

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL

**USO DE JARDIM FILTRANTE COM SISTEMA DE AERAÇÃO POR GRAVIDADE  
PARA MANUTENÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE PISCICULTURA**

**GIOVANNA COLLYER RESENDE**

São Carlos/SP

2021

GIOVANNA COLLYER RESENDE

USO DE JARDIM FILTRANTE COM SISTEMA DE AERAÇÃO POR GRAVIDADE  
PARA MANUTENÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE PISCICULTURA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa

Coorientador: Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva

São Carlos/SP

2021

Uso de Jardim Filtrante com sistema de aeração por gravidade para manutenção da qualidade da água de piscicultura

GIOVANNA COLLYER RESENDE

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental pela Universidade Federal de São Carlos.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

#### **Orientador**

Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa  
Universidade Federal de São Carlos (DECiv/UFSCar)

---

#### **Coorientador**

Pesq. Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Instrumentação)

---

#### **Membro da banca**

Profa. Dra. Marcela Bianchessi da Cunha Santino  
Universidade Federal de São Carlos (DHb/UFSCar)

*Dedico o resultado do esforço realizado  
ao longo dessa trajetória à minha amada  
família.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Ele nada disso teria sido possível.

Às minhas amadas irmãs, Marianna e Maria Clara, por sempre se fazerem presentes mesmo com a distância, me dando forças para superar os obstáculos da vida.

À minha família, pelo amor, dedicação, suporte e apoio incondicional a cada passo na minha história. Aos meus pais, avós, tios, primos, irmãos, sobrinhos, enfim, vocês foram essenciais para que isso tudo fosse possível. Meu muito obrigada!

Ao meu amor, Bernardo, meu companheiro e parceiro de vida, que me acompanhou em cada etapa, transformando minhas inseguranças em fortalezas. Obrigada por tudo!

Aos meus pets, Darth e Nina (*in memorium*), pelo amor incondicional em grande parte da minha vida, que me ajudou de tantas formas mesmo sem saberem. E à Lily e a Boo, por me ajudarem diariamente e me amarem sem barreiras.

Em especial ao meu querido professor e orientador, Dr. Daniel Jadyr Leite Costa, por ter aceitado me orientar, pelos seus valiosos ensinamentos, pelo seu esforço imensurável, pela sua confiança, pela sua dedicação e pela sua paciência!

Ao meu coorientador, Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva, pela oportunidade de estágio, pelos ensinamentos, pela confiança, e pela experiência que abriu inúmeras portas no meu caminho.

Ao Flávio Marchesin, por permitir os estudos em sua propriedade, pela disposição em ajudar, mostrando-se sempre interessado em aprender e ensinar.

Ao Dr. Ednaldo José Ferreira, pelo auxílio e ensinamentos sobre análise estatística.

Aos meus amigos e colegas do curso, pelo companheirismo e pelas trocas de experiências que me permitiram crescer como pessoa e como formanda. Em especial à Lívia Patracon, à Elvineide Alves e à Beatriz Grotto. Obrigada por tudo, meninas!

A todos os professores do curso, por todo apoio, pelos ensinamentos acadêmicos e pessoais. Agradeço pela dedicação aos alunos e ao curso que é tão complexo e importante, mas vocês conseguiram compartilhar os conhecimentos com maestria. Admiro todos vocês e agradeço profundamente por todos esses anos!

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e ao Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDES), pelo suporte financeiro ao projeto ao qual este trabalho está vinculado (Embrapa SEG n. 21.17.02.001.05.02.007).

