvosa.



Fonte: Autor (2020).

Figura 27 - Comportamento da DBO₅ ao longo do rio Itabirito na estação chuvosa



Fonte: Autor (2020).

Na estação chuvosa os valores de OD observados e modelados, conforme Figura 26, se mantiveram próximos até o ponto seis (P6) localizado no km 8 aproximadamente. A partir do referido ponto, a linha observada afasta da linha modelada. Nesse trecho, conforme já mencionado nesse estudo, recebe a contribuição do tributário córrego Criminoso.

As linhas de OD modelado e observado se afastam a partir do ponto oito (P6) no quilômetro oito. Isso pode estar atrelado aos lançamentos de esgoto *in natura* que são lançados no leito do rio. Entretanto, vale ressaltar que no período chuvoso, ambos os parâmetros atenderam a Resolução do CONAMA 357/2005 para classe II, isto é, 5 mg/L⁻¹ exceto no ponto seis (P6) que apresentou oxigênio abaixo do estabelecido no requisito jurídico.

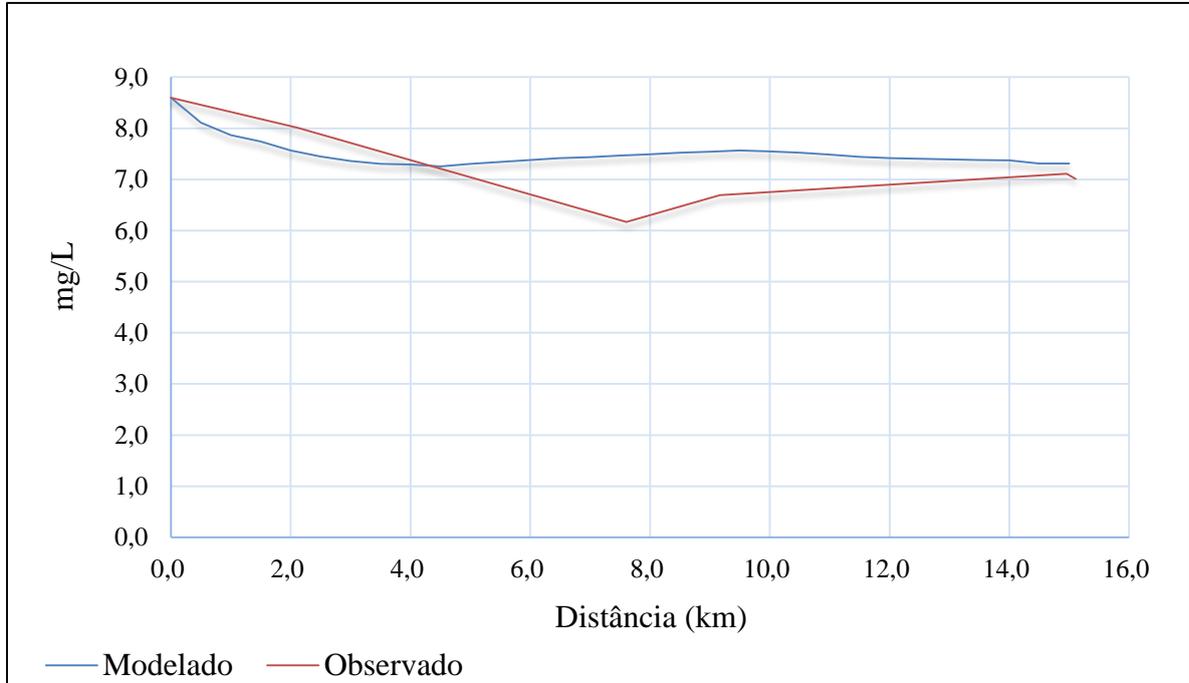
A linha observada de DBO não fica próxima da linha modelada conforme pode ser visto na Figura 27. No entanto, apresenta tendencia de estabilidade para ambas, evidenciando capacidade de autodepuração do rio Itabirito após atravessar a mancha urbana do município.

No período seco o modelo não se ajustou bem para o parâmetro de DBO conforme mostra a Figura 28, no entanto, para o parâmetro de OD, conforme Figura 29, as linhas se mantiveram próximas apresentando leve declínio no ponto seis (P6), porém, declínio menor em relação ao período chuvoso.

O fato de o rio Itabirito apresentar diversas quedas d'água, a quantidade de oxigênio

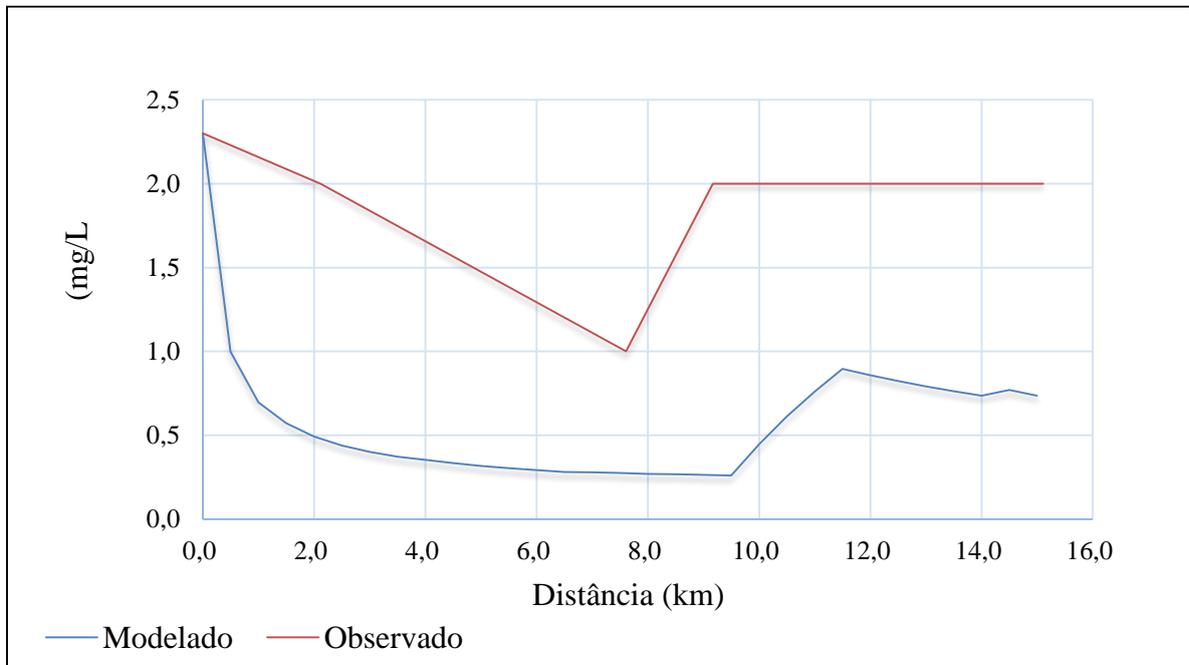
dissolvido em suas águas é bastante elevada, chegando bem próxima da saturação.

Figura 28 - Comportamento do OD ao longo do rio Itabirito na estação seca.



Fonte: Autor (2020).

Figura 29 - Comportamento da DBO₅ ao longo do rio Itabirito na estação seca.



Fonte: Autor (2020).

Os dados não se ajustaram bem ao modelo do QUAL-UFMG que infelizmente não permitiu uma modelagem adequada. Entretanto, os resultados obtidos através desse estudo podem subsidiar tomadas de decisões dos articuladores políticos da gestão dos recursos hídricos do município.

Provavelmente a falta de sucesso no ajuste dos dados pode ter ocorrido por causa da sensibilidade dos parâmetros utilizados no programa. Logo, espera-se que, quanto mais informações o pesquisador obtiver da bacia a ser modelada é certo a calibração e melhor será a relação dos valores observados e calculados.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo versa sobre a ideia geral dessa pesquisa de dissertação, identificando os principais métodos empregados e discutindo suas principais implicações e considerações para a bacia estudada. Logo a partir dos resultados obtidos, considera-se que o desenvolvimento geoeconômico na bacia do rio Itabirito contribui de maneira significativa para a degradação da qualidade das águas desta importante sub-bacia no alto curso rio das Velhas.

O emprego da ferramenta de IQA permitiu identificar que as variáveis que mais impactam na degradação da qualidade da água amostradas são *E.coli* e turbidez. Historicamente a depleção da qualidade da água por essas variáveis foram observadas desde 1998 tanto na estação seca quanto na chuvosa. Os melhores IQA's da pesquisa da série histórica foram evidenciados em trimestres do ano de 2003,2004 e 2006.

Os Índices de Qualidade das Águas mais elevados foram observados tanto em períodos secos quanto no chuvoso. Na estação seca, isto é, terceiro trimestre de 2006 e terceiro trimestre de 2004 o IQA foi de 90,7 com precipitação de 83,7 mm e IQA 87,6 com precipitação 0,0 mm respectivamente. Na sazonalidade chuvosa observada no primeiro trimestre 2006 e no quarto trimestre de 2003 o IQA foi 84,4 com precipitação de 246,4 mm e IQA 88,6 com precipitação de 317 mm respectivamente.

O estudo evidenciou a autodepuração do rio Itabirito. Isso pode ser possível em detrimento às características hidráulicas do rio, isto é, a declividade acentuada situada na área urbana, o que contribui para a introdução de oxigênio atmosférico na massa líquida superficial do rio e conseqüentemente na reaeração da zona limnética. Entretanto, uso do QUAL-UFMG 2017 não de ajustou aos dados de entrada na planilha.

A respeito dos valores dos coeficientes de desoxigenação (k_1), observa-se que o rio Itabirito apresenta elevada taxa de oxidação da matéria orgânica, a jusante do núcleo urbano,

devido aos altos valores encontrados (0,003 a 0,743 d⁻¹), estes dados estão relacionados com as características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras.

Os resultados para o coeficiente de oxigenação (k_2) foram consideravelmente mais elevados em relação aos valores usualmente encontrados por meio de métodos empíricos demonstrados na bibliografia.

Mesmo a simulação da qualidade da água não ter obtido tanto sucesso, a definição dos parâmetros de k_1 e k_2 foi de extrema relevância para os dados históricos da bacia hidrográfica do rio Itabirito.

Recomenda-se para futuras pesquisas a realização de estudo similar com o emprego do QUAL-UFMG 2017, entretanto, abordando série de vazões históricas para o trecho estudado. Outro sim, é que poderá ser adotado cenários que contemplem instalação de atividades industriais levando em consideração o potencial geoeconômico da bacia.

Com os resultados obtidos nesta dissertação é possível observar as tendências temporais e espaciais na qual podem servir de subsídio ao gerenciamento da bacia hidrográfica do rio Itabirito e aos investimentos em tecnologias ambientais.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas Edição 2012.

ABED, Maher Ahmed; Jalal N. Jeber , Ausama Abbas Faisal , Abdulkhem D. Hussien. Based on Water Quality Index, An Assessment of the Water Quality at Some Areas of Anbar City, West Iraq. International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064. 2017.

ALMEIDA. M. A. B.; Schwarzbald, A. Avaliação Sazonal da Qualidade das Águas do Arroio da Cria Montenegro, RS com Aplicação de um Índice de Qualidade de Água (IQA). RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 8 n.1 Jan/Mar 2003, 81–97.

ALMEIDA, J. S. M. Condições de oxigenação e desoxigenação de um trecho do rio Uberabinha no município de Uberlândia. Dissertação de Mestrado. Uberlandia: UFU, 2013.

ANA. (s.d.). Fonte: Estação pluviométrica Lagoa Grande: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/> ano 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9897: Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.

BARROS, F. M.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; CECON, P. R.; ASTONI, D. Balanço de oxigênio no Rio Turvo Sujo – MG em diferentes épocas do ano. Revista Engenharia na Agricultura. Viçosa – MG, v.19, n.1, p.72 – 80. 2011.

BEZERRA. Steiner de Oliveira; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça; Horst Frischkorn. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. Revista Escola de Minas 2008.

BRAGA, BENEDITO et al. (2005). Introdução à Engenharia Ambiental: o Desafio do Desenvolvimento Sustentável, 2ª edição. São Paulo. Editora Pearson Prentice Hall. 2005.

BRASIL. Lei 9433, de 08 de Janeiro de 1997. Institui a PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução CONAMA 357 DE 17 de Março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento- SNIS. <http://www.snis.gov.br/menu-coleta-dados>. Ano 2017.

CALMON, Ana Paula Santo et. al. Combined use of river water quality flow-duration curves and modeling as a tool to support class definition according to CONAMA 357/2005 regulation. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH

vol. 21 n.º1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 118 – 133. Artigo Científico/Técnico.

CARVALHO, Thiago Morato. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. RBGF – Revista Brasileira de Geografia Física. Recife-PE Vol.01 n.º01 Maio/Ago 2008, 73-85.

CARVALHO, Aurean de Paula; Ângelo Ricardo Balduino, Girlene Figueiredo Maciel³; Aurelio Pessôa Picanço. Avaliação da Poluição em Rios Utilizando Índices de Qualidade da Água: Um Estudo de Caso no Ribeirão São João em Porto Nacional –TO. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 35, n. 3, p.472-484, 2016.

CBHVELHAS. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Diagnóstico de fragilidades Hidroambientais 2013. Realizado pelo subcomitê da bacia hidrográfica do Rio Itabirito, pelo comitê do Rio das Velhas e pela Agência da bacia – AGB-Peixe Vivo.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Índice de Qualidade das Águas. Disponível em: <http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/32/2013/11/02.pdf> < Acesso em: 20 de Outubro de 2019.

