

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA
DEPARTAMENTO BÁSICO – ENGENHARIA AMBIENTAL

DIMONA DOS SANTOS CORRÊA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA À QUALIDADE DE ÁGUAS: UM
ESTUDO DE CASO DO RIO PARAÍBA DO SUL

Lorena – SP

2020

DIMONA DOS SANTOS CORRÊA

**MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA À QUALIDADE DE ÁGUAS: UM
ESTUDO DE CASO DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de Lorena
da Universidade de São Paulo como pré-
requisito obrigatório para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Adriano Francisco Siqueira

Lorena – SP

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Correa, Dimona dos Santos
Modelagem matemática aplicada á qualidade de
água: um estudo de caso do paraíba do sul / Dimona
dos Santos Correa; orientador Adriano Francisco
Siqueira. - Lorena, 2020.
54 p.

Monografia apresentada como requisito parcial
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia
Ambiental - Escola de Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo. 2020

1. Qualidade da água. 2. Recursos hídricos. 3. Rio
paraíba do sul. 4. Autodepuração. I. Título. II.
Siqueira, Adriano Francisco , orient.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus. Que proporcionou os dons e talentos para realizar a faculdade, e me deu coragem e força para perseverar na busca de um sonho.

Agradeço ao meu orientador Adriano Francisco Siqueira por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, pelas sugestões, conselhos, disponibilidade, além de que, por ter despertado em mim o amor a área de modelagem aplicada a recursos hídricos, durante a disciplina da graduação.

À todos os demais professores do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual de São Paulo – campus Lorena, pela qualidade técnica de cada um, que colaboraram na quase formação de uma Engenheira Ambiental.

Aos meus pais José Corrêa e Dominá dos Santos Corrêa que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Aos meus irmãos e família, em especial ao meu avô que é meu exemplo de força e determinação, e que me ajudou a começar a faculdade.

Por fim, a todos aqueles que passaram pela minha vida nesta etapa.

RESUMO

CORRÊA, D.S... Modelagem matemática aplicada à qualidade de águas: um estudo de caso do Rio Paraíba do Sul. – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

Em busca do desenvolvimento econômico, a sociedade brasileira enfrenta problemas na gestão dos recursos hídricos, afetando a qualidade das águas. Para ajudar na determinação e mitigação desses impactos ambientais no sistema hídrico, tem-se o uso de modelos matemáticos, uma ferramenta importante para quantificar a capacidade de autodepuração de um corpo hídrico. Este estudo contempla os conhecimentos necessários para o desenvolvimento de um modelo de simulação de qualidade de água – *Streeter Phelps*, e apresenta essa metodologia aplicada no Rio Paraíba do Sul (RPS), no trecho entre as cidades de Aparecida e Cachoeira Paulista. Foram utilizados dois parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e comparando-os com os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011. O modelo foi desenvolvido no aplicativo *Microsoft Excel*, que se utilizou dos dados de monitoramento realizado em 2017, e aplicados cenários. Uma das vantagens da modelagem aplicada, ela pode ser facilmente adaptada a outros trechos de bacias hidrográficas com característica semelhantes ao contexto analisado, permitindo avaliar o corpo hídrico completo e não apenas pontos de monitoramento. Em síntese, verificou-se que praticamente todo o trecho analisado não está em conformidade com os padrões estabelecidos pela resolução CONAMA nº 430/2011, e que o principal agente causador é o descarte de efluentes domésticos.

Palavras-chaves: Qualidade da água. Recursos Hídricos. Rio Paraíba do Sul. Autodepuração.

ABSTRACT

CORRÊA, D.S ... Mathematical modeling applied to water quality: a case study of the Paraíba do Sul River. - School of Engineering of Lorena, University of São Paulo, Lorena, 2020.

In search of economic development, Brazilian society faces problems in the management of water resources, affecting water quality. To help determine and mitigate these environmental impacts on the water system, we have the use of mathematical models, an important tool to quantify the self-purification capacity of a water body. This study includes the knowledge necessary for the development of a water quality simulation model - Streeter Phelps, and presents this methodology applied in the Paraíba do Sul River, in the stretch between the cities of Aparecida and Cachoeira Paulista. Two parameters OD and DBO were used and comparing them with the parameters established by CONAMA Resolution nº 430/2011. The model was developed in the Microsoft Excel application, which used the monitoring data carried out in 2017, and scenarios were applied. One of the advantages of applied modeling, it can be easily adapted to other stretches of hydrographic basins with characteristics similar to the analyzed context, allowing to evaluate the complete water body and not just monitoring points. In summary, it was found that practically the entire section analyzed is not in compliance with the standards established by CONAMA Resolution nº 430/2011, and that the main causative agent is the disposal of domestic effluents.

Keywords: Water quality. Water resources. Paraíba do Sul River. Self-cleaning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma de caracterização físico-química e biológica de águas	21
Figura 2 - Parâmetros de qualidade da água	24
Figura 3 - Mapa da área de estudo de caso: Bacia do Rio Paraíba do Sul	35
Figura 4 - Perfis do IQA na região paulista do Paraíba do Sul.....	36
Figura 5 - Trecho do rio e Pontos geográficos de coletas de amostras empregadas na quantificação de OD e DBO desenvolvidos por Queiroz, Silva e Paiva (2017)	38
Figura 6 - Esquema linear para modelagem do estudo de caso	39
Figura 7 - Entrada de dados da planilha do modelo.....	40
Figura 8 - Valores de DBO e OD ao longo do trecho	41
Figura 9 – Valores de DBO e OD aumento de CO cidade de Aparecida.....	43
Figura 10 – Valores de DBO e OD período de seca	44
Figura 11 – Valores de DBO e OD com seca e aumento de CO.	45
Figura 12 – Valores de DBO e OD para cheia.....	47
Figura 13 – Intervalo de Confiança parâmetro DBO.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do IQA	26
Tabela 2 - Valores $k_d(20^\circ\text{C})$	27
Tabela 3 - Valores $k_a(20^\circ\text{C})$	28
Tabela 4 - Porcentagem da população atendida pela coleta e pelo tratamento de esgotos	39
Tabela 5 – dados de OD e DBO de estudos do trecho	48

LISTA DE SIGLAS

OD - Oxigênio Dissolvido

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

CBH- Comitê de Bacia Hidrográfica

UGRHI - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

IQA – Índice de Qualidade de Água

RPS - Rio Paraíba do Sul.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	QUALIDADE DA ÁGUA.....	20
2.1.1	Parâmetros de qualidade das águas.....	20
2.1.2	Parâmetros físicos e físico-químicos	21
2.1.3	Oxigênio dissolvido.....	21
2.1.4	Demanda bioquímica de oxigênio	22
2.2	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	23
2.2.1	Enquadramentos dos corpos d'água no Brasil.....	24
2.2.2	Índice de qualidade das águas - IQA	25
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA	26
2.3.1	Coeficiente de desoxigenação k_d	27
2.3.2	Coeficiente de aeração k_a	27
2.3.3	Vazão dos efluentes.....	28
2.3.4	Velocidade do curso d'água (v).....	29
2.3.5	Calibração de modelos de qualidade de água.....	29
2.3.6	Método de <i>Streeter-Phelps</i> modificado.....	30
3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
4.	OBJETIVOS.....	33
5.	ESTUDO DE CASO: RIO PARAÍBA DO SUL ENTRE APARECIDA E CACHOEIRA PAULISTA	34
5.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
5.2	HISTÓRICO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO TRECHO DE ESTUDO	35
5.3	COLETA DE DADOS	37
5.4	METODOLOGIA	39
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6.1	CENÁRIOS.....	42
6.1.1	Aumento de carga orgânica na cidade de Aparecida.....	42
6.1.2	Estiagem.....	44
6.1.3	Estiagem com aumento populacional	45
6.1.4	Cheia	46

6.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	47
7.	CONCLUSÕES	51
8.	PERSPECTIVAS FUTURAS	52
9.	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

Água é fonte da vida e todos os seres vivos, indistintamente, dependem dela para viver. No entanto, por maior que seja sua importância, as pessoas continuam poluindo os rios e suas nascentes, esquecendo o quanto ela é essencial para a permanência da vida no Planeta. A água é, provavelmente, o único recurso natural que tem a ver com todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial aos valores culturais e religiosos arraigados na sociedade. É um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies vegetais e animais, como elemento representativo de valores sociais e culturais e até como fator de produção de vários bens de consumo final e intermediário (GOMES, 2011).

Apesar da abundância de água, observada no Brasil, a disponibilidade e qualidade da água é restrita e as fontes tem sofrido impacto com as atividades humanas. Dessa forma, o ambiente não tem tido tempo de recuperar-se dessas ações. Amplificando esses impactos há uma dificuldade na relação entre o meio acadêmico e política, agravando o tempo das soluções dos impactos ambientais.

Sendo os recursos hídricos os recursos naturais de maior importância e indispensáveis para a sobrevivência dos seres vivos, há a ação exploratória e degradatória por parte da sociedade, a qual compromete a qualidade hídrica devido ao uso indiscriminado e pelo lançamento de esgotos residuais, de efluentes de indústrias, de agrotóxicos e rejeitos da agropecuária, além de poluentes de outras atividades humanas. Dessa maneira, direta ou indiretamente, ocorre a promoção de alterações na estrutura e funcionamento dos sistemas hídricos (SILVA, 2017).

Para avaliar os impactos do lançamento de cargas poluidoras ao longo dos rios, bem como analisar cenários de intervenção e medidas de controles ambientais, a modelagem matemática vem sendo utilizada como ferramenta de prognóstico de condições ambientais da qualidade dos corpos d'água. Ela considera determinadas condições para os efluentes lançados e para os corpos receptores destes efluentes, visando a garantia e manutenção dos usos preponderantes da água. A modelagem matemática da qualidade de água serve como ferramenta no planejamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica (TREVISAN, 2011). Nesse contexto, este trabalho irá aplicar uma modelagem matemática para avaliar a qualidade da agua ao longo de um trecho do rio Paraíba do Sul, gerando entendimento sobre os cenários ambientais dessa bacia hidrográfica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem sobre os recursos hídricos. De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função das condições naturais combinadas ao uso e a ocupação do solo na bacia hidrográfica (SPERLING, 2007).

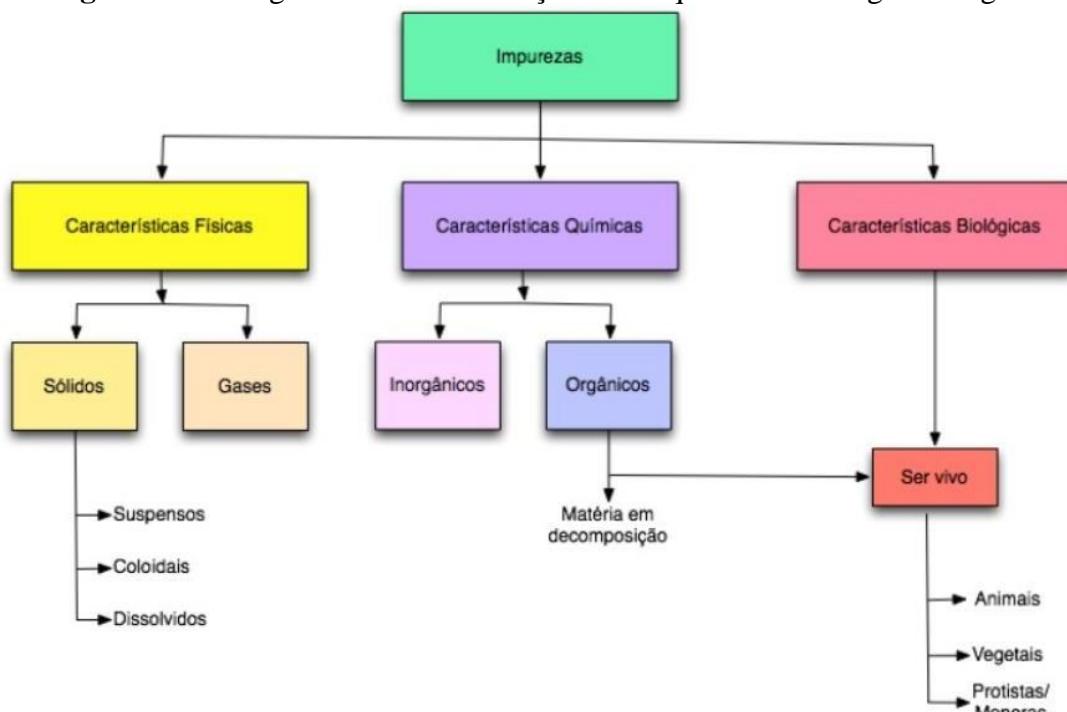
Ao se abordar a questão da qualidade da água, é fundamental ter em mente que o meio líquido apresente duas características marcantes, que condicionam, de maneira absoluta, a conformação desta qualidade: capacidade de dissolução e capacidade de transporte. Constata-se, assim, que a água, além de ser formada pelos elementos hidrogênio e oxigênio na proporção de dois para um, também pode dissolver uma ampla variedade de substâncias, as quais conferem à água suas características peculiares. Além disso, as substâncias dissolvidas e as partículas presentes no seio da massa líquida são transportadas pelos cursos d'água, mudando continuamente de posição e estabelecendo um caráter fortemente dinâmico para a questão da qualidade da água (MINISTÉRIO SAUDE, 2014).