## RESUMO

O Jardim Filtrante é uma tecnologia de tratamento de efluentes domésticos que vem sendo cada vez mais explorada, tendo como forte vantagem o baixo custo de manutenção, implantação e operação, bem como a possibilidade do reaproveitamento da água tratada para diversos usos. Entretanto, em um sistema de tratamento com recirculação de água voltado para a produção de peixes, a avaliação e a compreensão da eficiência do sistema de aeração utilizado se fazem essenciais para garantir a qualidade de vida dos peixes e, conseqüentemente, uma alta produção dos mesmos. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivos principais analisar o desempenho de um jardim filtrante de fluxo vertical subsuperficial no tratamento de um efluente oriundo de um tanque de piscicultura com recirculação de água, em São Carlos, SP; e avaliar a eficiência do sistema de aeração por gravidade estabelecido a jusante do jardim filtrante. O Jardim Filtrante analisado possui dois subsistemas: P (Jardim Filtrante) e C (Cascatas de aeração), onde foram coletados, durante nove dias, quatro e sete pontos, respectivamente. As variáveis analisadas foram: pH, Temperatura, Clorofila A, Condutividade Elétrica (CE), Turbidez e Oxigênio Dissolvido (OD). A metodologia para a análise das variáveis limnológicas do jardim filtrante consistiu na comparação dos dados coletados com a literatura e na realização dos testes não-paramétricos de Friedman e Wilcoxon, com grau de confiança de 95%. Como principais resultados, observou-se que a água do efluente retorna ao tanque de piscicultura com a temperatura, a turbidez, o pH e o OD adequados para a piscicultura conforme a resolução CONAMA nº 357/05 e a literatura levantada. Os resultados dos testes não-paramétricos apresentaram diferença significativa no subsistema P das variáveis CE e turbidez; e no subsistema C, das variáveis pH, temperatura e OD. Em relação à avaliação da eficiência do sistema de aeração por gravidade, a metodologia aplicada consistiu na estimativa da concentração de saturação ( $C_s$ ), do coeficiente de reaeração ( $Kla$ ) e do coeficiente de eficiência ( $K$ ). Os resultados obtidos foram comparados com a literatura especializada. Como principais resultados, destaca-se que o  $C_s$  apresentou a porcentagem de saturação dentro do recomendado pela literatura para a piscicultura. O valor do coeficiente de reaeração ( $Kla$ ) apresentou uma variação entre 0,03 e 0,2/min para uma temperatura qualquer do efluente, enquadrando o desempenho do sistema de aeração como superior ao encontrado em corredeiras e quedas d'águas naturais. Por fim, ao comparar os resultados obtidos do

coeficiente de eficiência K com os modelos descritos pela literatura, observou-se que, segundo o modelo de Barret, Gameson e Ogden, a partir da quinta coleta o efluente enquadrou-se como "água limpa". Seguindo o modelo de Pomeroy, o efluente foi classificado como "água limpa" a partir da segunda coleta. Os resultados foram satisfatórios e comprovaram o potencial do jardim filtrante e do sistema de aeração por gravidade. Este trabalho está vinculado a projeto elaborado, financiado e executado pela Embrapa e cofinanciado pelo BNDES, para melhoria do sistema produtivo aquícola brasileiro.

**Palavras-chave:** Tratamento de efluentes. Aquicultura. Eficiência de aeração. Reoxigenação. Reúso do efluente tratado.