CHAPRA, S.C. Surface water-quality modeling. New York: McGraw Hill, 2008.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais <https://copasaatende.powerappsportals.com/> Consulta dia 26/05/2019.

COUTO, R.C.A.; Mata r.a.; Alvarenga, A.O.; Oliveira, d.c.; Vieira, p.c. Avaliação da influência do coeficiente de desoxigenação (k1) empírico e real no modelo de autodepuração em corpo hídrico urbanizado. 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre 2011.

DAMASCENO, Maria da Conceição Silva; Hebe Morganne Campos Ribeiro; Luís Roberto Takiyama; Manoel Tavares de Paula. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do Rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, Amapá, Brasil. Revista Ambiente e Água 2015.

DRUMOND, Sheila Neves. Avaliação da Qualidade da água, do sedimento e identificação molecular dos tipos diarreogênicos de Escherichia coli na bacia hidrográfica do rio Xopotó na região do Alto rio Doce, Minas Gerais. Ouro Preto 2016.

ESTEVES, F. A.; MENEZES, C. F. S. Papel da Água e da Limnologia na sociedade Moderna. In: ESTEVES, F. A. Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 62-73.

EPA Environmental Protection Agency. State Requeriments for Sludge Managment, U.S. Pollution Control and Oficce of Water Enforcemente and Permits. Whashington, D.C, 1987.

EVENA, Stéphanie. et.al. Modelling the impacts of Combined Sewer Overflows on the river Seine water quality. Elsevier 2007.

FAIR, G.M. The log –difference method of estimating the constants of the first-stage biochemical oxygen demand curve. *Sewage Works Journal*, (3) May 1973.

FAN, C.; Ko, C.; Wang, W. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. *Journal of Environmental Management*, v. 90, Issue 5, p. 1824-1832, 2009.

FISCHER, E. G. Determinação de contaminação do ribeirão do Feijó através de levantamento de dados e modelo matemático de qualidade da água. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1995. (Dissertação de Mestrado).

FIA, R.; Tadeu, H. C.; Menezes, J. P. C. de.; Fia, F. R. L.; Oliveira, L. F. de. Qualidade da água e um ecossistema lótico urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre - Rs, v. 20, n. 1, p.267-275, 01 jan. 2015. Trimestral.

FLECK, Leandro et. al. Specificities and importance of mathematical models of water quality. *Revista EIXO*, Brasília, DF, v. 2, n. 1, p. 106-119, jan./jun. 2013.

FERREIRA, Daniele Mara. Et. al. Frequency curves for water quality as support for the framework of water bodies from mathematical modeling under unsteady regime. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Brazilian Journal of Water Resources Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 479-492, jul./set. 2016.

FECOMÉRCIOS. Perfil Sócio Econômico do Município de Itabirito do ano de 2016. Estudos Econômicos. http://www.adesita.org.br/uploads/adesita_2014/arquivos/itabirito-3.pdf. Consultado em 10 de Janeiro de 2019.

FREIRE, R.; Schmeider, R.M. ; Freitas, F.H.; Bonifácio, C.M.; Tavares, C.R.G. Avaliação da autodepuração de um trecho do Rio Pirapó-PR após receber as águas do Ribeirão Maringá-PR.- SIMPGEU – Simpósio de Pós –Graduação em Engenharia Urbana. Maringá-PR 2009.

FREITAS, Myrlla Oliveira. Condições de Oxigenação e Desoxigenação do Trecho Perenizado do rio Piancó-Piranhas-Açu. Trabalho de conclusão de curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande 2016.

GLORIA, W. L. R. Diagnóstico ambiental do Rio Casca – MG: contribuição para o diagnóstico ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce – MG. 2014. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

GUIMARÃES A.P. 1953. Paisagem da bacia do rio das Velhas. Tese de doutorado. Faculdade de Filosofia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 123 pp.

HILL, B. H.; Gardner, T. J. & Ekisola, O. F. (1992). Predictability of stream flow and particulate organic matter concentration as indicators of stability in prairie streams. *Hydrobiologia*, vol.242, p.7-18.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama do esgotamento sanitário em

Itabirito MG. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itabirito/panorama>>. Acesso em: 01 de Agosto de 2019.

ITABIRITO. Lei Municipal 3325 de 26 de Novembro de 2019. Dispõem sobre o Parcelamento O uso e a Ocupação do solo urbano no município de Itabirito/MG e da outras providências.

IDE Willian Ribeiro. Calibração do Modelo de Qualidade de água QUAL-UFMG para o rio Taquarizinho em period de estiagem. Researchgate 2016.

IGAM - Instituto Mineiro De Gestão Das Águas. Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais 2016. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/publicacaoestecnicas/qualidade-das-aguas/qualidade-das-aguas-superficiais/relatorios-de-avaliacao-dequalidade-das-aguas-superficiais/relatorios-anuais/12171-2016>>. Acesso em setembro de 2020.

IGAM <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica/6025-1998-a-2018>. Consultado em 20 de Setembro de 2020.

IGAM <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/publicacoes-tecnicas/qualidade-das-aguas/%20qualidade-das-aguas-superficiais/relatorios-de-avaliacao-da-qualidade-de-agua-%20superficial/relatorios-anuais/9685-2019>.

JORDÃO, E. P; PESSOA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 6ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LARENTIS, D. G. Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-Antas – RS. Tese (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LITLLER, Paul. Gestão territorial em terras indígenas: Definição de conceitos e proposta de diretrizes. Departamento de Antropologia Universidade de Brasília 2006.

LOPES, F. W. A.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Avaliação da Qualidade das Águas e Condições de Balneabilidade na Bacia do Ribeirão de Carrancas-MG. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre - Rs, v. 14, n. 4, p.111-120, 2008.

MARQUES, L. S. Avaliação espaço temporal da qualidade da água e da concentração e distribuição de elementos químicos em sedimentos na bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara-MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MELCHING, C.S.; FLORES, H.E. Rearation Equations Derived from U.S. Geological Survey Database. Journal of Environmental Engineering. V. 125 , n.5. 1999.

Minas Gerais. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

MIRANDA, Emilim Nádia. Qualidade das águas superficiais do Rio Distrito Jordão/SC: avaliada pelo IQA - Índice de Qualidade das Águas. Monografia do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina 2017.

MYSSIOR S. 2013b. Produto 7: Relatório Final Consolidado. CDH VELHAS/AGB Peixo Vivo, 157 p.

MOURÃO, P. R. J. Aplicação do Modelo de autodepuração de Qualidade das Águas QUAL-UFMG. Dissertação de Mestrado (Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto - MG. 2010.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro, Ed. IBGE, 1979.

NUNES, D. G. Modelagem da autodepuração e qualidade da água do Rio Turbo Sujo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa – MG. 2008.

OLIVEIRA, M. A. e SCHWARZBOLD, A. (1998). Influência de fatores abióticos sobre a estrutura da comunidade perifítica de limnotopos da bacia do arroio Sampaio, Mato Leitão, Rio Grande do Sul, Brasil. IHERENGIA, Sér. Bot., Porto Alegre, vol.I, n°51, p.39-61, out.

ONU Organização das nações unidas. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em 02/03/2016.

O'CONNOR, D.J.: DOBBINS, W.E. Mechanisms of reaeration in natural Streams. Trans. Am.Soc. Civ. Eng. 1958.

OWENS,M.; Edwards, R.W.; Gibbs, J.W. Some reeration studies in streams. Internat Journ air and Water Pollution.

OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim. Santa Maria, p. 19, 2007. Dissertação de Mestrado Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

PINTO, NELSON et. al. Hidrologia Básica. 9° edição. São Paulo. Editora Edgar Blucher Ltda 2005.

RIBEIRO, Antônio Giacomini. Boletim de Geografia Teorética. 23(46-46): 288-294, 1993.

RIBEIRO, Willian Ide et. al. Calibração Do Modelo De Qualidade De Água QUAL-UFMG Para O Rio Taquarizinho Em Período De Estiagem. See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/298071994>. Revisado em 2009.

ROSA, Nathalia Cristina Martins. Estimativa dos coeficientes de desoxigenação e reparação em trechos do rio itabirito – MG. Monografia- Trabalho de graduação em Engenharia Ambiental Ouro Preto 2019.

RUBIO-Arias, H. Ochoa-Rivero, J. M.; Quintana, R. M.; Saucedo-Teran, R.; Ortizdelgado, R. C.; Rey-Burciaga, N. I.; Espinoza-Prieto, J. R. Development of a Water Quality Index (WQI) of an Artificial Aquatic Ecosystem in Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 2013.

SAAD, A. R.; Semensatto JR, D, L.; Ayres, F. M.; Oliveira, P. E. Índice de Qualidade a Água – IQA do Reservatório do Tanque Grande, Município de Guarulhos, Estado de São Paulo, Brasil: 1990 – 2006. *Revista UNG – Geociências*, Guarulhos-sp, v. 6, n. 1, p.118-133, jan. 2007.

SAAE-Desenvolvimento e Elaboração de Projetos de Saneamento Básico na Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Produto 3 (p3) - Relatório Técnico Preliminar – UTE rio Itabirito (município de Itabirito) 2017.

SAAE - <https://www.saaeita.mg.gov.br/> Consultado 24 de Junho de 2019.

SAAE - <https://www.saaeita.mg.gov.br/> Consultado 30 de Junho 2020.

SILVA, P. K. Estudo das características hidrodinâmicas do Rio Gualaxo do Norte em dois trechos: um a montante e outro a jusante do rompimento da Barragem de Fundão/MG. Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

SING. Kunwar.P et.al. Artificial neural network modeling of the river water quality- a case study. Environmental Chemistry division, Indian Institute of Toxicology Research Post Bix 80, MG, Marg, Lucknow 226001,India. Elsevier January 2009.

SANTOS, Clibson Alves. Análise morfométrica como subsídio ao zoneamento territorial: o caso das bacias do córrego Carioca, córrego do Bação e ribeirão Carioca na região do alto rio das Velhas-MG. Escola de Minas Ouro Preto 77-85, jan. mar. 2008.

SPERLING, Marcos Von. Introdução a Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgoto . Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental 2005; Universidade Federal de Minas Gerais, 458 p.

SPERLING, Marcos Von. Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Editora: UFMG, 2014. Volume 7. 588 p.

SPERLING, Marcos Von. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Editora: UFMG, 2007. Volume 1. 452 p.

SOUZA Isabela Cristina. Diagnóstico ambiental da bacia do rio Caratinga utilizando Índice de Qualidade de Água e protocolo de avaliação rápida. Dissertação de Mestrado UFOP-Ouro Preto 2018.

STREETER, H.W; Phelps, E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *Public Health Bulletin*, Washington. 1925.

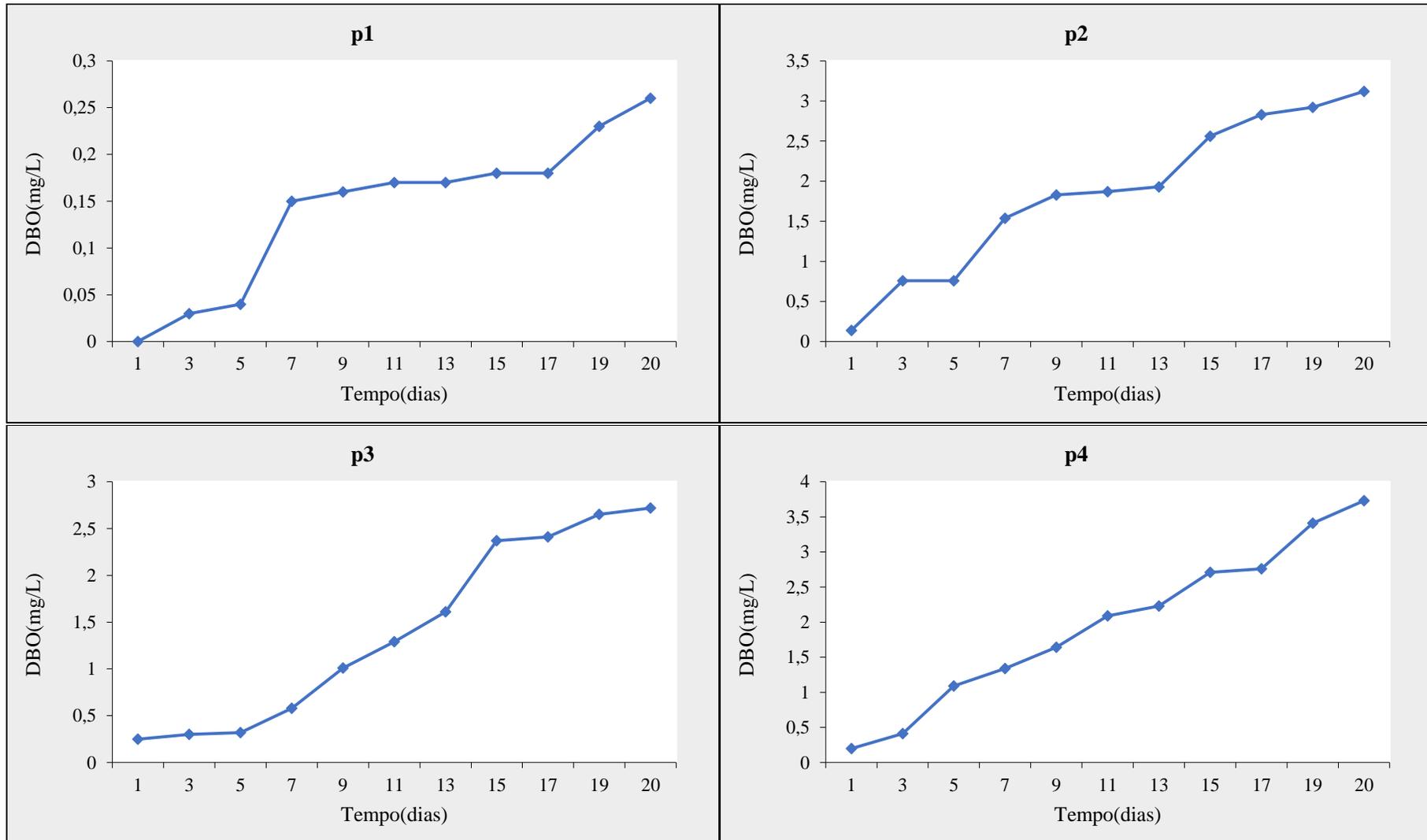
Thomann, RV e Mueller, JA (1987) Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper-Collins, New York, 644 p.