As formas de contaminação advêm de diversas fontes, comportando-se de forma concentrada, como os fatores de interferência do homem, despejos industriais e domésticos, ou atuando de forma difusa, como ocorre no caso de uso de defensivos agrícolas. Nas condições naturais, independente de uma área preservada ou não, a qualidade da água é afetada pelo escoamento superficial e pela infiltração no solo. Essas inter-relações atuam na qualidade da água e por isso a utilização de uma bacia hidrográfica como instrumento para monitoramento e controle.

2.1.1 Parâmetros de qualidade das águas

Os diversos componentes presentes na água, e que alteram o seu grau de pureza, podem ser retratados, de uma maneira ampla e simplificada, em termos das suas características físicas, químicas e biológicas. Estas características podem ser traduzidas na forma de parâmetros de qualidade da água (SPERLING, 2007), conforme sumarizado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de caracterização físico-química e biológica de águas



Fonte: SPERLING (2005)

2.1.2 Parâmetros físicos e físico-químicos

Há uma variedade de substâncias químicas e condições físicas características da água, como nitrogênio, fósforo, temperatura, pH, micro poluentes inorgânicos, micro poluentes orgânicos. Neste estudo há um direcionamento de estudo para os parâmetros de OD (Oxigênio Dissolvido) e matéria orgânica. Para avaliar a matéria orgânica existem dois parâmetros tradicionalmente mais utilizados, a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), e para o desenvolvimento deste trabalho será utilizado dados de DBO reportados na literatura.

Destes parâmetros mencionados, os parâmetros de OD e DBO são amplamente utilizados como indicadores de poluição e de qualidade da água em trabalhos de saneamento e em pesquisas ambientais, além de permitirem quantificar e analisar o grau de degradação de um determinado curso d'água (DUTRA, 2014).

2.1.3 Oxigênio dissolvido

O oxigênio é um dos parâmetros mais significantes para expressar a qualidade de um ambiente aquático. Suas variações estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água (FUNASA, 2014).

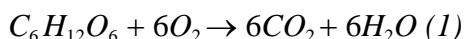
OD refere-se como bolhas microscópicas de oxigênio gasoso difundem na água e estão disponíveis para a respiração de organismos aquáticos, sendo limitante e crucial para a sobrevivência de alguns organismos em faixas de concentração adequadas. Alguns organismos aquáticos podem apenas viver adequadamente dentro de uma determinada faixa de concentrações de OD. Embora alta concentrações de OD possam ser prejudiciais, essa faixa superior raramente é alcançada. Baixa concentrações OD são mais comuns. De acordo com a Resolução CONAMA 357/05 o valor mínimo de OD é 5,0 mg/L para preservação da vida aquática, mas varia de acordo com as espécies de peixes, alguns sendo mais tolerantes a valores menores. De forma geral valores abaixo de 2mg/ L de OD não são recomendáveis.

O principal fator de diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido nos corpos de água é a deposição de esgotos domésticos ou industriais com altos teores de matéria orgânica. A sua medição é simples, e o seu teor pode ser expresso em concentrações, quantificáveis e passíveis de modelagem matemática (TREVISAN, 2011; SPERLING, 1997).

2.1.4 Demanda bioquímica de oxigênio

Esse parâmetro é definido como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Os maiores aumentos em termos de DBO, num corpo d'água, são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica. A presença de um alto teor de matéria orgânica pode induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática. (CETESB, 2014).

Equação da conversão aeróbia da matéria orgânica através da oxidação é apresentada a seguir, onde percebe-se o consumo de oxigênio por organismos de anaerobiose e esgotamento para outros organismos aquáticos dependentes de respiração.



Portanto, a DBO retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea (SPERLING, 1997).

2.2 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

As pesquisas de modelagem de qualidade de água são realizadas para acompanhara conformidade dos leitos hídricos em relação a legislação ambiental. No Brasil o início da gestão dos recursos hídricos foi em 1934 com o “Código das Águas”, visando a agricultura que era a prioridade da época.

Acompanhando sempre a economia e o setor dominante do momento, nos anos 50 a Política de Recursos Hídricos englobou o setor elétrico, com o departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, com o foco no crescimento industrial.

Na década de 70, internacionalmente começa a reformas e modernizações da gestão dos recursos hídricos. Em 1981, foi sancionada a Lei de 6.938, a Política Nacional do Meio Ambiente, que tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propiciando à vida, compatibilizando o desenvolvimento econômico e social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico (BRASIL, 1981). Com a PNMA foi constituído o Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA, tendo como órgão consultivo e deliberativo o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (SANTOS & ATHAYDE, 2008).

A Lei federal nº 9.433/97 tem os princípios, dentro destes ressalta a Bacia Hidrográfica com unidade de planejamento e define cinco instrumentos para gestão de uso da d'água:

- i. Plano de Recursos Hídricos;
- ii. Enquadramento dos corpos d'água em classes de uso;
- iii. Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos;
- iv. Cobrança pelo uso da água;
- v. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Com a Lei n.º 9.433/97 há a criação dos comitês de Bacias Hidrográficas compete aos Comitês de Bacia Hidrográfica, aprovar e acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia, sugerir as providências necessárias ao cumprimento de suas metas, estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados (BRASIL, 1997).

O Plano de Recursos Hídricos é um diagnóstico que combina o real, à vontade e o possível, permitindo estabelecer um conjunto de objetivos e ações presente e futuro, participativo, conciliando interesses da sociedade com a melhor gestão dos recursos hídricos e está relacionado ao enquadramento de corpos d'água (ANA, 2015).

No âmbito estadual temos a Lei 7.663/91 do estado São Paulo. Mas como o rio Paraíba do Sul tem trechos no estado de Minas Gerais e Rio de Janeiro além do estado de São Paulo, o responsável pelo controle do despejo de efluentes sempre é a montante do Rio. Logo exige uma colaboração de estados e gera um maior conflito de gestão.

2.2.1 Enquadramentos dos corpos d'água no Brasil

De acordo com a Resolução CONAMA 357, o enquadramento de um corpo hídrico é devido ao seu uso pretendido e finalidade, que deve ser alcançado ou mantido.

Para cada atividade a ser exercida, existe um requisito de qualidade, alguns mais exigentes, pode-se citar abastecimento doméstico, outros não tanto exigentes como a navegação. Além das condições do corpo d'água atual, também considera as prioridades uso da água, assim divide-se em classes de enquadramento dos corpos d'água.

A seguir, na Figura 2, estão apresentados os parâmetros de qualidade da água de acordo com a resolução CONAMA nº357/2005.

Figura 2 - Parâmetros de qualidade da água

PARÂMETROS	Unidade	CLASSE				
		Especial	1	2	3	
Oxigênio Dissolvido	mg/L	Devem ser mantidas as condições naturais do corpo de água.	> 6	> 5	> 4	> 2
Demandas Bioquímica de Oxigênio	mg/L		≤3	≤5	≤10	-
Turbidez	UNT		≤40	≤100	≤100	-
pH	-		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9

Fonte: BRASIL (2013)

Além da classificação dos corpos de água, a resolução Nº 357/05 estabelece padrões de lançamento de efluentes, atribuindo aos empreendedores a

responsabilidade de estudos para o lançamento de efluentes, em um determinado corpo de água e é regulamento no artigo 33:

“A extensão e as concentrações de substâncias na zona de mistura deverão ser objeto de estudo, nos termos determinados pelo órgão ambiental competente, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento” (CONAMA,2011).

2.2.2 Índice de qualidade das águas - IQA

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB é um órgão do governo estadual responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento das atividades poluidoras, tendo como preocupação básica a preservação e recuperação da qualidade da água, do ar e do solo.

Desde 1975, a CETESB utiliza o Índice de Qualidade da Água-IQA como informação básica sobre a qualidade da água pública e a gestão ambiental de 22 unidades de gestão de recursos hídricos do Estado de São Paulo.

Segundo estudo realizado pela Fundação Nacional de Saneamento dos Estados Unidos em 1970, a CETESB revisou e formulou o IQA-Índice de Qualidade da Água, que incorpora nove variáveis consideradas relevantes para a avaliação da qualidade da água e a utiliza como principal determinante para abastecimento público.

Para calcular o parâmetro de IQA, foram estabelecidas curvas de variação da qualidade das águas de acordo com o estado ou a condição de cada parâmetro. Estas curvas de variação, sintetizadas em um conjunto de curvas médias para cada parâmetro, bem como seu peso relativo correspondente.

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 na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do IQA

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	$79 < \text{IQA} \leq 100$
BOA	$51 < \text{IQA} \leq 79$
REGULAR	$36 < \text{IQA} \leq 51$
RUIM	$19 < \text{IQA} \leq 36$
PÉSSIMA	$\text{IQA} \leq 19$

Fonte: (CETESB (2020)

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA

Um modelo simples de modelagem de qualidade da água é utilizar os parâmetros de oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

O principal objetivo da modelagem desses parâmetros é determinar a concentração máxima permitível de lançamento de matéria orgânica, de modo a não ultrapassar o limite do potencial de autodepuração do corpo receptor (COX, 2003).

No ano de 1925, os engenheiros americanos Streeter e Phelps apresentaram um modelo simplificado do processo de autodepuração de um curso hídrico poluído, levando em consideração o processo de reaeração atmosférica. Dentre os modelos básicos de qualidade da água testados e citados na literatura, a equação de *Streeter-Phelps* é a mais popular, em virtude de sua simples aplicação (FAN et al.; 2012). Esse modelo adota o decaimento de primeira ordem para a DBO, conforme dado pela Equação 2.

$$L = L_0 e^{-k_d t} \quad (2)$$

Onde:

- L: concentração de DBO;
- L_0 : concentração de DBO inicial;
- k_d : taxa de decaimento da DBO; e
- t: tempo.

O equacionamento do OD, por sua vez, envolve o déficit de OD na água, de acordo com a Equação 3:

$$D = OD_{sat} - OD \quad (3)$$

Onde:

- D: déficit de OD;
- OD_{sat} : concentração de saturação de OD; e
- OD: concentração de OD.

O déficit de OD passado um intervalo de tempo é expressado pela Equação 4.

$$D = \frac{k_d L_0}{k_a - k_d} (e^{k_d t} - e^{-k_a t}) + D_0 e^{-k_a t} \quad (4)$$

Onde:

- k_a : taxa de aeração; e
- D_0 : déficit inicial de OD.
- k_d : taxa de decaimento da DBO

2.3.1 Coeficiente de desoxigenação k_d

Segundo Hespanhol (2009) o coeficiente depende da temperatura e da presença de substâncias inibidoras, bem como das características da matéria orgânica. Esses valores se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores k_d (20°C)

Origem	$K_1 (dia^{-1})$
Água resíduária concentrada	0,35 – 0,45
Água resíduária de baixa concentração	0,30 – 0,40
Efluente primário	0,30 – 0,40
Efluente secundário	0,12 – 0,24
Rios com águas limpas	0,09 – 0,21
Água para abastecimento público	<0,12

Fonte: SPERLING (2005)

2.3.2 Coeficiente de aeração k_a

Esse coeficiente, de acordo com Sperling (2009) é obtido utilizando fórmulas baseadas nas características hidráulicas do corpo hídrico, relacionando o coeficiente de desoxigenação com a profundidade e a velocidade do curso d'água ou através de valores médios tabelados, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores k_a (20°C)

Corpo d'água	$K_2(dia^{-1})$	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixas velocidades	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Corredeiras e quedas d'água	0,69	1,15
Água para abastecimento público	>1,15	>1,61

Fonte: SPERLING (2005)

2.3.3 Vazão dos efluentes

De acordo com a Cetesb (2018), para obter a DBO, são utilizadas equações, para isso precisa ter quantidade de tratamento de efluente gerado da respectiva cidade para ser calculado a vazão, depois a carga orgâica obtida e assim ter a concentração de DBO. Abaixo se encontra as respectivas fórmulas utilizadas para efetuar o calculo de cada cidade no trecho do RPS.