## ABSTRACT

The Filter Garden is a technology for treating domestic effluents that has been increasingly explored, with the advantage of low cost of maintenance, implementation and operation, as well as the possibility of reusing treated water for various uses. However, in a treatment system with recirculation of water directed at fish production, the evaluation and understanding of the efficiency of the aeration system used is essential to guarantee the quality of life of the fish and, consequently, a high production. Thus, the present study had as main objectives: to analyze the performance of a subsurface vertical flow filtering garden in the treatment of an effluent from a fish farming tank with water recirculation, in São Carlos, SP; and to evaluate the efficiency of the gravity aeration system established downstream of the filter garden. The analyzed filter garden has two subsystems: P (filter garden) and C (aeration cascades), where four and seven points were collected during nine days, respectively. The parameters analyzed were: pH, Temperature, Chlorophyll A, Electrical Conductivity (EC), Turbidity and Dissolved Oxygen (DO). The methodology for analyzing the limnological parameters of the filter garden consisted of comparing the data collected with the literature and performing the non-parametric tests by Friedman and Wilcoxon, with a 95% confidence level. As main results, it was observed that the effluent water returns to the fish farming tank with the appropriate temperature, turbidity, pH and DO for the fish farming according to CONAMA resolution nº 357/05 and the literature. The results of the non-parametric tests showed a significant difference in the subsystem P of the variables EC and turbidity; and in subsystem C, the variables pH, temperature and DO. Regarding the evaluation of the efficiency of the aeration system by gravity, the applied methodology consisted of the estimation of the saturation concentration ( $C_s$ ), of the reaeration coefficient ( $K_{la}$ ) and of the efficiency coefficient ( $K$ ). The results obtained were compared with the specialized literature. As main results, it is noteworthy that the  $C_s$  presented the percentage of saturation recommended by the literature for fish culture. The value of the reaeration coefficient ( $K_{la}$ ) varied between 0.03 and 0.2/min for any temperature of the effluent, framing the performance of the aeration system as superior to what is found in rapids and falls in natural waters. Finally, when comparing the results obtained from the efficiency coefficient  $K$  with the models described in the literature, it was observed that, according to the model by Barret, Gameson and Ogden, from the fifth collection on,

the effluent was classified as "clean water". Following the Pomeroy model, the effluent was classified as "clean water" after the second collection. The results were satisfactory and proved the potential of the filter garden and the gravity aeration system. This work is linked to a project prepared, financed and executed by Embrapa and co-financed by BNDES, for improvement of the Brazilian aquaculture production.

**Keywords:** Wastewater treatment. Aquaculture. Aeration efficiency. Reoxygenation. Treated effluent reuse.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Imagem de satélite do Sítio São João. (A) Sistema piloto e (B) Lago artificial.    | 7  |
| Figura 2 – Croqui do Jardim Filtrante.  | 8  |
| Figura 3 – Copos-de-leite do Jardim Filtrante após sombreamento.                              | 9  |
| Figura 4 – Tipos de macrófitas aquáticas.   | 17 |
| Figura 5 – Representação de uma <i>wetland</i> construída de fluxo superficial.               | 18 |
| Figura 6 – Representação de uma <i>wetland</i> construída de fluxo subsuperficial.            | 19 |
| Figura 7 – Representação de uma <i>wetland</i> construída de fluxo subsuperficial horizontal. | 19 |
| Figura 8 – Representação de uma <i>wetland</i> construída de fluxo subsuperficial vertical.   | 20 |
| Figura 9 – Representação de uma <i>wetland</i> construída de fluxo subsuperficial híbrido.    | 20 |
| Figura 10 – <i>Zantedeschia aethiopica</i> .  | 21 |
| Figura 11 – Estimativa do ganho de OD na aeração por gravidade.                               | 36 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 – Resultado do teste de Wilcoxon na CE do subsistema P.                | 26 |
| Gráfico 2 – Resultado do teste de Wilcoxon na turbidez do subsistema P.          | 27 |
| Gráfico 3 – Resultado do teste de Wilcoxon na temperatura no subsistema C.       | 28 |
| Gráfico 4 – Resultado do teste de Wilcoxon no OD (mg/L) no subsistema C.         | 28 |
| Gráfico 5 – Resultado do teste de Wilcoxon no pH do subsistema C.                | 29 |
| Gráfico 6 – Comparação dos valores de Cs com a literatura.                       | 45 |
| Gráfico 7 – Análise da porcentagem de saturação com a literatura.                | 46 |
| Gráfico 8 – Valores de K (20°C) conforme as coletas.                             | 53 |
| Gráfico 9 – Comparação dos valores de K com o modelo de Barret, Gameson e Ogden. | 54 |
| Gráfico 10 – Comparação dos valores de K com o modelo de Pomeroy.                | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação das variáveis de qualidade da água.                                 | 23 |
| Tabela 2 – Resultado do teste de Friedman e Wilcoxon no subsistema P.                     | 25 |
| Tabela 3 – Resultado do teste de Friedman e Wilcoxon no subsistema C.                     | 27 |
| Tabela 4 – Determinação do coeficiente de eficiência K.                                   | 44 |
| Tabela 5 – Estimativa dos valores de Cs e Cs'.  | 44 |
| Tabela 6 – Estimativa dos valores de Kla.   | 47 |
| Tabela 7 – Valores típicos do Kla a 20 °C.  | 50 |
| Tabela 8 – Comparação do Kla observado com a literatura.                                  | 51 |
| Tabela 9 – Valores de K para diferentes temperaturas.                                     | 52 |
| Tabela 10 – Comparação dos valores de K do trabalho e de Barret, Gameson e Ogden (20 °C). | 53 |
| Tabela 11 – Comparação dos valores de K do trabalho e de Pomeroy (20°C).                  | 55 |