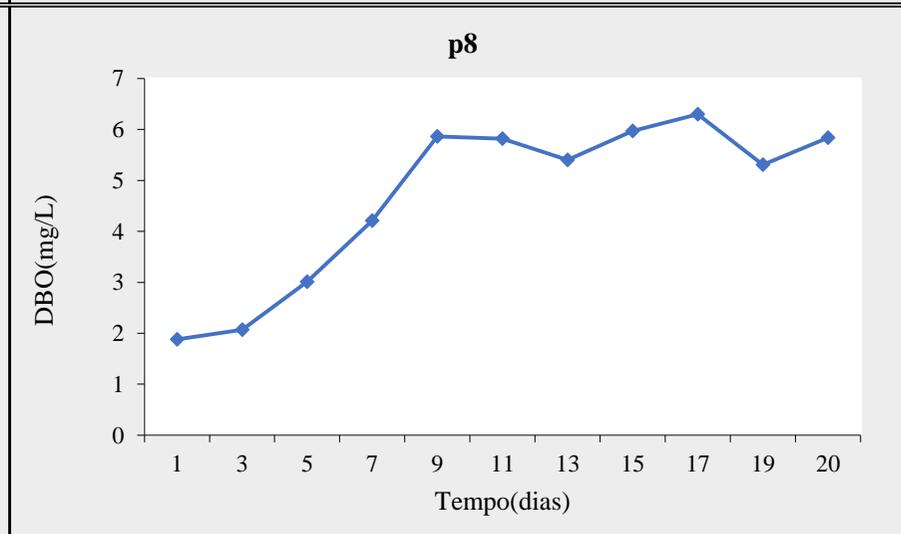
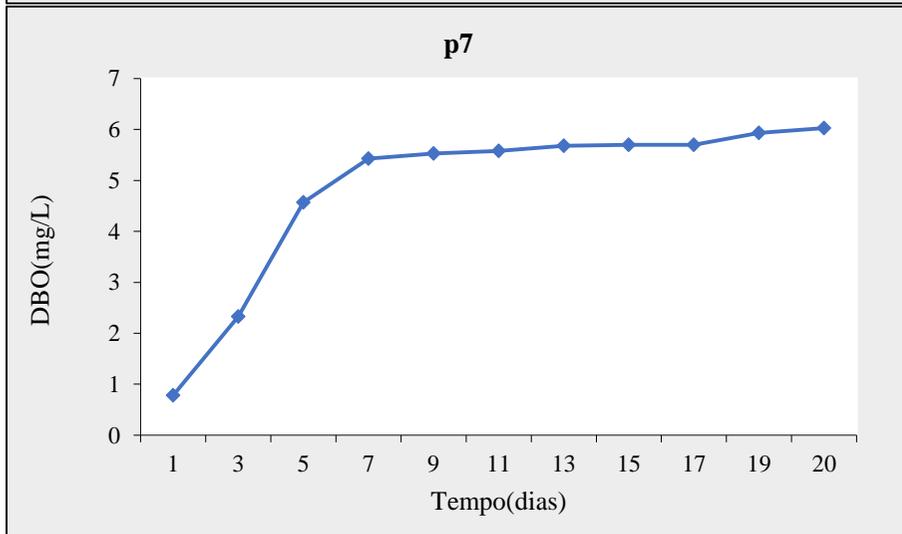
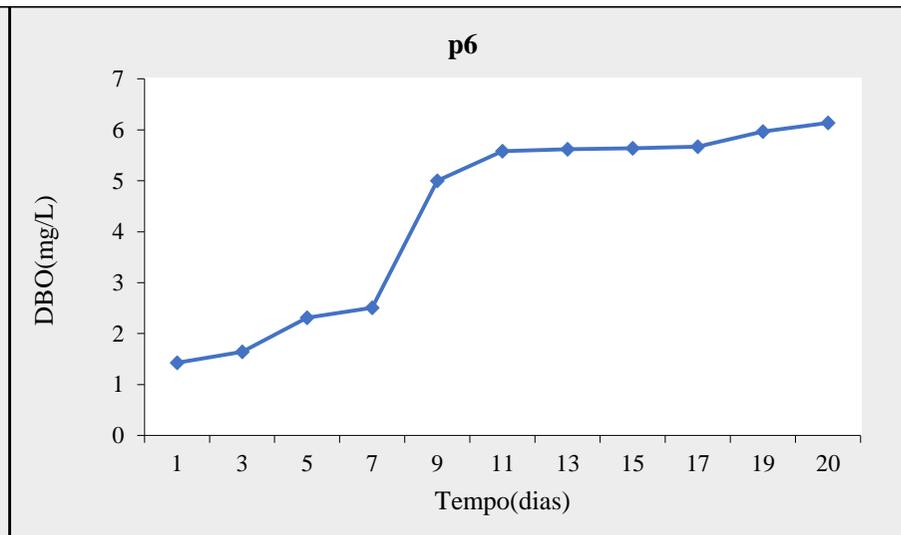
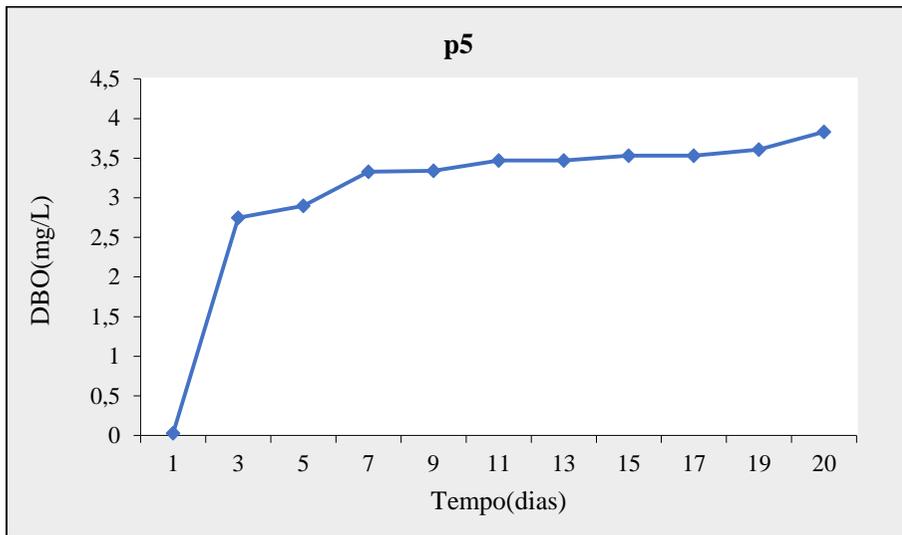
TSIVOGLU, E.C.; Wallace J.C. Characterizing stream reaeration capacity. EPA R3-72-012; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C .1972.

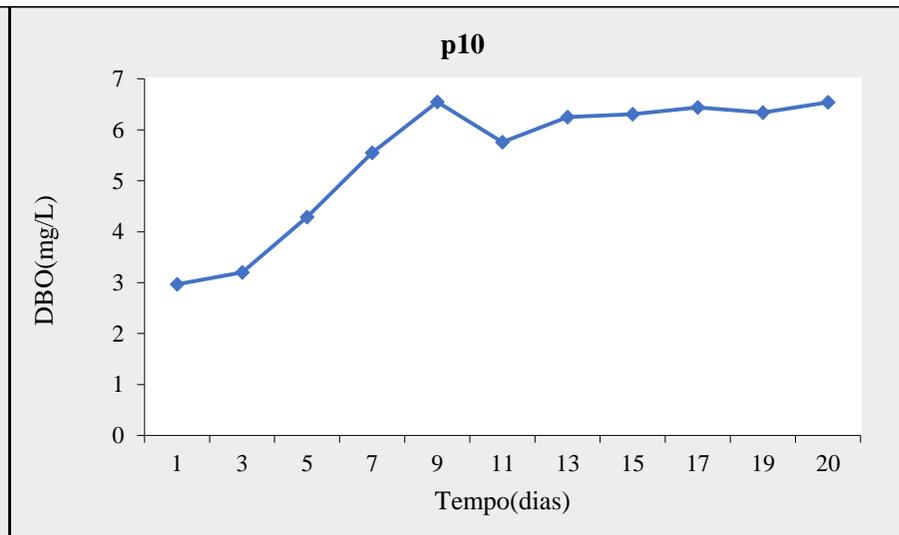
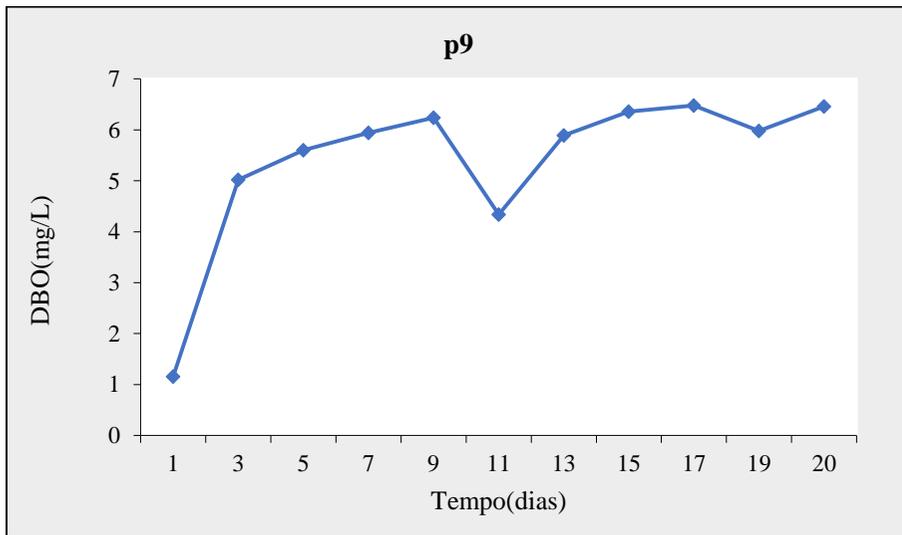
VELOSO H.P., Rangel Filho A.L.R., Lima J.C.A. 1991. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 123 p.