Consumo per capita de água: 200 L/hab. x dia

Contribuição per capita de carga orgâica: 0,054 kg DBO/hab. x dia

Coeficiente de retorno: 0,80

• Vazão (Q)

Vazão Efluentes Q (L/d) = Pop (hab) x Cons. per capita água (L/habxd) x coef. Retorno

• Carga Orgânica (CO)

Carga Orgânica Potencial CO (kg/d) = Pop (hab) x Contr. per capita CO (kg/habxd)

• Concentração de DBO

$$DBO(kg / m^3) = \frac{\text{Carga Orgânica (kg/d)}}{\text{Vazão Efluente (m}^3 / d)}$$

$$DBO(mg / L) = DBO(kg / m^3) \times 1000$$

2.3.4 Velocidade do curso d'água

De acordo com Sperling (2009), a velocidade do corpo hidráulico pode ser estimada medindo diretamente ou usando a fórmula hidráulica do canal, conforme mostrado na fórmula 05. Onde é necessário obter a vazão de água e as dimensões do canal.

Equação 1 – Velocidade do curso d'água

$$U = \frac{Q}{(w.h)} \quad (5)$$

Onde:

- Q = vazão do rio (m^3/s);
- U = velocidade do curso d'água (m/s);
- w = largura do canal (m);
- h = profundidade do canal (m).

2.3.5 Calibração de modelos de qualidade de água

A calibração trata-se da variação dos parâmetros do modelo de qualidade da água de maneira a se obter uma concordância aceitável entre os dados calculados e medidos em campo (SPERLING, 2007).

Existem dois processos de calibração, o manual e o automatizado. O mais aplicado tem-se o nome de tentativa e erro, onde os parâmetros são ajustados manualmente até se obter um valor aceitável entre os dados calculados e observados, considerando, assim, que o modelo está calibrado (ANDERSON & WOESSNER, 1992; BONGANHA, 2007). Já a calibração automatizada é realizada por um método de otimização através de algoritmos para convergir ao menor valor possível da soma dos quadrados dos erros (SPERLING, 2007).

O cálculo do intervalo de confiança é um dos principais objetivos da análise estatística. De acordo com uma interpretação comum, o intervalo de confiança de um determinado parâmetro populacional mostra a faixa de valores do parâmetro real da população compatível com os dados da amostra e tem um certo grau de confiança, independentemente de o parâmetro ser o valor médio da distribuição dada, risco relativo, razão de chances, variância, etc. Ou seja, o intervalo de confiança de 95% de um parâmetro populacional fornece um intervalo, em que tem-se 95% de confiança, para cobrir o valor verdadeiro do parâmetro.

Uma das medidas de dispersão relevantes é a variância. É a média aritmética dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média: proporcionando uma mensuração da dispersão dos dados em torno da média.

Equação 2 - Formula de variância amostral

$$s^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1} \text{ (amostra)} \quad (6)$$

Se os dados se referem a uma POPULAÇÃO usa-se n no denominador da expressão. A unidade da variância é o quadrado da unidade dos dados (sendo assim o quadrado da unidade da média) ocasionando dificuldades para avaliar a dispersão.

2.3.6 Método de Streeter-Phelps modificado

Para os trechos de rio foram utilizadas as Equações 1 a 3 propostas por Streeter-Phelps (1925), em que as concentrações de DBO e OD ao longo do rio foram calculadas a partir de uma concentração inicial e características do sistema envolvido no cenário proposto. Substituindo o tempo pela razão entre a distância do trecho do rio percorrido pela água e a velocidade média do rio, tem-se as Equações 7 e 8:

$$L = L_0 e^{\frac{k_d}{U}x} \quad (7)$$

$$D = D_o e^{\frac{k_d}{U}x} + \frac{k_d L_o}{k_a - k_d} (e^{\frac{k_d}{U}x} - e^{\frac{k_a}{U}x}) \quad (8)$$

Onde:

- L: concentração de DBO à distância x do ponto inicial;
- L_0 : concentração de DBO inicial;
- D: déficit de OD à uma distância x do ponto inicial;
- D_o : déficit inicial de OD;
- k_d : constante de decaimento da DBO;
- k_a : constante de aeração;
- U: velocidade média do rio; e
- x: distância do ponto inicial.

Para a modelagem após confluências, rio principal com o afluente ou descargas pontuais de matéria orgânica foram utilizadas as Equações 9, 10 e 11.

$$Le = \left(\frac{Q_1 L_1 + Q_2 L_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (9)$$

$$De = \left(\frac{Q_1 D_1 + Q_2 D_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (10)$$

$$Q_e = Q_1 + Q_2 \quad (11)$$

Onde:

- Le: concentração de DBO no ponto de encontro;
- De: déficit de OD no ponto de encontro;
- Qe: vazão no ponto de encontro.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade da água, depende de relações entre meio físico, químico e biológico. Para facilitar a compreensão desse extenso tema, foram adotadas medidas, a bacia hidrográfica sendo como base.

Por possuir constituintes na água, temos parâmetros para categorizar a qualidade da água, como por exemplo o oxigênio dissolvido e a demanda bioquímica de oxigênio. Através desses dois parâmetros pode-se desenvolver os modelos matemáticos para analisar a taxa de autodepuração de um corpo hídrico, visto que a legislação brasileira tem padrões estabelecidos. Um exemplo de modelo é o *Streeter-Phelps*.

Para Sales et al. (2014) declara que o modelo foi desenvolvido com o objetivo de simular o balanço de massa entre DBO e OD, ou seja, considera a degradação das substâncias orgânicas dissolvidas, degradadas por processos de fornecimento de reareação física para o balanço de OD, não é considerado as taxas de oxidação de amônia, absorção de algas, processo de desnitrificação e a produção fotossintética.

Depois de coletar os dados de entrada, inseridos no sistema de forma independente, para obter os dados reais, é necessário ajustar os dados processados, analisando o nível de confiabilidade dos resultados apresentados. Logo esse modelo propõe analisar os efeitos do despejo de efluente, para determinar o comportamento durante os processos autodepurativos.

4. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o Oxigênio Dissolvido (OD) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), com o modelo *Streeter-Phelps* em um trecho do Rio Paraíba do Sul.

Para atingir este objetivo foram propostas as seguintes etapas:

- a) Verificar o efeito de autodepuração do rio e calibrar uma modelagem matemática apropriada as alterações ao longo do trecho do Rio.
- b) Obter diferentes cenários e simulações (cheias e secas) para a modelagem matemática.
- c) Avaliar o impacto de eventos transientes, como por exemplo poluição accidental, eventos de chuva e períodos de estiagem.
- d) Identificar os principais pontos de lançamento de efluentes e propor medidas mitigadoras.

5. ESTUDO DE CASO: RIO PARAÍBA DO SUL ENTRE APARECIDA E CACHOEIRA PAULISTA

5.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

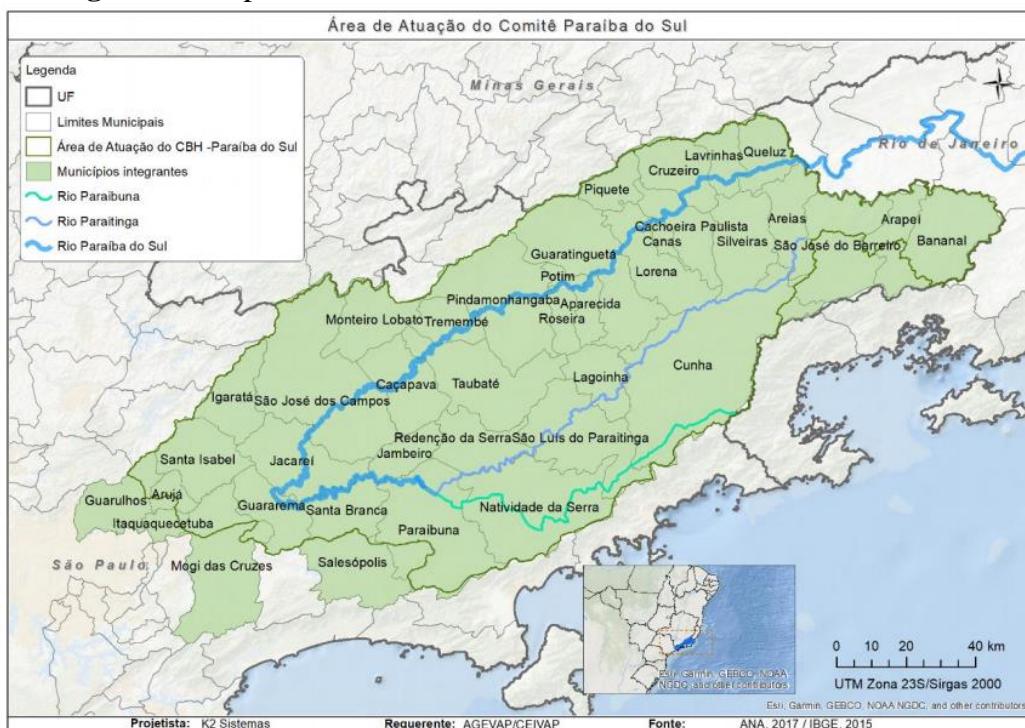
O RPS passa por três estados, São Paulo, Minas Gerais e se encontrando com o mar no estado do Rio de Janeiro. O Rio Paraíba do Sul, nasce com o nome de Paraitinga (“Águas Claras”) em Areias (SP) e passa a se chamar Paraíba do Sul após a confluência com o rio Paraibuna (“Águas Escuras”), que nasce também na Serra da Bocaina, em Cunha (SP). A confluência dos dois rios formadores ocorre próximo do município paulista de Paraibuna (AGEVAP – 2011).

Através de decretos foram definidos Comitês de Bacias Hidrográficas – CBH. O comitê responsável pela área de estudo é o CBH - Paraíba do Sul (trecho paulista) que coincide com a UGRHI 02 – Paraíba do Sul considerada pelo Plano de Recursos Hídricos do estado de São Paulo, na Figura 3, tem a bacia hidrográfica, abrangendo apenas o estado de São Paulo.

O rio se caracteriza como Classe 2 no trecho entre os municípios de Aparecida e Cachoeira Paulista e é utilizado nas atividades de abastecimento humano, diluição de efluentes, geração de energia e irrigação. A principal fonte de poluição do rio é devido a diluição de efluentes, que em certos pontos, apresentam a degradação em um grau preocupante.

A principal característica desta bacia é a existência do maior parque industrial da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Além disso, destaca-se o conjunto de usinas hidrelétricas e seus reservatórios, responsáveis pela regularização das águas do Rio Paraíba do Sul, que propiciam o controle de inundações e a derivação de parte de suas águas para o complexo hidrelétrico de Lajes (CEIVAP - 2019).