APÊNDICE A

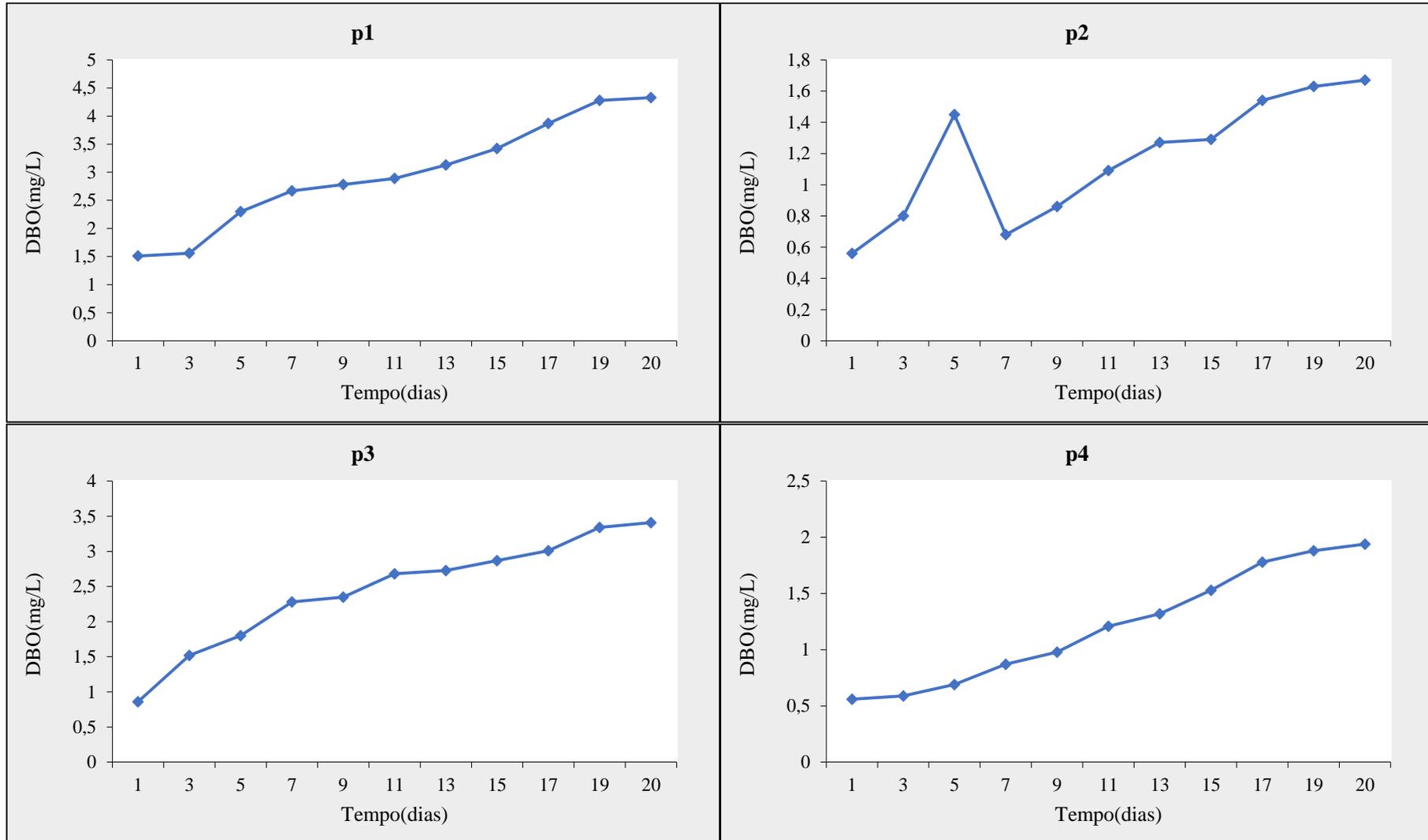
CURVAS DE DBO NO PERÍODO CHUVOSO

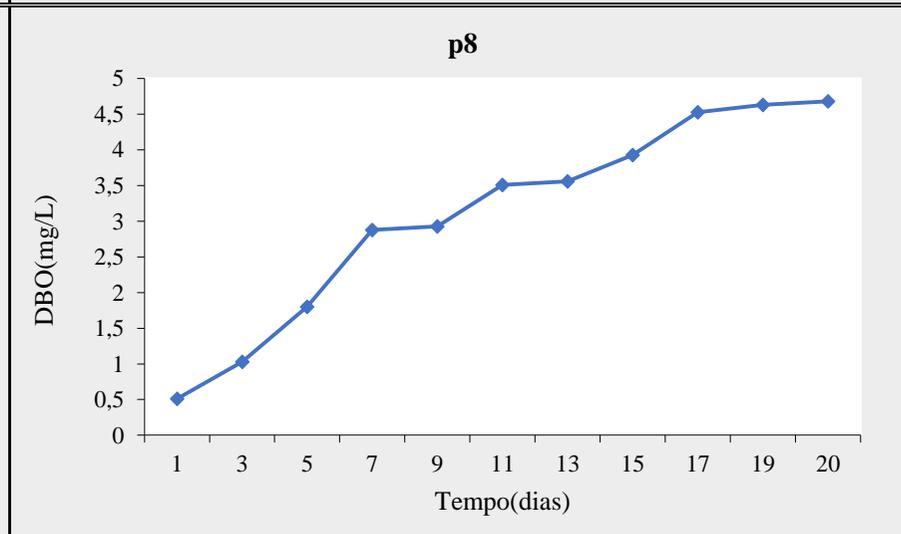
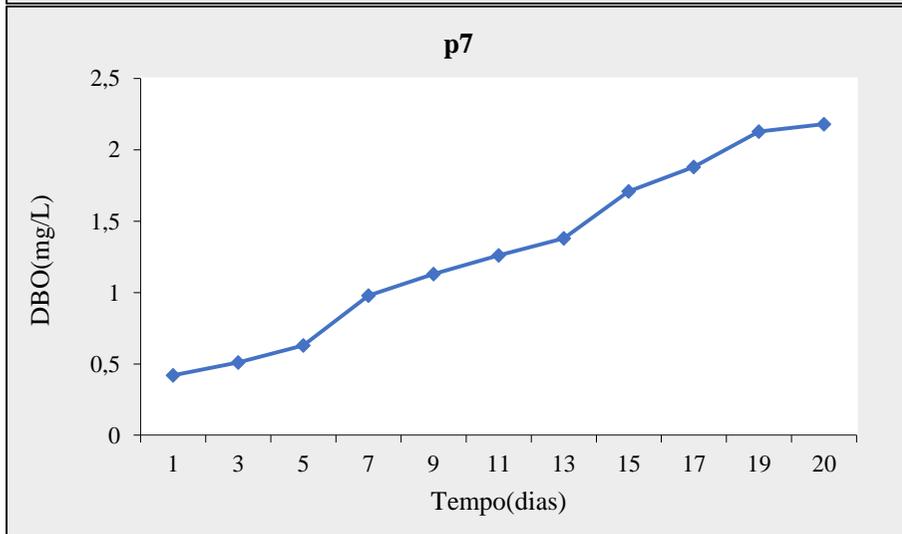
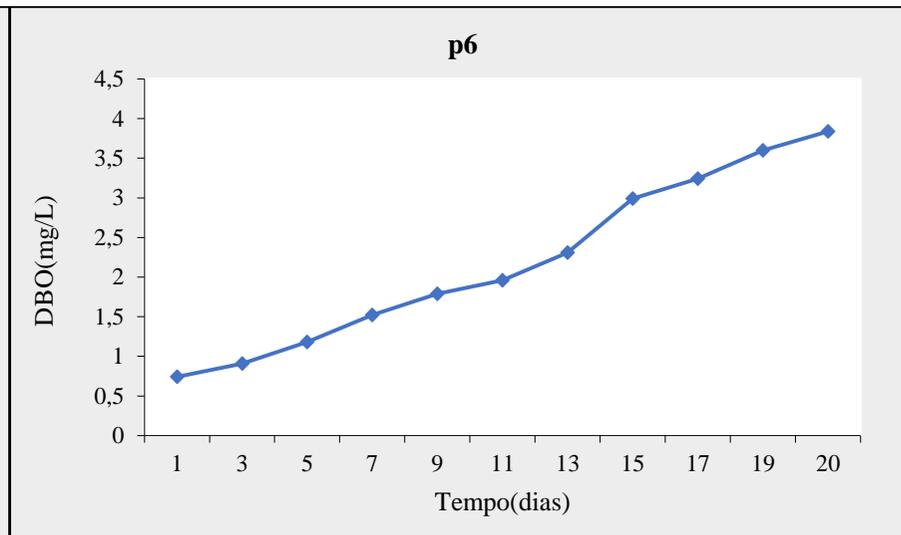
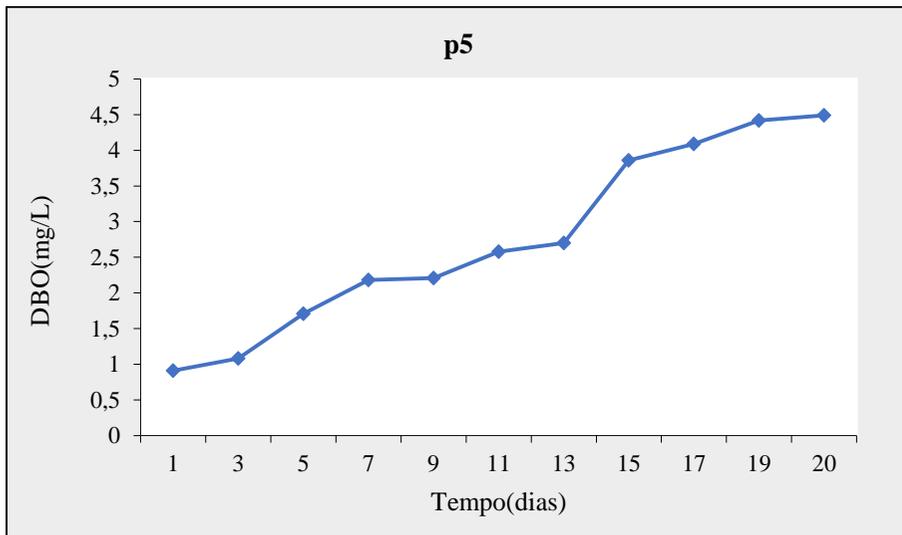


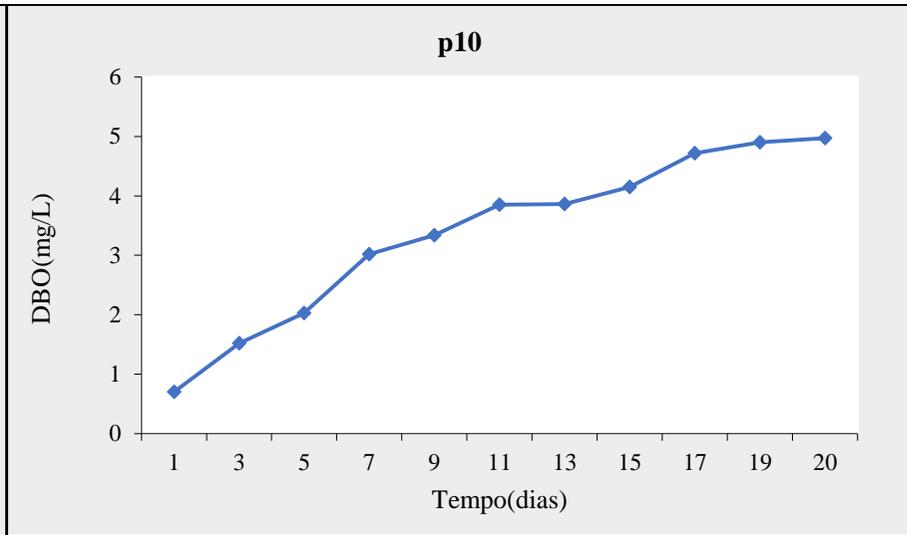
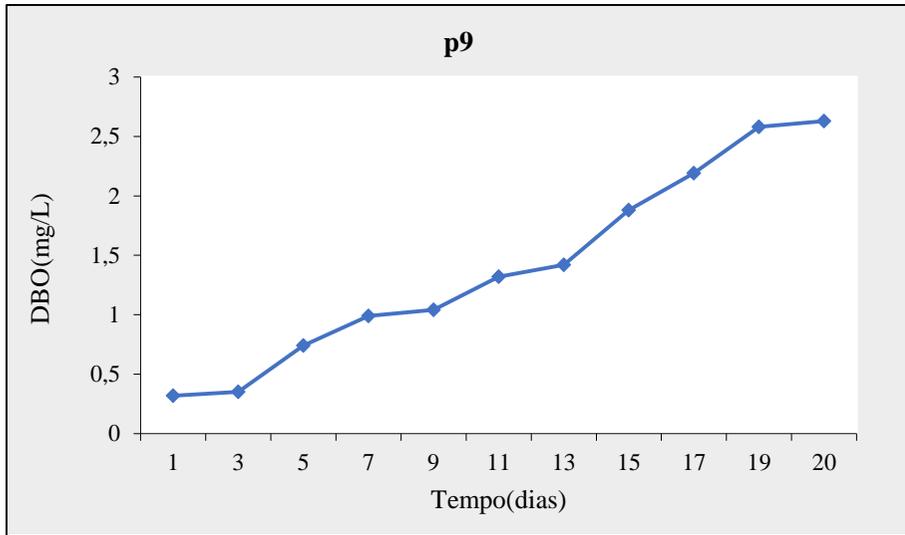