Figura 3 - Mapa da área de estudo de caso: Bacia do Rio Paraíba do Sul

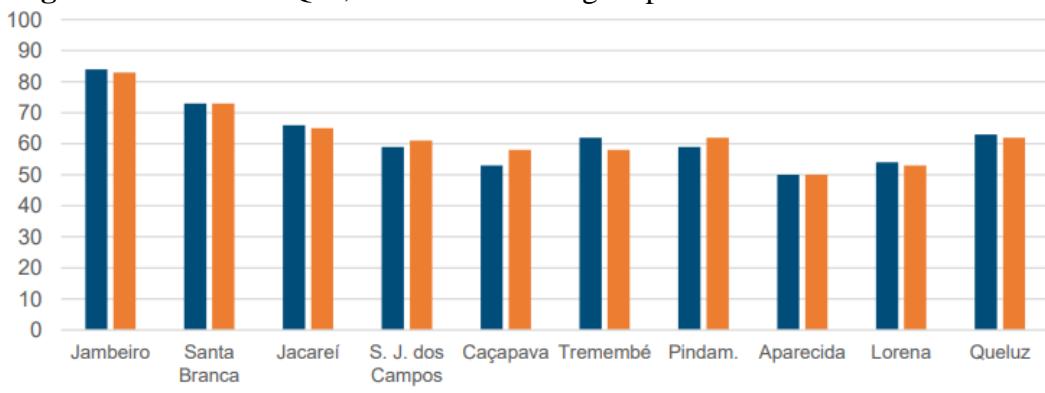


Fonte: ANA (2017)

5.2 HISTÓRICO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO TRECHO DE ESTUDO

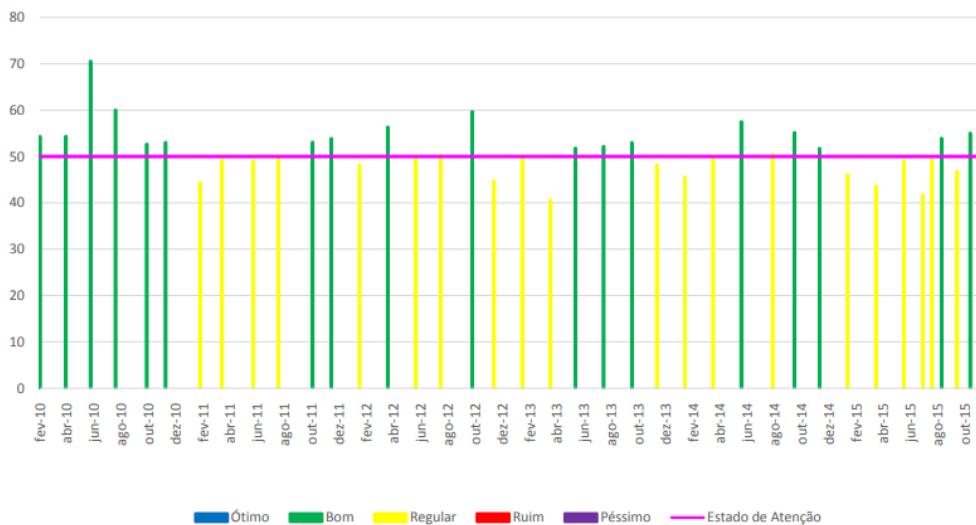
A CETESB monitora o trecho com pontos de monitoramento em PARB 02600 - Aparecida (na captação de Aparecida) e PARB 02700 - Lorena (Ponte na rodovia BR-459, no trecho que liga Lorena a Piquete) figura . Os dados referentes ao trecho paulista da Bacia do Rio Paraíba do Sul, foram disponibilizados pelo CETESB (2018), no chamado “Relatório de Qualidade das Águas Interiores de São Paulo”, não existe relatório consolidado dos dados de 2019. Percebe-se que no trecho a qualidade da água mostrou-se razoável. Os relatórios mais atuais não apresentam os pontos com valores de OD e DBO, e sim com dados do IQA.

De acordo com o relatório de situação da Bacia do Paraíba do Sul, realizado em 2018, identificaram dois trechos críticos, um entre São José dos Campos e Caçapava e outro em Aparecida, conforme mostrado na Figura 4. Têm altas concentrações de Coliformes Termotolerantes e Fósforo Total, indicando o lançamento de esgotos domésticos sem tratamento.

Figura 4 - Perfis do IQA , DBO e OD na região paulista do Paraíba do Sul

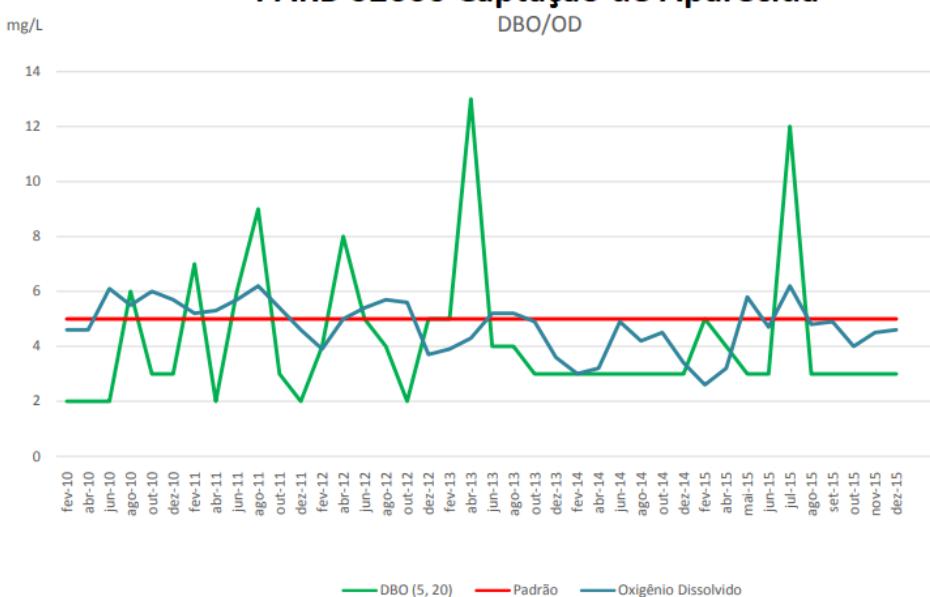
PARB 02600 Captação de Aparecida - IQA

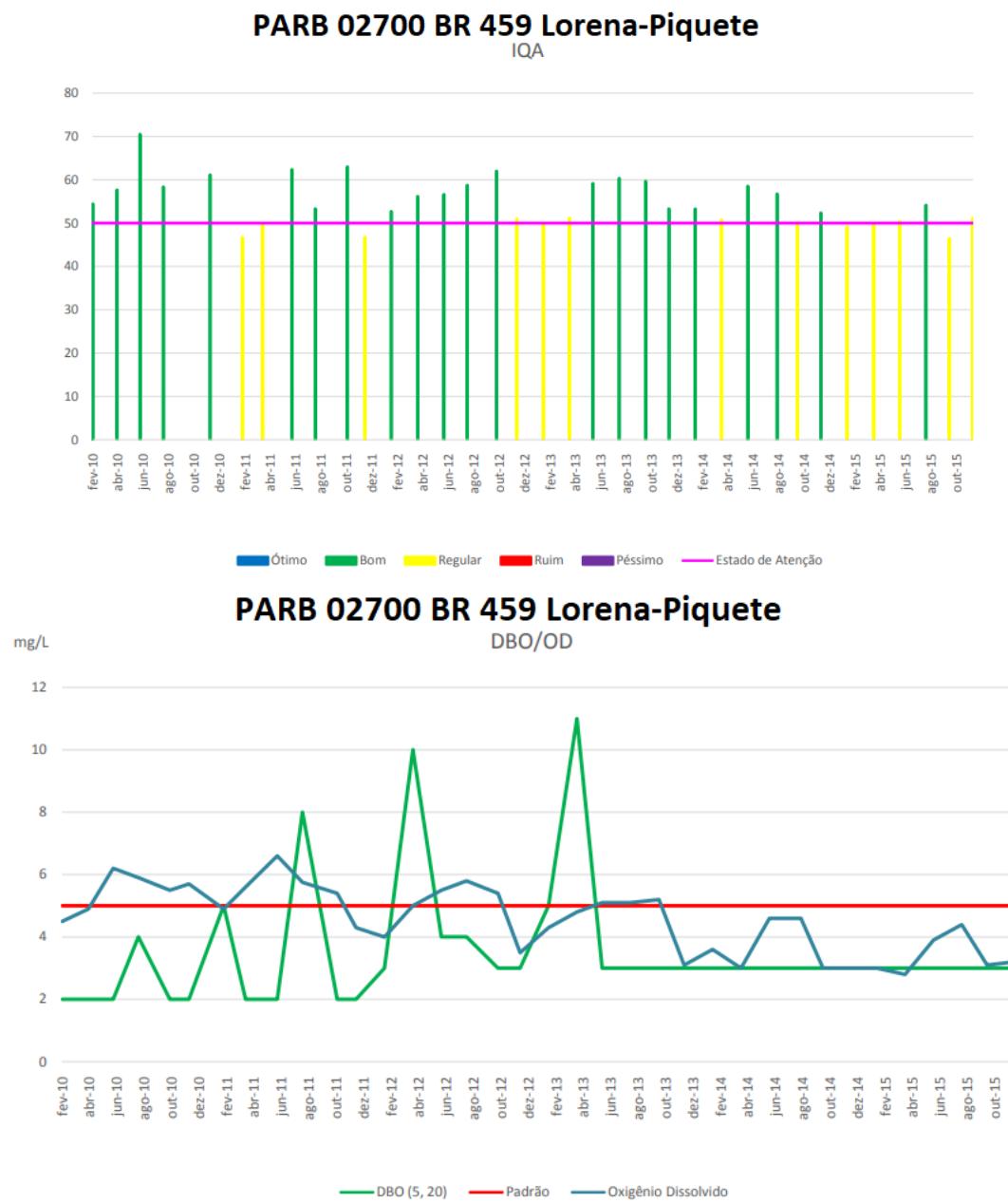
IQA



PARB 02600 Captação de Aparecida

DBO/OD





Fonte: AGEVAP (2016) E CETESB (2018)

Pela Figura 4, ressalta-se que o índice de IQA apresenta nos dois pontos de monitoramento qualidade regular ao longo dos anos, e que a partir do ano de 2013, o OD permaneceu fora do padrão e DBO, ficando dentro do padrão estabelecido pela legislação.

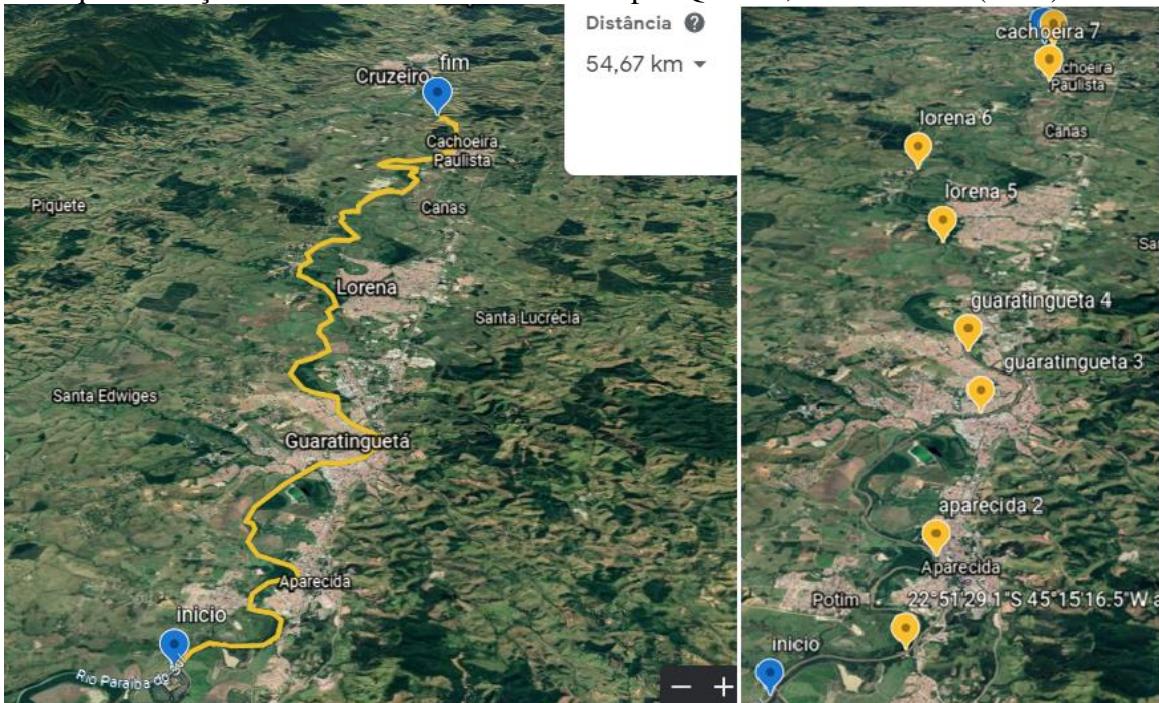
5.3 COLETA DE DADOS

Um levantamento de dados e estudos do trecho do Rio Paraíba do Sul foi realizado por Queiroz, Silva e Paiva (2017), e, a partir dessa referência, onde os dados foram coletados trimestralmente entre os meses de agosto de 2013 e agosto de 2014 e

preservadas conforme critérios determinados pela norma ABNT NBR 9.898/87 (ABNT, 1987), será realizada a calibração do sistema de modelagem.