CURVAS DE DBO DO PERÍODO SECO





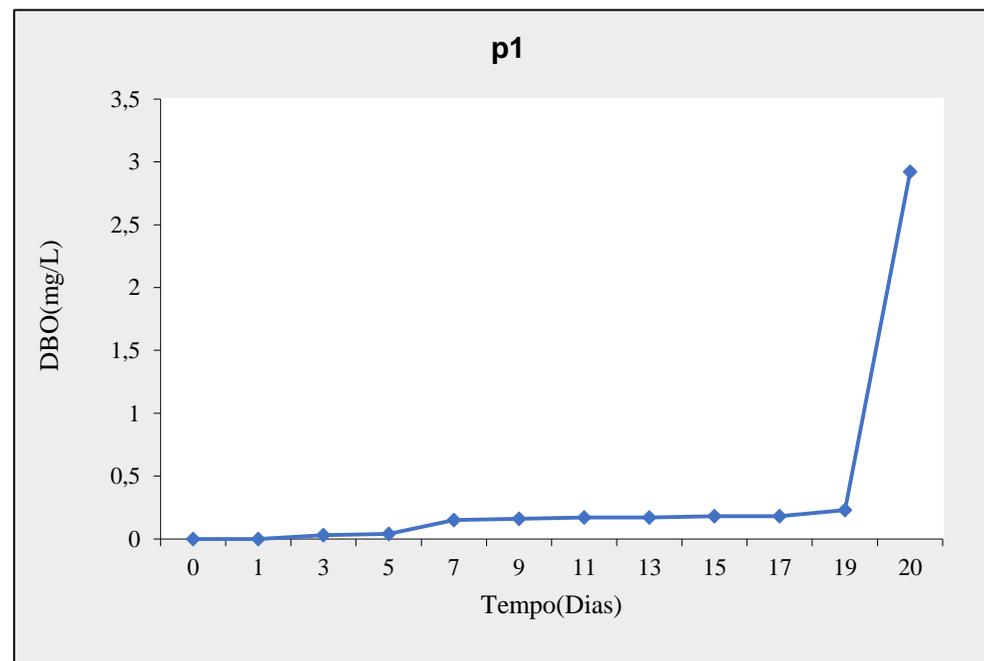


APÊNDICE B

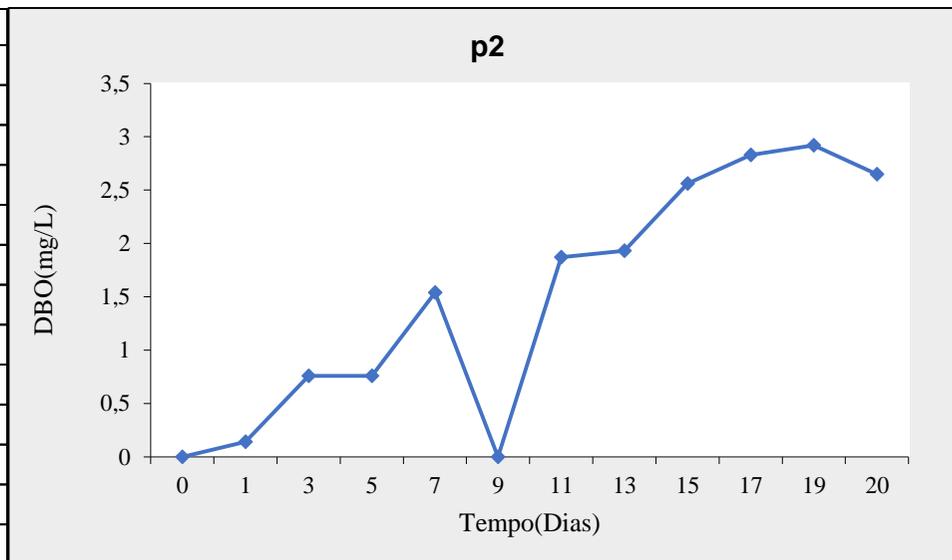
COEFICIENTE DE DESOXIGENAÇÃO (K1) PERÍODO CHUVOSO

Ponto Branco - P1				
Tempo (dias)	Y _{observado}	Y _{obs.acum}	Y _{estimado}	Erro
0	0	0	0	0
1	0	0	0,64	0,4
3	0,03	0,03	1,88	3,42
5	0,04	0,07	3,09	9,12
7	0,15	0,22	4,27	16,39
9	0,16	0,38	5,41	25,35
11	0,17	0,55	6,53	35,76
13	0,17	0,72	7,62	47,55
15	0,18	0,9	8,67	60,4
17	0,18	1,08	9,7	74,29
19	0,23	1,31	10,7	88,15
20	2,92	4,23	11,19	48,42

Soma	360,83
L₀	46,748
K₁	0,0137

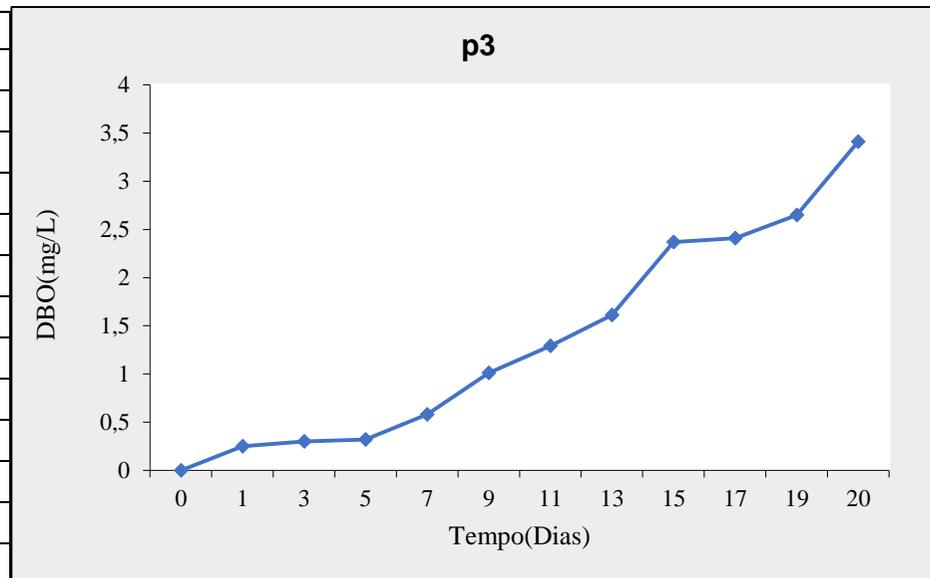


Ribeirão Carioca - P2				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0,14	0,14	0,13	0
3	0,76	0,9	0,38	0,14
5	0,76	1,66	0,64	0,01
7	1,54	3,2	0,89	0,42
9	0	3,2	1,14	1,31
11	1,87	5,07	1,39	0,23
13	1,93	7	1,64	0,08
15	2,56	9,56	1,89	0,45
17	2,83	12,39	2,14	0,48
19	2,92	15,31	2,38	0,29
20	2,65	17,96	2,51	0,02



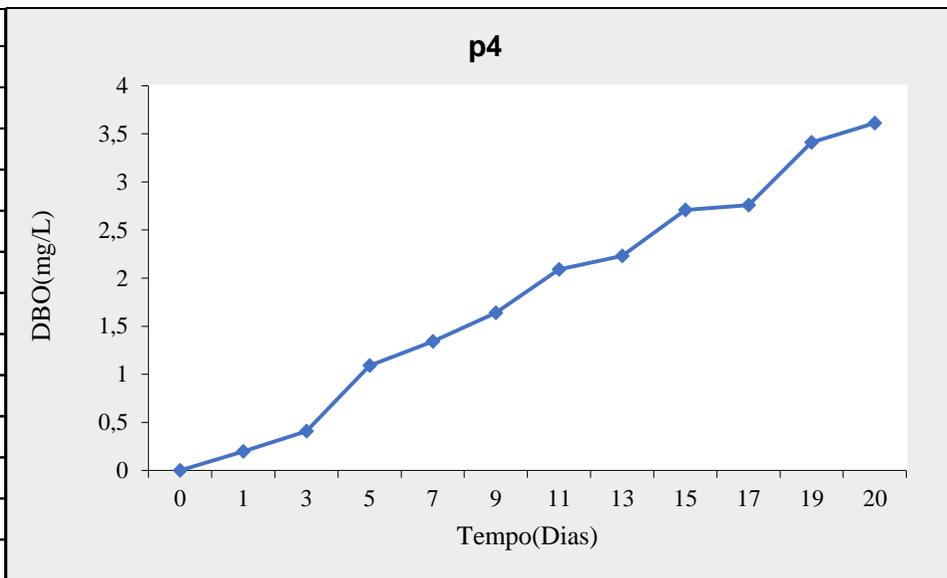
Soma	3,41
L0	49,314
K1	0,003

Rio Itabirito - P3				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0,25	0,25	0,17	0,01
3	0,3	0,55	0,52	0,05
5	0,32	0,87	0,86	0,29
7	0,58	1,45	1,19	0,38
9	1,01	2,46	1,53	0,27
11	1,29	3,75	1,85	0,32
13	1,61	5,36	2,18	0,32
15	2,37	7,73	2,5	0,02
17	2,41	10,14	2,82	0,16
19	2,65	12,79	3,13	0,23
20	3,41	16,2	3,28	0,02



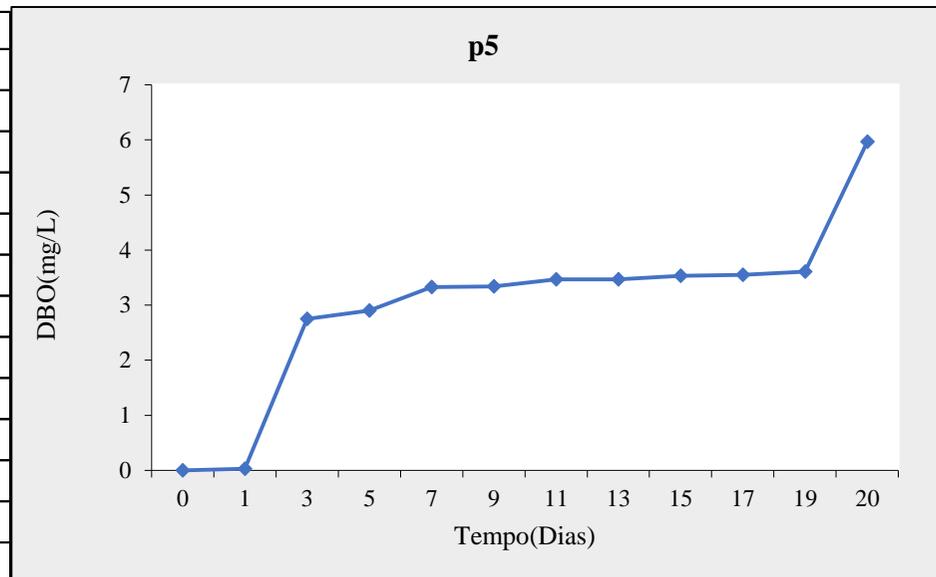
Soma	2,04
L0	29,287
K1	0,006

Córrego Bação - P4				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0,2	0,2	0,19	0
3	0,41	0,61	0,56	0,02
5	1,09	1,7	0,92	0,03
7	1,34	3,04	1,26	0,01
9	1,64	4,68	1,6	0
11	2,09	6,77	1,92	0,03
13	2,23	9	2,23	0
15	2,71	11,71	2,53	0,03
17	2,76	14,47	2,82	0
19	3,41	17,88	3,11	0,09
20	3,61	21,49	3,24	0,13



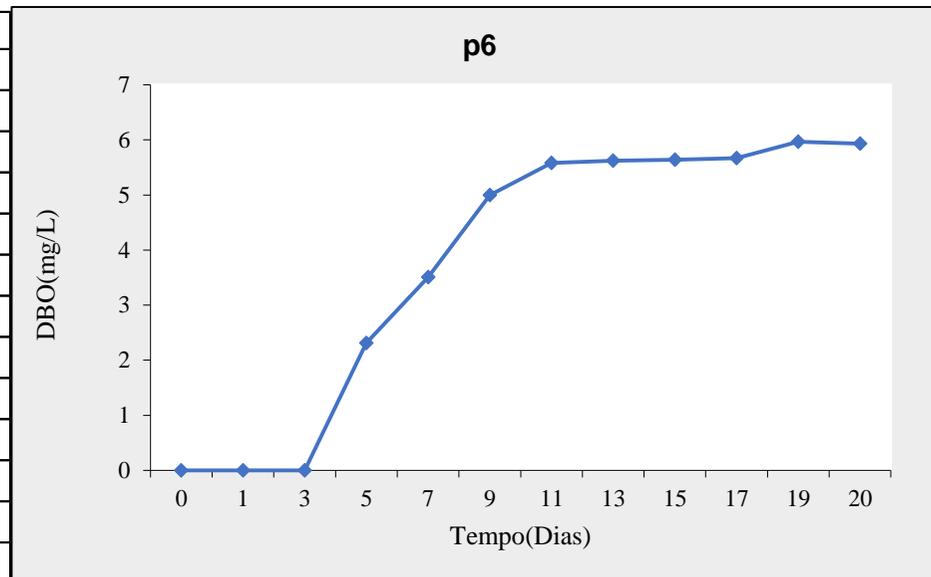
Soma	0,22
L0	11,289
K1	0,0169

Córrego Criminoso - P5				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0,03	0,03	2,73	7,29
3	2,75	2,78	4,65	3,59
5	2,9	5,68	5,08	4,75
7	3,33	9,01	5,18	3,41
9	3,34	12,35	5,2	3,46
11	3,47	15,82	5,2	3,01
13	3,47	19,29	5,21	3,01
15	3,53	22,82	5,21	2,81
17	3,55	26,37	5,21	2,74
19	3,61	29,98	5,21	2,55
20	5,97	35,95	5,21	0,58



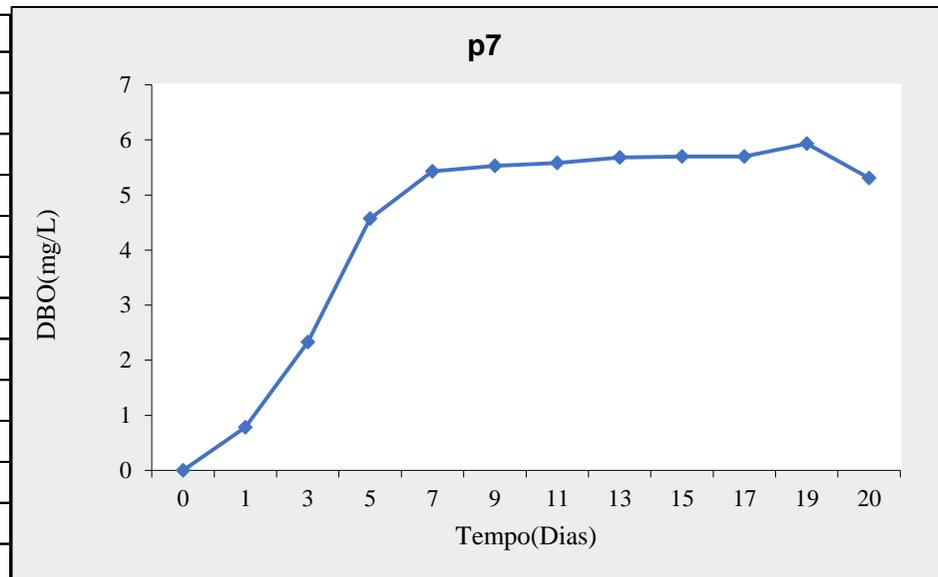
Soma	36,62
L0	5,206
K1	0,743

Rio Itabirito - P6				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0	0	0,3	0,09
3	0	0	0,82	0,67
5	2,31	2,31	1,24	1,14
7	3,51	5,82	1,59	3,67
9	5	10,82	1,88	9,72
11	5,58	16,4	2,12	11,97
13	5,62	22,02	2,32	10,92
15	5,64	27,66	2,48	10
17	5,67	33,33	2,61	9,37
19	5,97	39,3	2,72	10,57
20	5,93	45,23	2,77	10,01