Os pontos de coleta de água estão dispostos em oito pontos, como mostrado na Figura 5, próximos à montante (M) e à jusante (J) do perímetro urbano de quatro municípios paulistas: Aparecida (APDM (-22.858095, -45.254591) e APDJ (-22.842567, -45.234106)), Guaratinguetá (GUAM (-22.811946, -45.194412) e GUAJ (-22.790639, -45.178652)), Lorena (LORM (-22.742899, -45.144604) e LORJ (-22.698778, -45.115863)) e Cachoeira Paulista (CPTM (-22.634923, -44.991708) e CPTJ (-22.664032, -45.023458)).

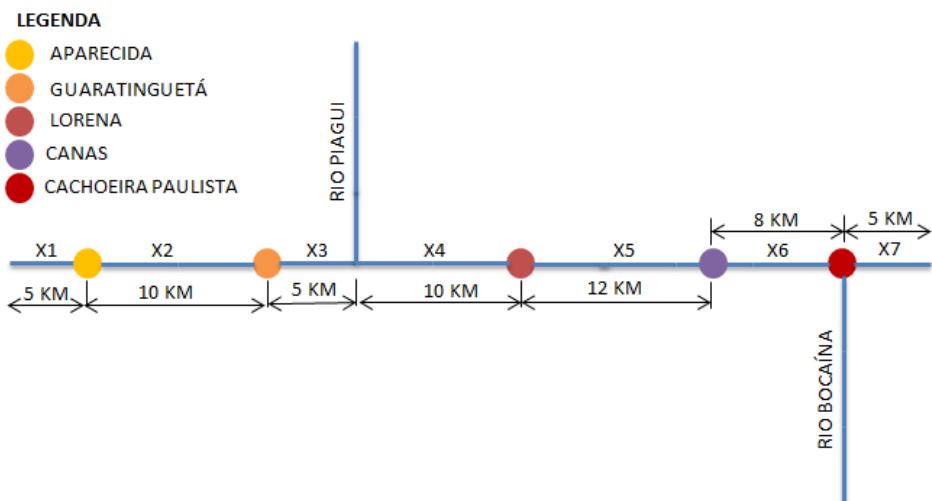
Figura 5 - Trecho do rio e Pontos geográficos de coletas de amostras empregadas na quantificação de OD e DBO desenvolvidos por Queiroz, Silva e Paiva (2017)



Fonte: autoria própria

A modelagem é unidimensional, logo foi esquematizado o trecho de forma linear de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Esquema linear para modelagem do estudo de caso



Fonte: autoria própria

5.4 METODOLOGIA

Para apresentar uma metodologia simplificada, o modelo foi desenvolvido no software Microsoft Office Excel 2013 e consistem na estimativa das concentrações de OD e DBO ao longo do rio, subdividido em trechos.

O cenário principal apresenta o trecho do RPS e seus afluentes e pontos de descarga pontual de efluentes das respectivas cidades. Para encontrar os valores de DBO foram obtidas equações, com base de dados de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Porcentagem da população atendida pela coleta e pelo tratamento de esgotos

CIDADE	ATENDIMENTO %	
	COLETA	TRATAMENTO
Aparecida	99	0
Cachoeira Paulista	89,5	7
Canas	85,1	64,8
Guaratinguetá	91,1	30
Lorena	97,1	96

Fonte: autoria própria

A cidade de Lorena apresenta ótimos valores de coleta e tratamento, mas tem valores altos de perdas 42,7 %, comprometendo o seu tratamento (SÃO PAULO,2016). A cidade que apresenta um estado crítico é Aparecida, mesmo possuindo verbas e estação de tratamento de efluente (ETE), não realiza o tratamento, coletando o efluente e jogando *in natura* o que foi gerado.

Com relação aos coeficientes utilizados na modelagem, o coeficiente de desoxigenação do esgoto (k_d) adotado foi obtido da literatura (Tabela 2) pela dificuldade de realização de ensaios laboratoriais, contudo, atualmente é estimado por softwares estatísticos computacionais baseados em dados laboratoriais cinéticos em *jar test*, sendo os métodos mais utilizados são os de regressão não linear, em que a curva teórica é ajustada aos diversos pontos experimentais de DBO 20°C, em função do tempo, onde se obtêm simultaneamente os valores dos coeficientes de k_a (Tabela 3) e demanda última (Lo) (von SPERLING, 2007).

A planilha é mais extensa que o mostrado na figura 7, o foco é a entrada de dados. Há nas células valores adotados, calculados, obtendo assim o gráfico de DBO e OD para a modelagem

Figura 7 - Entrada de dados da planilha do modelo

RIO	Unidade	
U0	111,456	km/dia
X0	55	km
Q0	216	m ³ /s
D0	2	mg/L
L0	2	mg/L
Kd0	0,12	1/dia
Ka0	0,46	1/dia

AFLUENTE 01 PIAGUI		
Vazão (Q01)	4,85	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D01)	0,5	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L01)	9	mg/L
Taxas de desoxigenação (Kd01)	0,2	1/dia
Taxas de autodepuração (Ka01)	0,37	1/dia

EFLUENTE APARECIDA		
Vazão (Q03)	0,067	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D03)	4	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L03)	337,5	mg/L

AFLUENTE CACHOEIRA PAULISTA		
Vazão (Q07)	0,061	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D07)	5	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L07)	314,061	mg/L

EFLUENTE CANAS		
Vazão (Q06)	0,00963	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D06)	3	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L06)	118,87	mg/L

EFLUENTE GUARATINGUETÁ		
Vazão (Q04)	0,2269	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D04)	4	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L04)	236,25	mg/L

EFLUENTE LORENA		
Vazão (Q05)	0,165	m ³ /s
Oxigênio Dissolvido (D05)	3	mg/L
Demandas Bioquímicas de Oxigênio (L05)	144,11	mg/L

Fonte: autoria própria

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

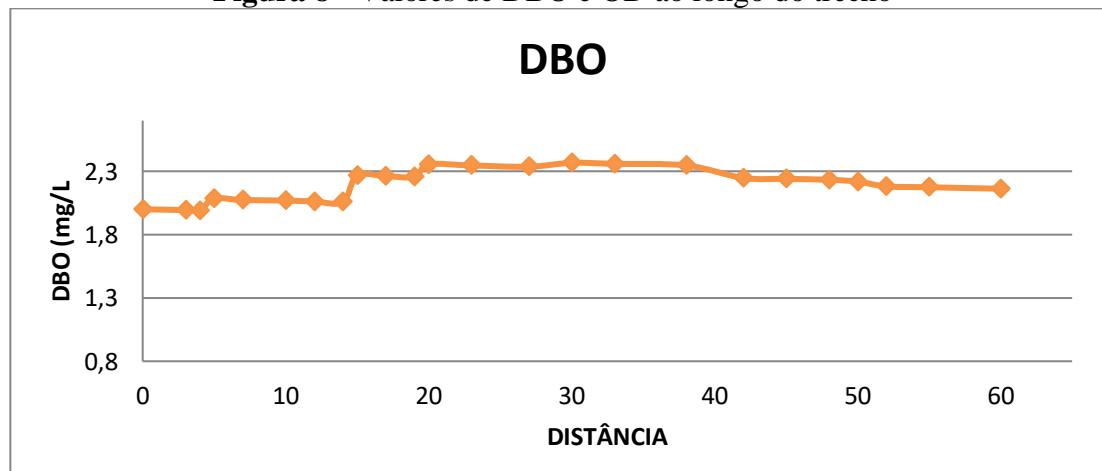
Com os trechos definidos e com os dados necessários para executar a modelagem, foram obtidos gráficos de OD e DBO ao longo do trecho, foi realizado cinco diferentes cenários. Destaca-se que os dados gerais de entrada para a simulação (dados físicos do rio e vazão de esgoto) apesar de sofrer variações sazonais, foram considerados constantes.

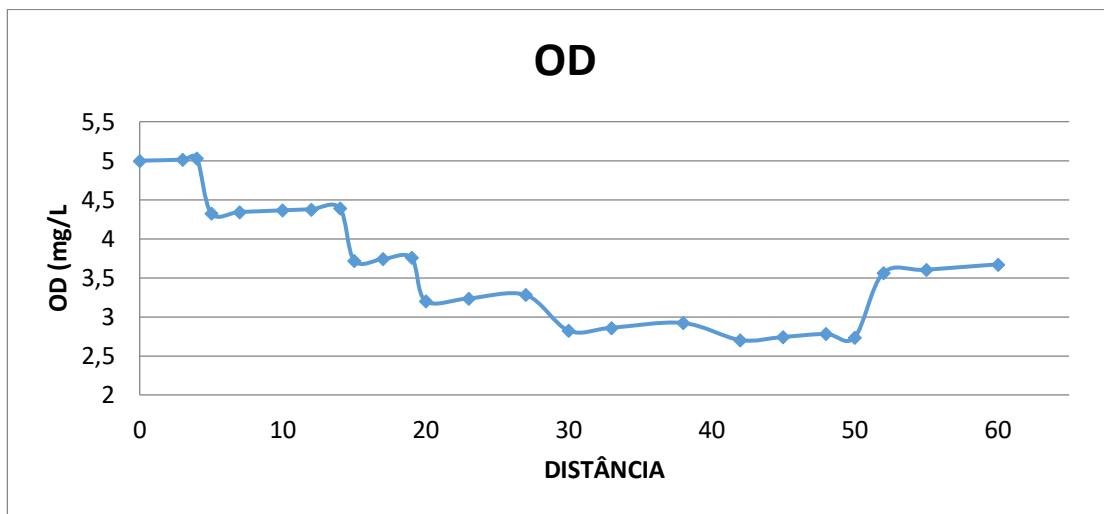
Para um rio de classe 2 os valores de DBO, de acordo com a resolução CONAMA 357/05 ($<5,0$ mg/L) estão dentro do limite. Diferentemente os valores de OD que 87,5% do trecho se encontra abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA 357/05 ($>5,0$ mg/L).

Uma das justificativas para o valor de OD irregular, é devido as condições geomorfológicas do rio que não favorece a dispersão de poluentes (trecho meandrado), bem como a falta de tratamento de esgoto doméstico em algumas cidades nesses locais (AGEVAP, 2016).

O trecho analisado possui aproximadamente 60km, valor obtido através do Google Maps. De acordo com a Figura 8, percebe-se que ocorre mudanças abruptas de decaimento de OD, isto acontece devido aos pontos de mistura, encontro do Rio Principal com os efluentes das cidades.

Figura 8 - Valores de DBO e OD ao longo do trecho





Fonte: autoria própria

No km 12, temos a cidade de aparecida, reduzindo em 0,5 mg/L o oxigênio dissolvido e um aumento de DBO, o RPS começa o processo de autodepuração, mas como no km 15 tem a cidade de Guaratinguetá, ocorre mais uma queda de OD. Depois apresenta valores inferiores a 3 mg/L de OD e superiores a 2,3 mg/L de DBO, trecho entre Lorena e Canas, devido ao acúmulo de matéria orgânica no corpo hídrico. Há uma melhora substancial no km 50 devido ao afluente Bocaína. Mas devido a cidade de Cachoeira Paulista não consegue chegar aos valores de 5,0 mg/L de OD, nem os valores iniciais de DBO.

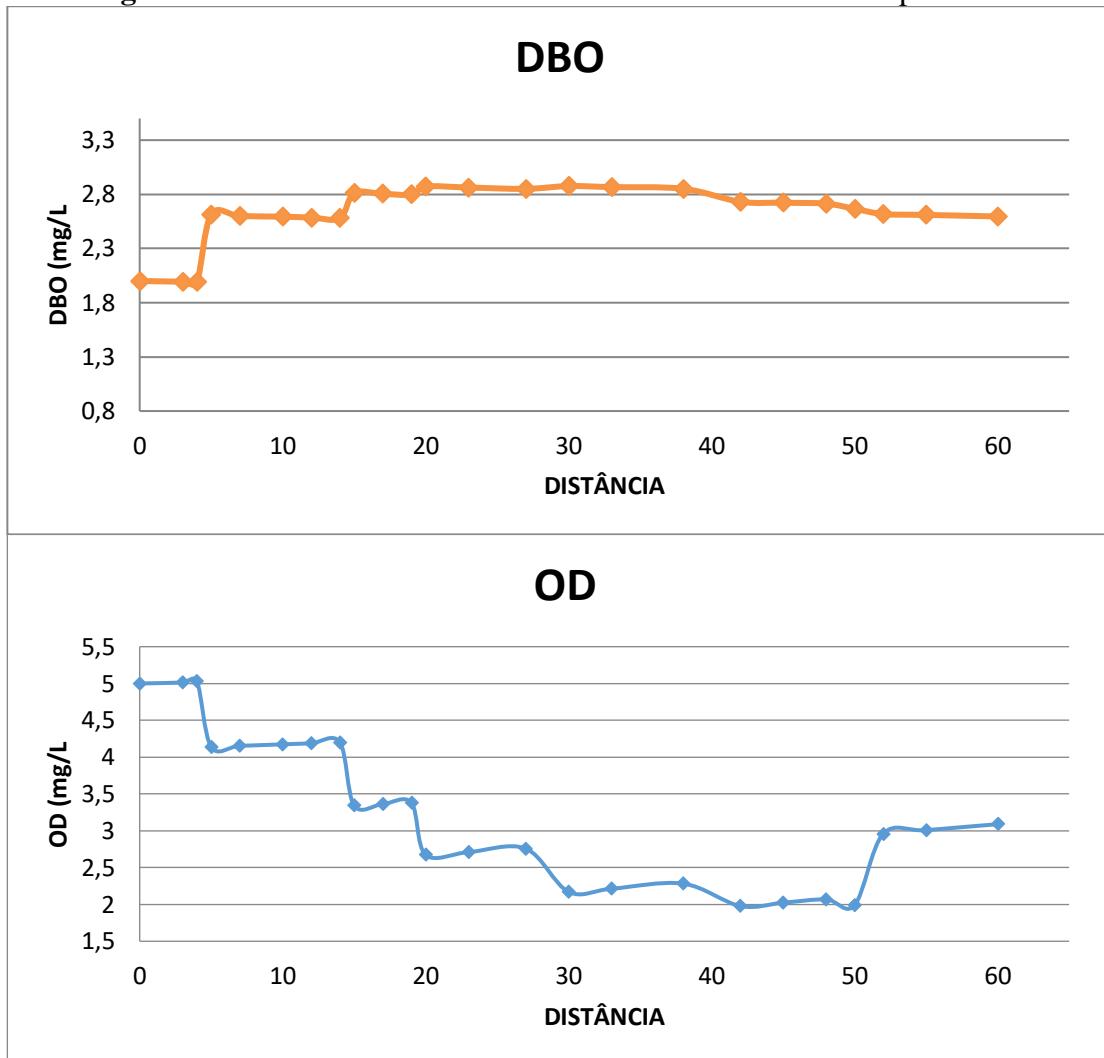
O corpo hídrico não autodepurou-se na zona de mistura, por isso apresenta valores de distância crítica e tempo crítico, durante todo o trecho.

6.1 CENÁRIOS

6.1.1 Aumento de carga orgânica na cidade de Aparecida

Neste cenário, ocorre o aumento da população e consequentemente o aumento de efluente gerado, visto que a Cidade de Aparecida é uma cidade turística e recebe ao longo do ano 12,6 milhões de turistas. Na Figura 9, percebe-se que como a cidade se encontra no início do trecho, ao longo do percurso a taxa de autodepuração do rio é lenta, permanecendo alterado com aumento de DBO e diminuição de OD.

Figura 9 – Valores de DBO e OD aumento de CO cidade de Aparecida



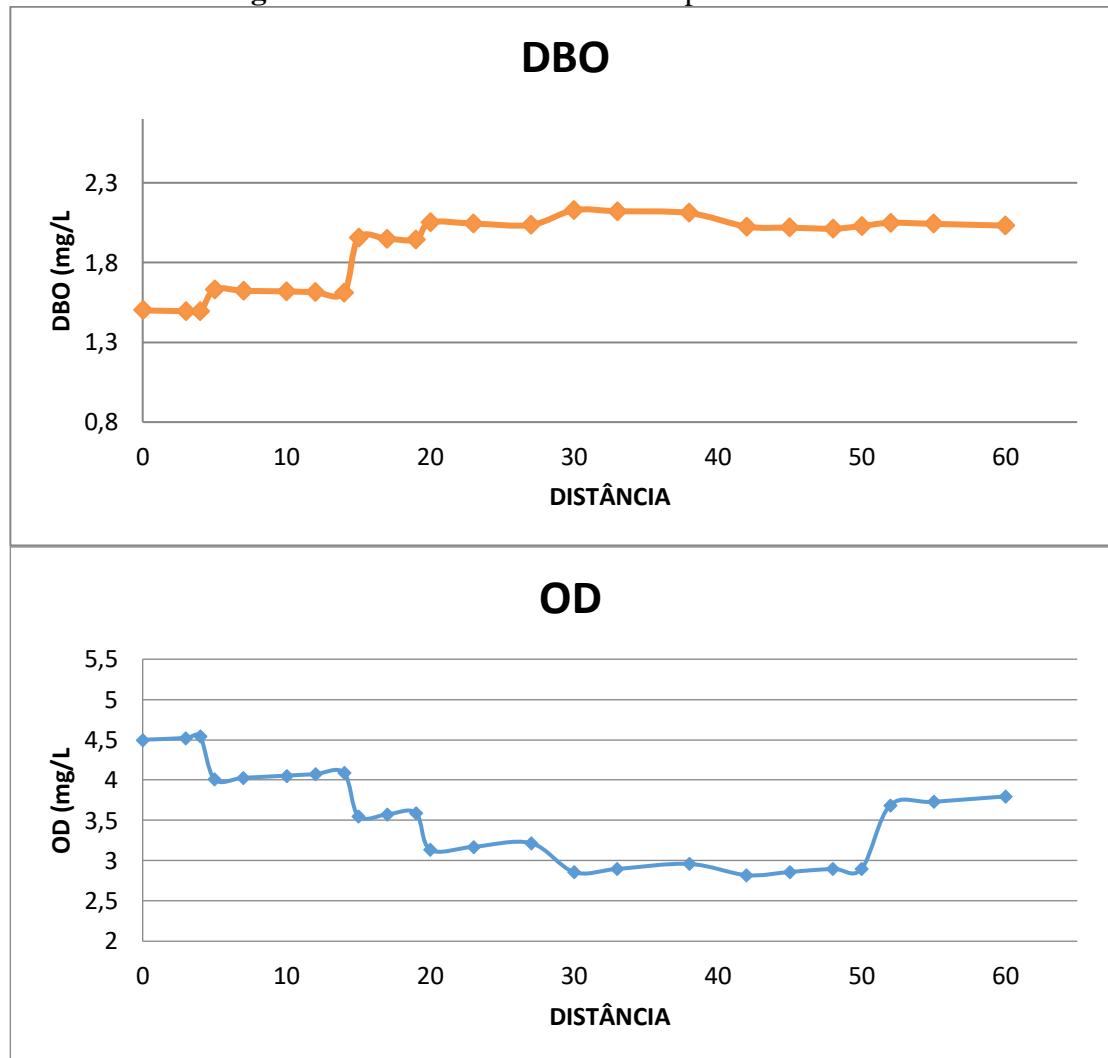
Fonte: autoria própria

Com este cenário na Figura 9, a cidade de Aparecida afeta a qualidade do RPS, pois foi apenas alterado o efluente gerado por ela. No trecho entre Lorena e Canas, o valor de OD é 2,0 mg/L e DBO atingi valores superiores a 2,8 mg/L, logo, o efluente gerado em uma cidade há 25 km de distância contribuiu para uma piora na qualidade, percebe-se que a responsabilidade não deve ser apenas do município, e que utilizar microbacias como unidades de planos é o recomendável. Portanto torna-se interessante expor uma citação de Von Sperling, sobre gestão regional ambiental, “O controle da qualidade de água está associado a um planejamento global, a nível de toda a bacia hidrográfica, e não individualmente, por agente gerador” (SPERLING, 1996).

6.1.2 Estiagem

A concentração de OD sofre uma diminuição, de acordo com Figura 10, devido a redução da capacidade de diluição devido à baixa precipitação. Logo, períodos de seca afetam as concentrações sendo agentes de intensificação de impactos.

Figura 10 – Valores de DBO e OD período de seca



Fonte: autoria própria

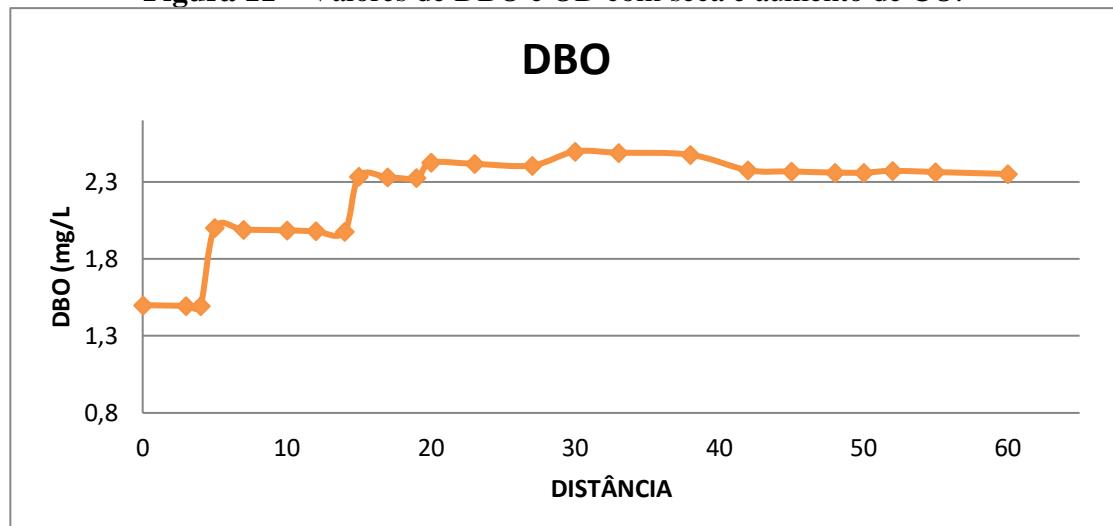
O período de seca, apresenta o melhor cenário de DBO e OD proposto, pois só foram alterados os dados de vazão do rio principal e dos dois afluentes. Um dos fatores que pode comprometer a qualidade do corpo hídrico é a turbidez, pois afeta diretamente o OD. Quando se altera apenas vazão temos diminuição da velocidade do rio principal, tem-se o reestabelecimento acelerado de oxigênio dissolvido (Figura 10).

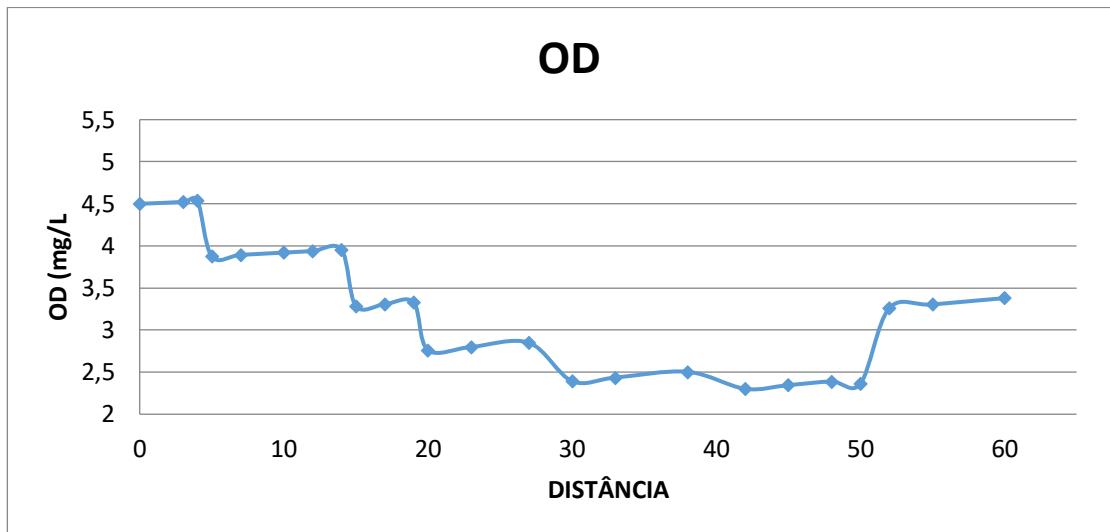
Nos trabalhos de Alvarenga et al. (2012), Gonçalves et al. (2012), Silva et al. (2009) e Vasco et al. (2011) foi observado que no período seco ocorrem menores temperaturas na água, ocasionando maior solubilidade de gases na água e maiores concentrações de OD. Os valores se aproximam dos reais devido à baixa precipitação durante o período de coleta, não ocorrendo assim alterações extras como turbidez, temperatura e condutividade, que provocariam uma mudança nos valores de OD e DBO.