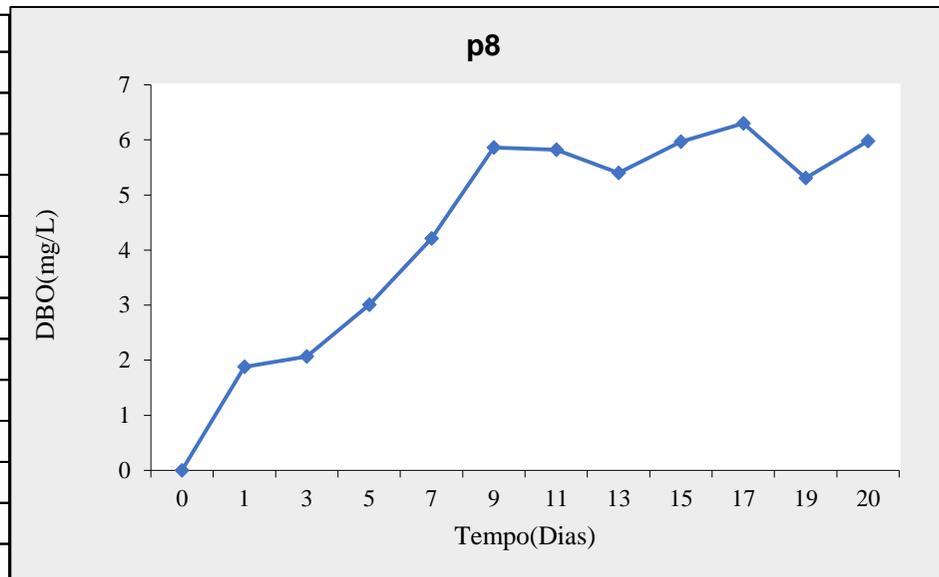
Soma	68,11
L0	3,226
K1	0,097

Córrego Carioca - P7				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0,78	0,78	1,33	0,31
3	2,33	3,11	3,18	0,72
5	4,57	7,68	4,29	0,08
7	5,43	13,11	4,97	0,21
9	5,53	18,64	5,38	0,02
11	5,58	24,22	5,63	0
13	5,68	29,9	5,78	0,01
15	5,7	35,6	5,87	0,03
17	5,7	41,3	5,92	0,05
19	5,93	47,23	5,95	0
20	5,31	52,54	5,97	0,43



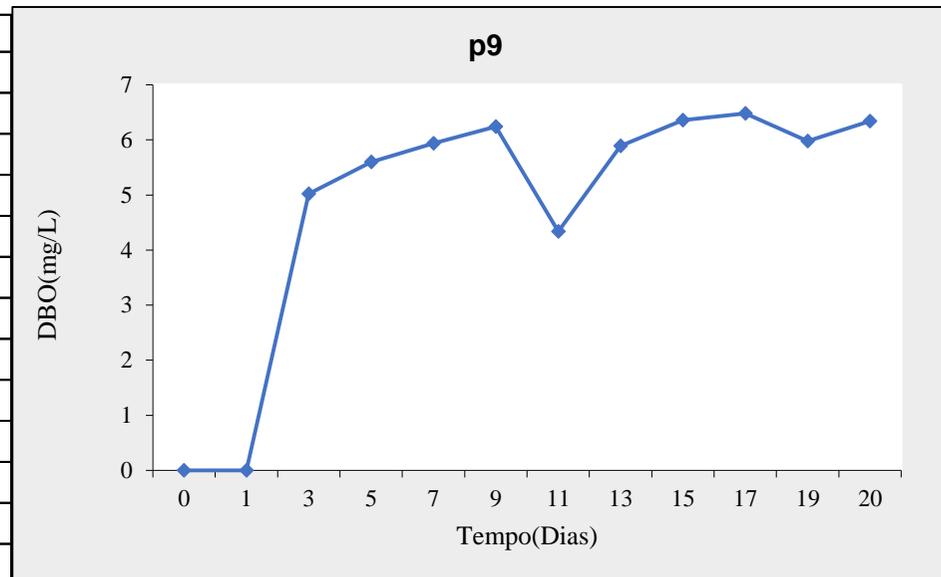
Soma	1,43
L0	6,005
K1	0,251

Rio Itabirito - P8				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	1,88	1,88	0,86	1,05
3	2,07	3,95	2,25	0,03
5	3,01	6,96	3,32	0,1
7	4,21	11,17	4,13	0,01
9	5,86	17,03	4,75	1,23
11	5,82	22,85	5,23	0,35
13	5,4	28,25	5,59	0,03
15	5,97	34,22	5,86	0,01
17	6,3	40,52	6,07	0,05
19	5,31	45,83	6,23	0,85
20	5,98	51,81	6,29	0,1



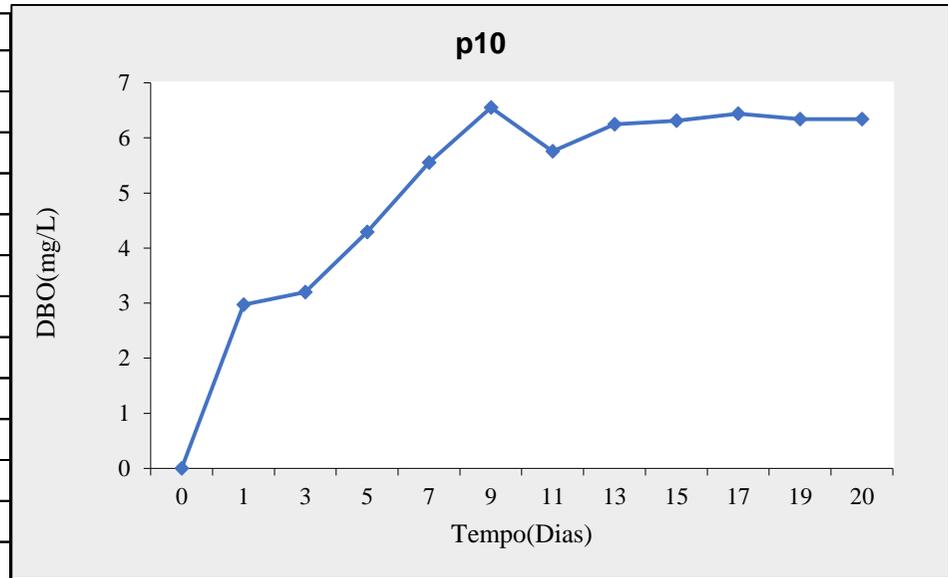
Soma	3,71
L0	6,741
K1	0,136

Rio Itabirito - P9				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	0	0	1,88	3,52
3	5,02	5,02	4,06	0,92
5	5,6	10,62	5,11	0,24
7	5,94	16,56	5,6	0,11
9	6,24	22,8	5,84	0,16
11	4,34	27,14	5,95	2,6
13	5,89	33,03	6,01	0,01
15	6,36	39,39	6,03	0,11
17	6,48	45,87	6,04	0,19
19	5,98	51,85	6,05	0
20	6,34	58,19	6,05	0,08



Soma	7,87
L0	6,055
K1	0,371

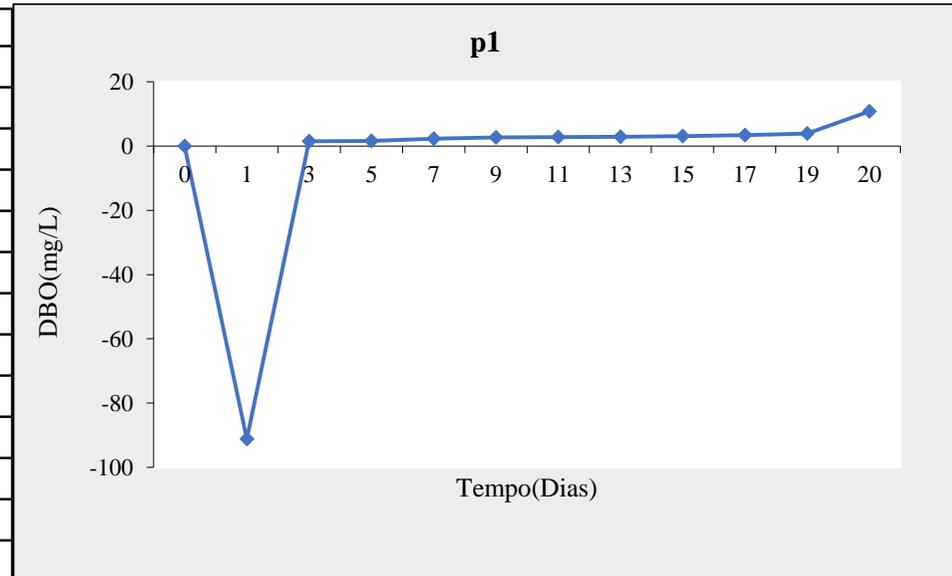
Rio Itabirito - P10				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	2,97	2,97	1,16	3,28
3	3,2	6,17	2,94	0,07
5	4,29	10,46	4,17	0,01
7	5,55	16,01	5,03	0,27
9	6,55	22,56	5,64	0,84
11	5,76	28,32	6,05	0,09
13	6,25	34,57	6,35	0,01
15	6,31	40,88	6,55	0,06
17	6,44	47,32	6,69	0,06
19	6,34	53,66	6,79	0,2
20	6,34	60	6,83	0,24



Soma	4,88
L0	7,017
K1	0,181

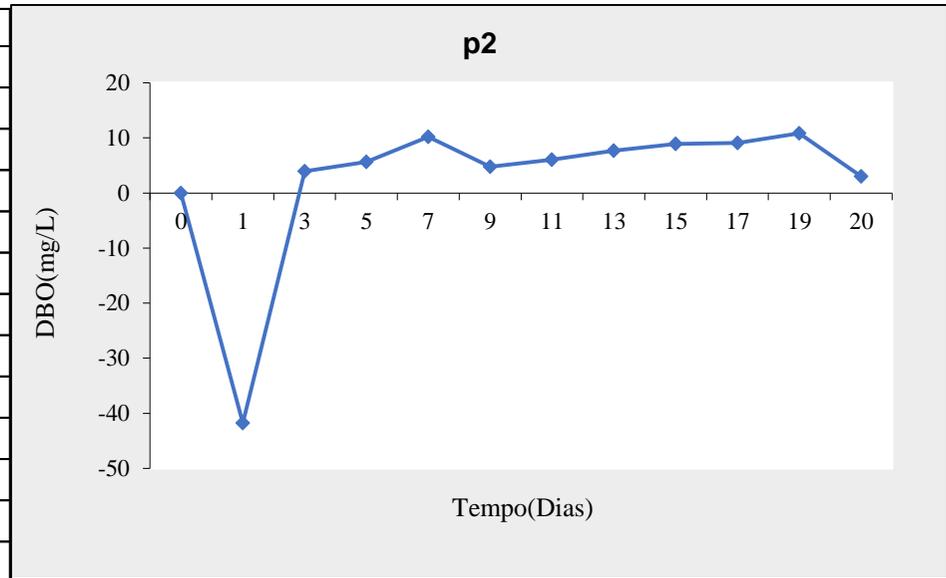
COEFICIENTE DE DESOXIGENAÇÃO (K1) PERÍODO SECO

Ponto Branco - P1				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-91,24	-91,24	1,54	8608,91
3	1,51	-89,73	4,62	8902,01
5	1,56	-88,17	7,68	9187,33
7	2,3	-85,87	10,72	9330,53
9	2,67	-83,2	13,75	9399,85
11	2,78	-80,42	16,77	9444,94
13	2,89	-77,53	19,76	9465,65
15	3,13	-74,4	22,74	9436,64
17	3,42	-70,98	25,71	9348,48
19	3,87	-67,11	28,66	9171,35
20	10,85	-56,26	30,13	7463,42



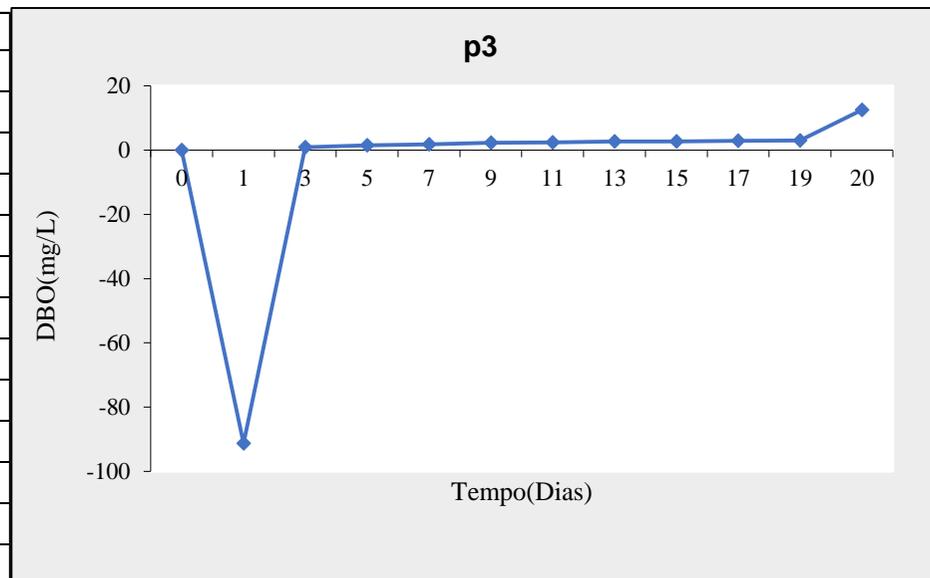
Soma	92295,67
L₀	588,583
K₁	0,0026

Ribeirão Carioca - P2				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-41,76	-41,76	2,3	1941,55
3	3,94	-37,82	5,47	2,33
5	5,63	-32,18	7,37	3,03
7	10,21	-21,97	8,52	2,87
9	4,79	-17,18	9,2	19,49
11	6,06	-11,13	9,62	12,67
13	7,68	-3,45	9,86	4,79
15	8,94	5,49	10,01	1,14
17	9,08	14,58	10,1	1,04
19	10,85	25,42	10,16	0,47
20	3,01	28,43	10,17	51,33