6.1.3 Estiagem com aumento populacional

Neste cenário se propôs a reduzir a vazão do RPS e afluentes, e um aumento populacional na cidade de Aparecida. Com essas projeções, a pouca precipitação e aumento de carga orgânica gerada, afeta drasticamente, com um aumento de DBO e queda de OD, como é mostrado na Figura 11, nesse estágio pode-se chegar à mortandade de peixes, chegando a um estado crítico de anaerobiose. Os valores mais elevados de DBO, dentre todos os cenários, podem ser atribuídos devido à baixa precipitação e o aumento do lançamento de esgoto, causando redução da capacidade de diluição, afetando também o OD. Os valores de OD não são menores que 2,0 mg/L, uma das consequências desse resultado, é porque alterando a vazão, interferimos na velocidade do corpo hídrico, diminuindo a velocidade aumentamos o tempo de autodepuração do trecho.

Figura 11 – Valores de DBO e OD com seca e aumento de CO.





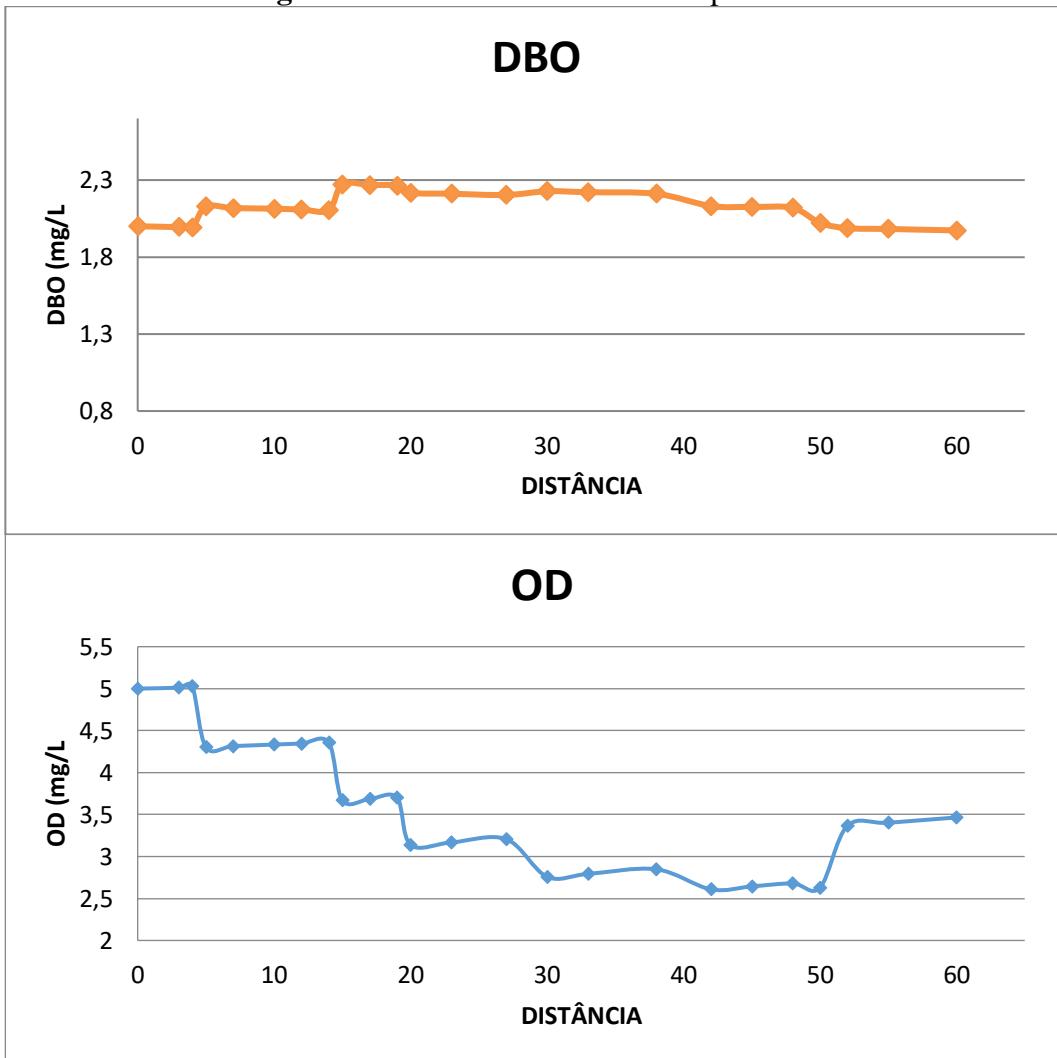
Fonte: autoria própria

6.1.4 Cheia

Para gerar o presente cenário foi realizado uma alteração nos valores da tabela. A vazão do Rio Principal (RPS) e os afluentes Rio Piagui e Bocaína, sofrem um aumento para simular cheia, e para simular a seca é alterado a vazão dos mesmos, mas com redução do valor utilizado no cenário Principal, que tem o objetivo de demonstrar a realidade do comportamento do RPS em relação a autodepuração.

No período de cheia há um aumento gradativo de melhora da qualidade, visto que possui maior vazão que está disposta a fazer a depuração da matéria orgânica, gerando maior diluição, na figura 12 os valores de DBO não ultrapassam 2,3 mg/L e de OD não ocorre valores menores que 2,5 mg/L. Mas em períodos de cheia, ocorre precipitações, as vezes com grandes taxas pluviométricas, trazendo sedimentos, e atrapalhando a quantidade de oxigênio dissolvido no Rio. Neste caso, além do lançamento de efluente, devido as frequentes chuvas também podemos citar a lixiviação de matéria orgânica, contribuindo para um aumento de DBO. Os resultados são diversos quando se compara com outros estudos realizados sobre o tema, alguns apresentam melhores valores em períodos seca e outros de cheia, para Vasco et al. (2011) não observaram grandes variações de DBO entre os períodos seco e chuvoso.

Figura 12 – Valores de DBO e OD para cheia.



Fonte: autoria própria

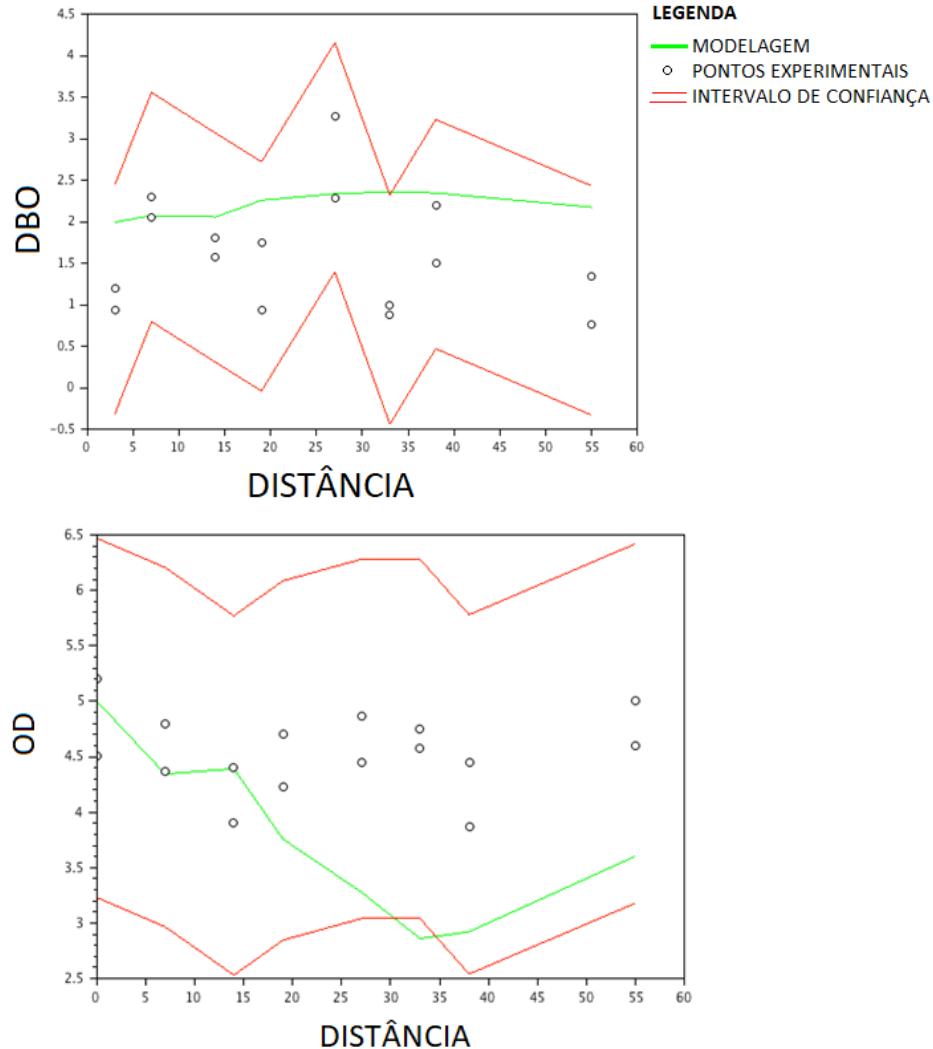
6.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para verificar se o modelo atende de forma real o trecho do Rio Paraíba do Sul, foi feito uma análise estatística, no software Scilab®, aplicou a fórmula de intervalo de confiança para o valor médio. Tendo como base os dados obtidos *in loco* realizado por Queiroz, Silva e Paiva (2017) de DBO e OD. Adotou-se sob hipótese que a variância não muda ao longo do Rio, as previsões ficaram dentro do intervalo de confiança 95% para o valor médio. O modelo ficou o mais próximo de ficar fora do IC, entre o quilometro 30 e 35, que pode ser justificativo devido a um ajuste de constantes, ou quando foi realizado a coleta do monitoramento, ocorreu um evento adverso, e é esperado que nem sempre o valor esteja dentro do intervalo de confiança, devido aos 5%.

Na Figura 13, nota-se que o modelo de DBO representa melhor o comportamento do rio, do que OD. E até quilometro 20 tem-se a modelagem

acompanhando os pontos de monitoramento. Logo a modelagem pode ser considerada como dados para simular a situação real do corpo hídrico

Figura 13 – Intervalo de Confiança parâmetro DBO e OD.



Fonte: autoria própria

Comparando os estudos realizados no trecho do RPS, os resultados evidenciam a piora da qualidade da água do rio ao longo dos anos.

Tabela 5 – dados de OD e DBO de estudos do trecho

ESTUDOS DO TRECHO	OD (mg/L)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	
	ANO	MINIMO	MAXIMO	MEDIA
<i>Leandro et. Al.</i>	2012	5,00	6,40	0,71
<i>Queiroz, Silva e Paiva</i>	2014	2,87	5,00	1,66
<i>Modelagem aplicada</i>	2020	2,70	5,00	2,09

Fonte: autoria própria

Em relação aos resultados obtidos através da modelagem, verificou-se que o RPS começa a apresentar irregularidades logo após a cidade de Aparecida, devido a falta de tratamento de esgoto. Depois a cidade de Guaratinguetá apresenta uma melhora no tratamento, mas como o rio já está comprometido ocorre uma piora da qualidade, chegando a níveis baixos de OD, levando a uma classificação REGULAR nesse trecho. A cidade de Lorena é a que apresenta um maior tratamento de esgoto, apesar de não ser 100% como prometido no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos e possuir um valor alto nas perdas. O RPS começa a ter um aumento de OD chegando em Cachoeira Paulista, mas como a cidade possui baixo tratamento, o rio não tem capacidade de se auto depurar, para voltar aos padrões exigidos pela legislação.