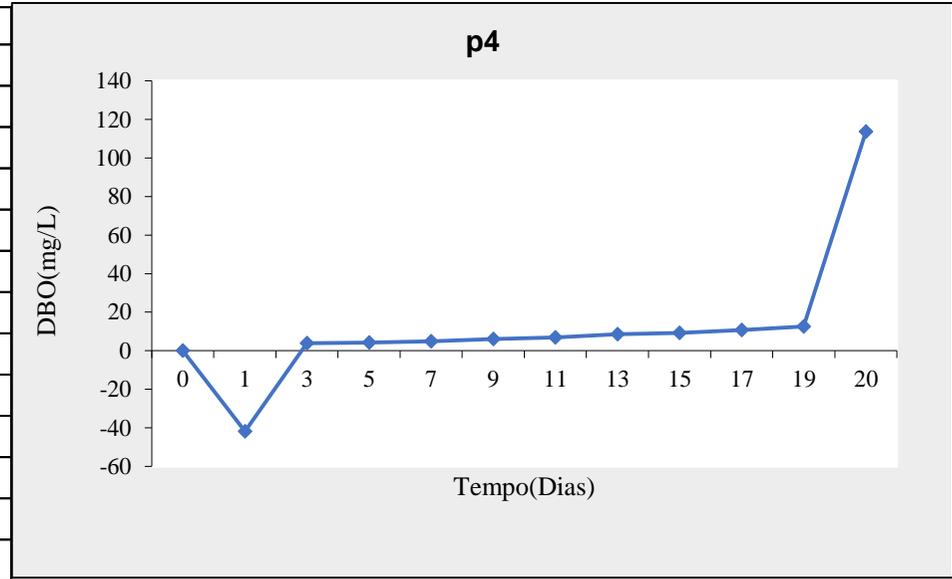
Soma	1989,39
L0	10,237
K1	0,255

Rio Itabirito - P3				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-91,29	-91,29	0,66	8455,36
3	0,86	-90,43	1,6	0,55
5	1,52	-88,91	2,19	0,45
7	1,8	-87,11	2,56	0,58
9	2,28	-84,83	2,79	0,26
11	2,35	-82,48	2,94	0,34
13	2,68	-79,8	3,03	0,12
15	2,73	-77,07	3,08	0,13
17	2,87	-74,2	3,12	0,06
19	3,01	-71,19	3,14	0,02
20	12,54	-58,65	3,15	88,08



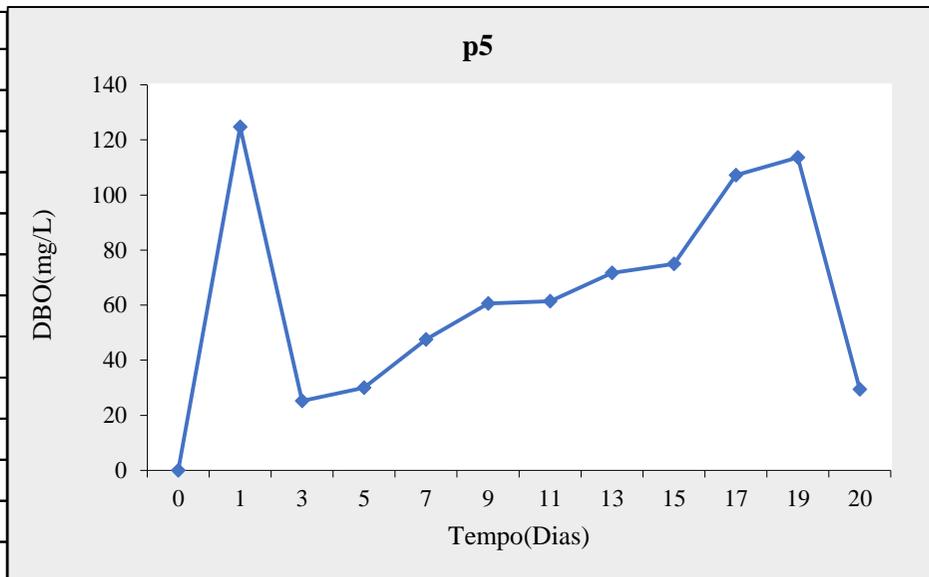
Soma	8457,87
L0	3,18
K1	0,234

Córrego Bação - P4				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-41,83	-41,83	1,38	1866,77
3	3,94	-37,89	3,79	0,02
5	4,15	-33,73	5,83	2,81
7	4,86	-28,87	7,55	7,22
9	6,13	-22,75	8,99	8,19
11	6,9	-15,85	10,2	10,91
13	8,52	-7,32	11,23	7,32
15	9,3	1,97	12,09	7,79
17	10,77	12,75	12,81	4,15
19	12,54	25,28	13,42	0,79
20	113,61	138,89	13,69	9984,21



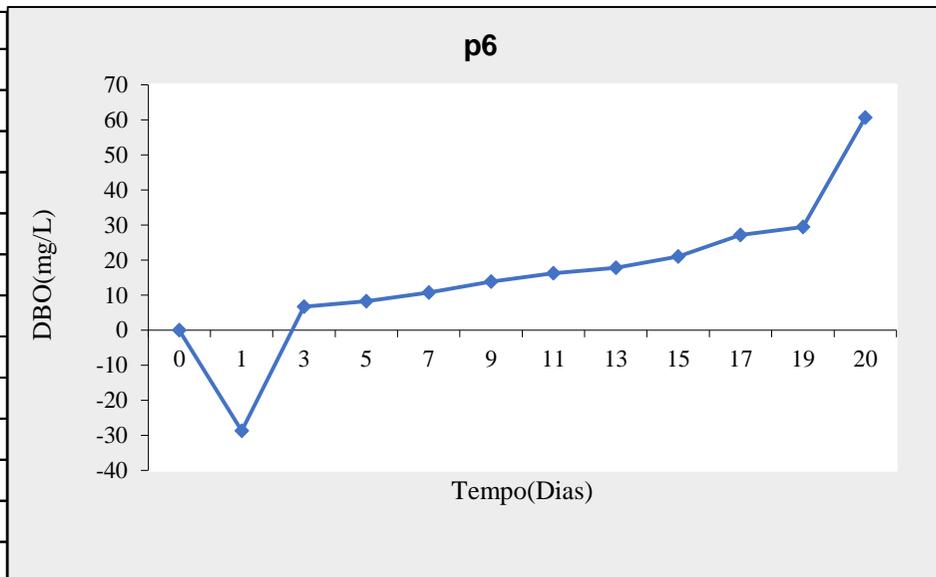
Soma	1915,97
L0	16,669
K1	0,0861

Córrego Criminoso - P5				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	124,72	124,72	11,92	12725,46
3	25,28	150	33,18	62,43
5	30	180	51,43	459,15
7	47,5	227,5	67,09	383,75
9	60,56	288,06	80,53	399
11	61,39	349,44	92,07	941,08
13	71,67	421,11	101,97	918,03
15	75	496,11	110,46	1257,55
17	107,22	603,33	117,75	110,91
19	113,61	716,94	124,01	108,16
20	29,45	746,4	126,8	9475,97



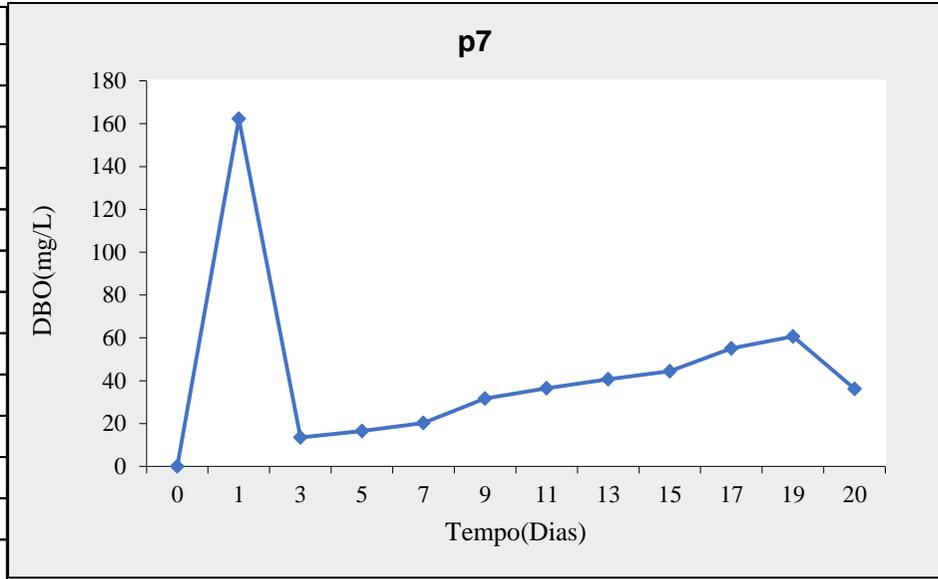
Soma	17365,51
L0	161,89
K1	0,076

Rio Itabirito - P6				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-28,73	-28,73	2,71	988,46
3	6,73	-22	7,75	1,05
5	8,27	-13,73	12,32	16,36
7	10,73	-3	16,45	32,78
9	13,82	10,82	20,2	40,72
11	16,27	27,09	23,59	53,59
13	17,82	44,91	26,67	78,33
15	21	65,91	29,45	71,47
17	27,18	93,09	31,98	23
19	29,45	122,55	34,26	23,13
20	60,65	183,19	35,32	641,12



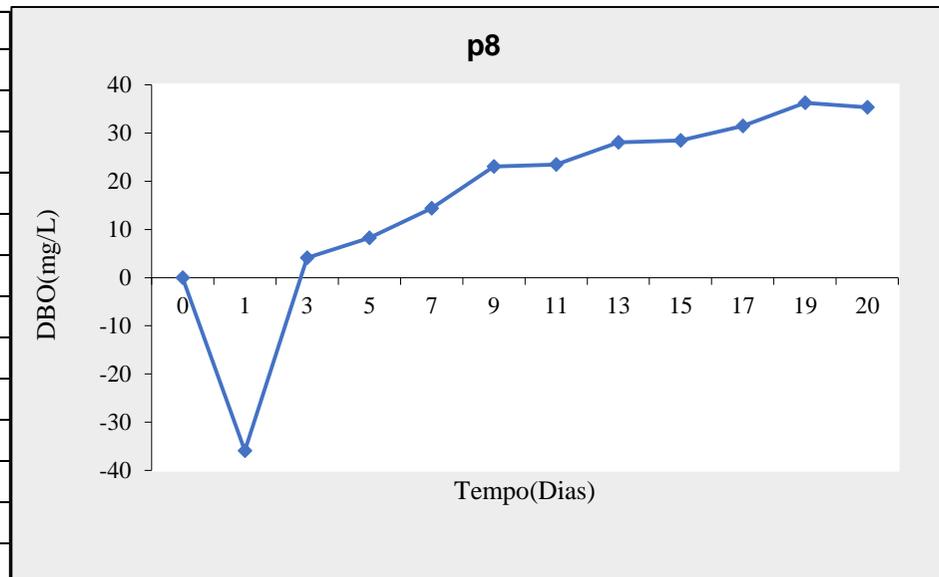
Soma	1328,88
L0	56,279
K1	0,049

Córrego Carioca - P7				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	162,26	162,26	6,27	24333,55
3	13,55	175,81	17,6	16,38
5	16,45	192,26	27,49	121,9
7	20,32	212,58	36,14	250,11
9	31,61	244,19	43,69	145,83
11	36,45	280,65	50,29	191,38
13	40,65	321,29	56,05	237,24
15	44,52	365,81	61,08	274,4
17	55,16	420,97	65,48	106,44
19	60,65	481,61	69,32	75,23
20	36,24	517,85	71,05	1211,95



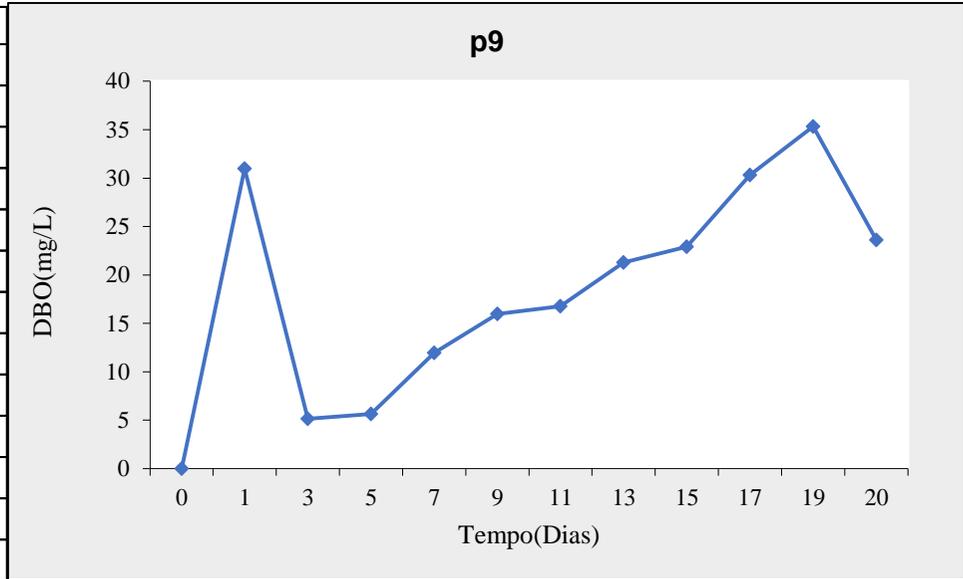
Soma	25752,47
L0	95,845
K1	0,068

Rio Itabirito - P8				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-35,92	-35,92	5,13	1685,48
3	4,08	-31,84	13,5	88,78
5	8,24	-23,6	19,85	134,81
7	14,4	-9,2	24,67	105,42
9	23,04	13,84	28,32	27,9
11	23,44	37,28	31,09	58,59
13	28,08	65,36	33,2	26,19
15	28,48	93,84	34,79	39,86
17	31,44	125,28	36	20,83
19	36,24	161,52	36,92	0,47
20	35,32	196,84	37,29	3,89



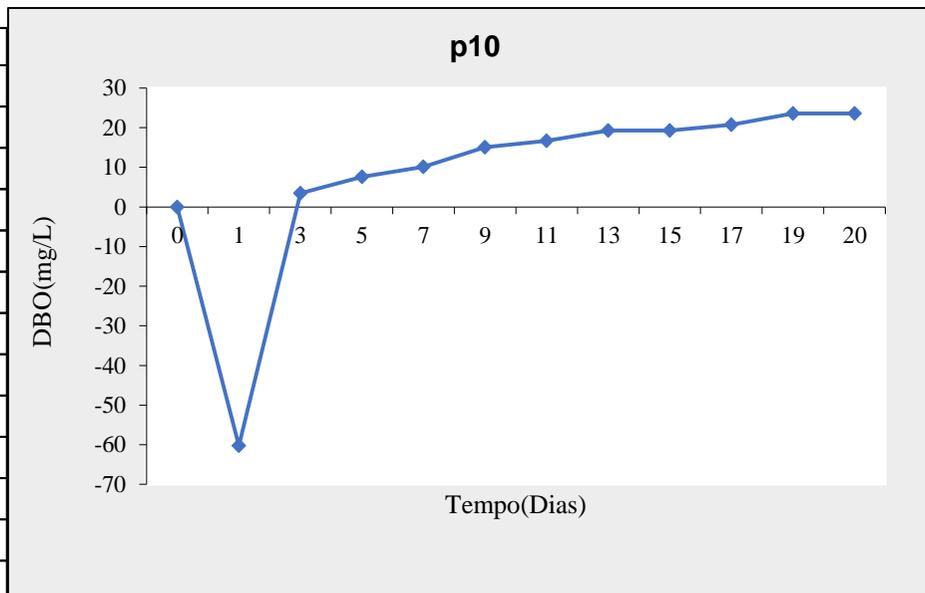
Soma	2188,32
L0	39,81
K1	0,138

Rio Itabirito - P9				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	30,97	30,97	2,73	797,45
3	5,16	36,13	8	8,07
5	5,65	41,77	13,04	54,7
7	11,94	53,71	17,86	35,04
9	15,97	69,68	22,45	42,08
11	16,77	86,45	26,85	101,49
13	21,29	107,74	31,05	95,17
15	22,9	130,65	35,06	147,7
17	30,32	160,97	38,89	73,37
19	35,32	196,29	42,55	52,22
20	23,6	219,89	44,32	429,21



Soma	1407,3
L0	120,934
K1	0,023

Rio Itabirito - P10				
Tempo (dias)	Yobservado	Yobs.acum	Yestimado	Erro
0	0	0	0	0
1	-60,25	-60,25	3,69	4088,48
3	3,5	-56,75	9,55	36,57
5	7,6	-49,15	13,83	38,83
7	10,15	-39	16,96	46,43
9	15,1	-23,9	19,26	17,27
11	16,7	-7,2	20,93	17,91
13	19,25	12,05	22,16	8,45
15	19,3	31,35	23,05	14,09
17	20,75	52,1	23,71	8,76
19	23,6	75,7	24,19	0,35
20	23,6	99,3	24,38	0,61



Soma	4277,13
L0	25,495
K1	0,156

APÊNDICE C

MONITORAMENTO DE CAMPO E LABORATÓRIO PERÍODO CHUVOSO E SECO

 												
LAUDO FÍSICO-QUÍMICO & MICROBIOLÓGICO												
Data da coleta	CÓD	Ponto de Coleta	Contagem E. Coli (NPM/100 ml)	Contagem Coliformes Totais (NPM/100 ml)	DQO (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Cond. Elétrica microsenmes/cm
22/01/2019	P1	Rio Itabirito	400	> 2419,6	< 1	7,81	12	0,2	0,5	8,95	22	20,4
22/01/2019	P2	Ribeirão Carioca	601,5	>2419,6	1	6,7	17	0,4	0,7	7,74	22,8	24,7
22/01/2019	P3	Rio Itabirito	791	> 2419,6	3	6,97	134	0,5	0,6	8,06	22,6	78,9
22/01/2019	P4	Córrego do Bação	913,9	> 2419,6	2	6,73	11,5	0	0,8	7,75	22	27,5
22/01/2019	P5	Córrego Criminoso	>2419,6	> 2419,6	11	6,83	18	0,3	8,9	7,01	23,3	94,4
22/01/2019	P6	Rio Itabirito	> 2419,6	>2419,6	8	7,06	92,4	0,2	1,4	4,46	23,7	174,8
22/01/2019	P7	Córrego Carioca	> 2419,6	>2419,6	4	6,85	12,8	0,2	0,3	6,91	24	64,4
22/01/2019	P8	Rio Itabirito	> 2419,6	>2419,6	5	7,02	50,1	0,3	0,5	7,07	22,7	73,4
22/01/2019	P9	Rio Itabirito	> 2419,6	>2419,6	4	6,86	52,2	0,4	0,1	7,44	24,6	63,8
22/01/2019	P10	Rio Itabirito	> 2419,6	> 2419,6	6	6,99	6,99	0,4	1,6	7,4	24	71,4

(*) Confluência córrego do Bação, não foi possível coletar devido dificuldades e risco de acesso.

Condições metereológicas: ensolarado sem precipitações nas últimas 24 hs.



UFOP

LAUDO FÍSICO-QUÍMICO & MICROBIOLÓGICO



Data da coleta	CÓD	Ponto de Coleta	Contagem E. Coli (NPM/100 ml)	Contagem Coliformes Totais (NPM/100 ml)	DQO (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Cond. Elétrica microsenmes/cm
21/08/2019	P1	Rio Itabirito	> 2419,6	> 2419,6	0	7,62	5,26	1	0,4	9,43	19,1	90
21/08/2019	P2	Ribeirão Carioca	>2419,6	>2419,6	35	6,77	3,8	1	0,4	8,77	18,5	18,86
21/08/2019	P3	Rio Itabirito	> 2419,6	> 2419,6	5	7,81	6,62	1	0,4	9,35	19	83,1
21/08/2019	P4	Córrego do Bação	> 2419,6	> 2419,6	35	6,95	14,3	0,2	0,8	8,55	18,8	21,88
21/08/2019	P5	Córrego Criminoso	> 2419,6	> 2419,6	140	7,03	55,4	1	24	3	21,1	313
21/08/2019	P6	Rio Itabirito	>2419,6	>2419,6	45	7,11	17	1,2	6,8	6,65	19,7	159,8
21/08/2019	P7	Córrego Carioca	>2419,6	>2419,6	160	6,98	23,4	0,7	5,8	6,65	19,9	86,9
21/08/2019	P8	Rio Itabirito	>2419,6	>2419,6	40	7,24	9,52	1	3,6	7,78	19,1	94
21/08/2019	P9	Rio Itabirito	>2419,6	>2419,6	80	7,19	17	1,6	3,8	7,04	19,6	96,6
21/08/2019	P10	Rio Itabirito	> 2419,6	> 2419,6	25	7,24	10,6	1,4	10,3	7,09	19,8	117,5

(*) Confluência córrego do Bação, não foi possível coletar devido dificuldades e risco de acesso.

Condições metereológicas: ensolarado sem precipitações nas últimas 24 hs

APÊNDICE D

 UFOP							FICHA DE COLETA DE CAMPO		 saae Transformando vidas	
DATA	PONTO DE COLETA	HORA	OD (mg/L)	Cond. Elétrica microsenmes/cm ⁻²	c°	pH				

APÊNDICE E

Ponto de Coleta	OD inicial (mg/L)	OD₁ (mg/L)	OD₃ (mg/L)	OD₅ (mg/L)	OD₇ (mg/L)
P1- Rio Itabirito	7,98	7,98	7,95	7,94	7,83
P2-Ribeirão Carioca	8,12	7,98	7,36	7,36	6,58
P3-Rio Itabirito	7,60	7,35	7,30	7,28	7,02
P4-Córrego do Bação	7,85	7,65	7,44	6,76	6,51
P5-Córrego Criminoso	4,53	4,50	1,78	1,63	1,20
P6-Rio Itabirito	6,64	5,21	5,00	4,33	3,13
P7-Córrego Carioca	6,68	5,90	4,35	2,11	1,25
P8-Rio Itabirito	7,07	5,19	5,00	4,06	2,86
P9-Itabirito Montante ETE	7,46	6,33	2,44	1,86	1,52
P10-Itabirito Montante ETE	7,30	4,33	4,10	3,01	1,75

Ponto de Coleta	OD 9 (mg/L)	OD 11 (mg/L)	OD 13 (mg/L)	OD 15 (mg/L)	OD 17 (mg/L)	OD19 (mg/L)	OD 20 (mg/L)
P1-Rio Itabirito	7,82	7,81	7,81	7,80	7,80	7,75	7,72
P2-Ribeirão Carioca	6,29	6,25	6,19	5,56	5,29	5,20	5,00
P3-Rio Itabirito	6,59	6,31	5,99	5,23	5,19	4,95	4,88
P4-Córrego do Bação	6,21	5,76	5,62	5,14	5,09	4,44	4,12
P5-Córrego Criminoso	1,19	1,06	1,06	1,00	0,98	0,92	0,70
P6-Rio Itabirito	1,64	1,06	1,02	1,00	0,97	0,67	0,50
P7-Córrego Carioca	1,15	1,10	1,00	0,98	0,98	0,75	0,65
P8-Rio Itabirito	1,21	1,25	1,67	1,10	1,75	1,23	0,76
P9-Itabirito Montante ETE	1,22	3,12	1,57	1,10	0,98	1,48	1,00
P10-Itabirito Jusante	0,75	1,54	1,05	0,99	0,86	0,96	0,76

Ponto de Coleta	OD inicial (mg/L)	OD 1 (mg/L)	OD 3 (mg/L)	OD 5 (mg/L)	OD 7 (mg/L)	OD9 (mg/L)
P1- Rio Itabirito	8,76	7,25	7,20	6,46	6,09	5,98
P2-Ribeirão Carioca	8,27	7,71	7,47	6,82	7,59	7,41
P3-Rio Itabirito	8,71	7,85	7,19	6,91	6,43	6,36
P4-Córrego do Bação	8,26	7,70	7,67	7,57	7,39	7,28

P5-Córrego Criminoso	8,09	7,18	7,01	6,38	5,91	5,88
P6-Rio Itabirito	7,84	7,10	6,93	6,66	6,32	6,05
P7-Córrego Carioca	8,13	7,71	7,62	7,50	7,15	7,00
P8-Rio Itabirito	8,01	7,50	6,98	6,21	5,13	5,08
P9-Itabirito Montante ETE	8,12	7,80	7,77	7,38	7,13	7,08
P10-Itabirito Montante ETE	7,95	7,25	6,43	5,92	4,93	4,61

Ponto de Coleta	OD₁₁ (mg/L)	OD₁₃ (mg/L)	OD₁₅ (mg/L)	OD₁₇ (mg/L)	OD₁₉ (mg/L)	OD₂₀ (mg/L)
P1- Rio Itabirito	5,87	5,63	5,34	4,89	4,48	4,43
P2-Ribeirão Carioca	7,18	7,00	6,98	6,73	6,64	6,60
P3-Rio Itabirito	6,03	5,98	5,84	5,70	5,37	5,30
P4-Córrego do Bação	7,05	6,94	6,73	6,48	6,38	6,32
P5-Córrego Criminoso	5,51	5,39	4,23	4,00	3,67	3,60
P6-Rio Itabirito	5,88	5,53	4,85	4,60	4,24	4,00
P7-Córrego Carioca	6,87	6,75	6,42	6,25	6,00	5,95
P8-Rio Itabirito	4,50	4,45	4,08	3,48	3,38	3,33
P9-Itabirito Montante ETE	6,80	6,70	6,24	5,93	5,54	5,49
P10-Itabirito Montante ETE	4,10	4,09	3,80	3,23	3,05	2,98