O modelo traz a vantagem de análise do trecho e não de apenas pontos, como é feito o monitoramento até hoje do Rio. Possibilitando futuros estudos para viabilidade de projetos, e prever até quando a qualidade da água será afetada.

Ante o exposto pela legislação vigente, infere-se que os lançamentos de águas residuais de empreendimentos industriais que se encontram no trecho estudado, estão de acordo com as normas e diretrizes.

Com o estudo fica claro a necessidade de tratamento de efluentes domésticos, sendo estes o principal poluidor do Rio, mas existe um problema para solucionar o saneamento básico do trecho. Porque de acordo com a Lei 11.445/2007- que trata sobre as diretrizes nacionais para o saneamento básico, dispondo, entre outras questões, a respeito dos princípios fundamentais, do exercício da titularidade, da prestação regionalizada dos serviços públicos de saneamento básico, atividades de planejamento, da regulação, aspectos econômicos e sociais, aspectos técnicos, participação de órgãos colegiados no controle social e política federal de saneamento básico. O município fica responsável pelo Saneamento básico, mas existe grandes divergências de responsabilidade.

Os municípios alegam ser uma questão regional, para o Ibama (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis), os municípios que não possuem tratamento de esgoto, não conseguem resolver este problema sozinho faltando o apoio por parte do governo. E o Ministério Público tem a intenção de propor ação contra os municípios que não possuem nenhum tipo de tratamento de esgoto.

Nesse meio tempo não se soluciona nada devido a “questão política”, e os órgãos fiscalizadores estarem também nesse meio, onde a legislação é rigorosa, mas

não tem órgão que fiscalize o cumprimento. E também muitos municípios sofrem ação, condenação confirmada pelo Tribunal de Justiça, só que a Prefeitura não cumpre a decisão judicial, onde acumulam multas milionárias, sendo executadas por conta do descumprimento de acordos.

Recentemente o ministro do Meio Ambiente, Ricardo Salles, disse que sua pasta começará um programa para avaliar as estações de tratamento de esgoto no país. “Nós faremos a partir de agora um programa de fiscalização da eficiência do tratamento das estações”, anunciou, ao participar de um seminário promovido pelo Sindicato da Habitação de São Paulo (Secovi-SP).

7. CONCLUSÕES

Os estudos neste trabalho tiveram o objetivo de diagnosticar a autodepuração das águas do Rio Paraíba do Sul entre as cidades de Aparecida e Cachoeira Paulista – SP, por meio da obtenção dos parâmetros de qualidade (OD e DBO) e aplicação do modelo matemático *Streeter-Phelps*, buscando indicadores que refletissem resumidamente as suas alterações, e além disso, comparar estes resultados com os padrões exigidos pela legislação.

Observou-se que os valores, encontrados através da predição do OD utilizando os coeficientes do modelo matemático, que foram obtidos a partir de equações e base de dados, quando comparados com os dados experimentais de OD obtidos in loco, foram próximos, permitindo estimar cenários e identificar possíveis variáveis que estão impactando diretamente para a degradação do manancial através da diminuição do OD.

A DBO se manteve dentro do padrão estabelecido pela legislação, os cenários de estiagem, demonstraram uma queda na qualidade da água. A seca além de afetar a quantidade de água, provoca impactos ambientais, por exemplo uma crise hídrica. O período de Cheia, provoca uma melhora nos parâmetros, mas acompanhados de pluviosidade, há uma degradação de sedimentos, interferindo nas taxas de OD e DBO de forma negativa. Através dos cenários percebe-se a importância da previsão de eventos adversos, permitindo ter a prevenção dos impactos.

Este trabalho, busca alertar com dados científicos a necessidade do controle de qualidade das águas da região, comprovando que com apenas cumprimento das ETEs, com eficiência, será capaz de retomar a qualidade exigida pela legislação. Além de possibilitar a adaptação de outros trechos da bacia hidrográfica com características semelhantes ao contexto analisado.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Para aprofundar o estudo, e futuros projetos relacionados com o trecho há alguns ramos que podem ser seguidos a partir do estudo realizado.

- Estudo de ajuste das constantes, como comunidade bentônica se relaciona com a constante K_a , as contribuições da fotossíntese para o déficit de OD.
- Aumentar o trecho e incluir cidades vizinhas e seu impacto regional.
- Como os afluentes afetam a qualidade do Rio Paraíba do Sul.
- Modelagem matemática e o geoprocessamento – avaliando impactos no uso do solo.

9. REFERÊNCIAS

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Relatório Técnico - Bacia do Rio Paraíba do Sul – Subsídios às Ações de Melhoria da Gestão. Resende, 2011.

ALVARENGA, L. A.; MARTINS, M. P. P.; CUARTAS, L. A.; PENTEADO, V. A.; ANDRADE, A.. Estudo da qualidade e quantidade da água em microbacia, afluente do rio Paraíba do Sul – São Paulo, após ações de preservação ambiental. Revista Ambiente e Água, v.7, n.3, 2012. DOI:<https://doi.org/10.4136/1980-993X>

BONGANHA, C. A.; GUIGUER JR, N.; PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. A.; RIBEIRO, M. L. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. Revista Analytica, São Paulo, v. 30, p. 116-120, 2007.

BRASIL, Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001/1990, que modificou a Lei nº 7.990/1989. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 jan.1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm> Acesso em: 28 de out. de 2019.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm> Acesso em: 28 de out. 2019.

BRASIL. Planos de Recursos Hídricos E Enquadramento Dos Corpos De Água / Agência Nacional de Águas. Brasília: Ana, 2013. 68 p.

BRASÍLIA. Funasa. Ministério da Saúde (Ed.). Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS. 2014. Disponível em:
<http://www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf>. Acesso em: 28 de out. 2019.

CEIVAP -COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (Canas) (org.). PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Canas: Agevap, 2018. 390 p.

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Relatório Técnico. Relatório de Situação Bacia do Paraíba do Sul, Resende, 2019.

COSTA, L. MINISTÉRIO PÚBLICO ESTUDA AÇÃO POR FALTA DE ESGOTO. UNESP, ILHA SOLTERIA- SP. Disponível em: <<http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/on06112004.php>> Acesso em: 20 de out. 2020

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes,

complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=43>> Acesso em: 28 out. 2019.

COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *The Science of the Total Environmental*, n.1, v.314-316, p.335-377, 2003.

CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL)/ DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA - ERJ (. Porto Alegre) (org.). **Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 58.** Rio de Janeiro: Cprm (Serviço Geológico do Brasil)/, 2003. 73 p.

DESCONHECIDO. **Intervalo de Confiança.** Universidade Estadual do Rio Janeiro- UERJ. Disponível em: <http://www.lampada.uerj.br/arquivosdb/_book/intervaloConfianca.html> Acesso em : 15 de set. 2020.

DUTRA, W. C. P. **Modelagem dos Parâmetros de Qualidade de água em trecho urbanizado do Rio Paraibuna em Juiz De Fora (MG).** 2014. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora,Juiz de Fora, 2014.

GOMES, M. A. F. **Água: sem ela seremos o planeta Marte de amanhã.** 2011. EMBRAPA. Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/464.pdf> Acesso: 28 out. 2019.

GONÇALVES, J. C. S. I.; SARDINHA, D. S.; SOUZA, A. D. G.; DIBIAZI, A. L. B.; GODOY, L. H.; CONCEICAO, F. T.. Avaliação espaço-temporal da qualidade da água e simulação de autodepuração na bacia hidrográfica do córrego São Simão, SP. *Revista Ambiente e Água*, v.7, n.3, 2012. DOI:<http://doi.org/10.4136/ambi-agua.894>.

HESPAÑHOL, K. M. H. **Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do ribeirão Morangueiro,** 2009. 81f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>> acesso em : 13 de outubro de 2020.

MELLO, Daniel. **Ministério vai fiscalizar estações de esgoto no país, diz Salles.** 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-08/meio-ambiente-vai-fiscalizar-estacoes-de-tratamento-de-esgoto>. Acesso em: 20 out. 2020.

O VALE: Câmara de Guará questiona plano de tratamento de esgoto. Taubaté, 19 jul. 2018. Disponível em: https://www.ovale.com.br/_conteudo/2018/07/nossa_regiao/47804-camara-de-guara-questiona-plano-de-tratamento-de-esgoto.html. Acesso em: 13 out. 2020.

QUEIROZ, L. C.; SILVA, F. T.; PAIVA, T. C. B.; Caracterização estacional das variáveis físicas, químicas, biológicas e ecotoxicológicas em um trecho do Rio Paraíba do Sul, SP, Brasil. **Revista ambiente e água.** v.12, n.2, 2017.

- REIS, M. M. **ESTATÍSTICA.** Univerdade Federal de Santa Catarina. p. 11. Disponível em: < <https://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/AED04.pdf>> Acesso em: 15 de set. 20
- SALES, R. J. M.; ALENCAR, A. F. J. ; SANTOS, H. S. Aplicação das equações de Streeter-Phelps em rios que recebem fontes de poluentes pontuais e difusas, para avaliar o comportamento das concentrações de oxigênio dissolvidos. X Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 10, n. 12, pg. 112-123, 2014.
- SANTOS, A. B.; ATHAYDE Jr., G. B. Legislação Ambiental e padrões de lançamentos de águas residuárias. In: ATHAYDE Jr., G. B.; SANTOS, A. B. (Org.). Qualidade da água e controle da poluição. Salvador: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, 2008. p. 57-68.
- SÃO PAULO. CETESB. (org.). **Histórico.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/historico/#:~:text=A%20Companhia%20Ambiental%20do%20Estado,do%20ar%20e%20do%20solo>. Acesso em: 13 out. 2020.
- SÃO PAULO. CETESB. (org.). **Apêndice D Índices de Qualidade das Águas.** São Paulo: Cetesb, 2020. 33 p.
- SÃO PAULO. CETESB. (ed.). **QUALIDADE DAS ÁGUAS INTERIORES:** no estado de são paulo 2018. Pinheiros: Cetesb, 2019. 302 p.
- SÃO PAULO. PREFEITURA MUNICIPAL DE CACHOEIRA PAULISTA. (org.). **PLANO MUNICIPAL INTEGRADO DE SANEAMENTO BÁSICO.** Cachoeira Paulista: Prefeitura Municipal de Cachoeira Paulista, 2017. 217 p.
- SÃO PAULO. MUNICÍPIO DE LORENA ESTADO DE SÃO PAULO. . **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS.** 6. ed. Lorena: Ampla Assessoria e Planejamento Ltda, 2016. 377 p.
- SCORSIN, Ericson Meister. **A responsabilidade dos municípios na nova lei de saneamento:** saneamento básico. SANEAMENTO BÁSICO. 2007. Disponível em: https://www.conjur.com.br/2007-ago-23/responsabilidade_municipios_lei. Acesso em: 20 out. 2020.
- SILVA, A. P. S.; DIAS, H. C. T.; BASTOS, R. K. X.; SILVA, E.. Qualidade da água do Reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Peti, Minas Gerais. Revista Árvore, v.33, n.6, p.1063-1069, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-67622009000600009>
- SPERLING, V. M. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** VOL. 1. 1 ed. Editora: IWA publishing, 2005.
- SPERLING,V. M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.** VOL. 7. 1 ed. Belo Horizonte. Editora: UFMG, 2007.
- SPERLING, V. M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Lodos ativados.** 2. ed. Belo Horizonte. Editora: UFMG, 1997.
- SPERLING, V.M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014.
- TERCINI, J. R. B. **Modelagem da qualidade da água integrando rio e**

reservatório. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TERCINI, J. R. B.; MELLO JUNIOR, A. V. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. **RBRH [online]**. 2016, vol.21, n.2, pp.338-346. ISSN 2318-0331. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p338- 346>.

TREVISAN, A. B. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água do Rio Papaquara.** 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

VASCO, A. N.; BRITTO, F. B.; PEREIRA, A. P. S.; MELLO JUNIOR, A. V.; GARCIA, C. A. B.; NOGUEIRA, L. C.. Avaliação espacial e temporal da qualidade da água na sub-bacia do rio Poxim, Sergipe, Brasil. Revista Ambiente e Água, v.6, n.1, 2011. DOI:<http://dx.doi.org/10.4136/1980-993X>