## LISTA DE QUADROS

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Classificação da pesquisa. | 10 |
|---------------------------------------|----|

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| Apresentação da pesquisa   | 3         |
| <b>CAPÍTULO 1 - Descrição geral e embasamento teórico da pesquisa</b>      | <b>4</b>  |
| I.I Introdução geral e justificativa                                       | 5         |
| I.II Objetivos da pesquisa   | 6         |
| I.III Estruturação metodológica da pesquisa                                | 6         |
| I.III.I Área de estudo   | 6         |
| I.III.II Classificação da pesquisa   | 9         |
| I.III.III Revisão bibliográfica  | 10        |
| <b>CAPÍTULO 2 - Análise das variáveis limnológicas do jardim filtrante</b> | <b>12</b> |
| II.I Introdução  | 13        |
| II.II Objetivos  | 14        |
| II.III Referencial teórico   | 14        |
| II.III.I <i>Wetlands</i> construídas                                       | 14        |
| II.III.I.I Componentes   | 15        |
| II.III.I.II Classificação  | 18        |
| II.III.II <i>Zantedeschia aethiopica (L) spreng</i>                        | 20        |
| II.IV Materiais e método   | 21        |
| II.IV.I Coleta de dados  | 21        |
| II.IV.II Análise das variáveis limnológicas                                | 22        |
| II.IV.III Eficiência do jardim filtrante                                   | 22        |
| II.V Resultados e discussão  | 23        |
| II.V.I Subsistema P  | 25        |
| II.V.II Subsistema C   | 27        |
| II.VI Conclusões   | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3 - Análise da eficiência de aeração por gravidade: coeficiente de eficiência (K)</b> | <b>31</b> |
| III.I Introdução  | 32        |
| III.II Objetivos  | 34        |
| III.III Referencial teórico   | 34        |
| III.III.I Aeração em aquicultura  | 34        |
| III.III.II Coeficiente de eficiência (K)  | 36        |
| III.III.III Fundamentos da transferência de oxigênio  | 37        |
| III.III.III.I Teoria dos dois filmes  | 37        |
| III.III.III.II Teoria da penetração   | 38        |
| III.III.III.III Teoria da renovação superficial   | 38        |
| III.III.IV Fatores que influenciam a transferência de oxigênio                                    | 38        |
| III.III.IV.I Concentração da saturação (Cs)   | 38        |
| III.III.IV.II Coeficiente de reoxigenação (Kla)   | 39        |
| III.IV Materiais e método   | 40        |
| III.IV.I Estimativa do valor de Cs'   | 40        |
| III.IV.II Estimativa do coeficiente de reoxigenação (Kla)   | 41        |
| III.IV.III Estimativa do coeficiente de eficiência (K)  | 42        |
| III.IV.IV Comparação dos valores de K com a literatura  | 43        |
| III.V Resultados e discussão  | 44        |
| III.V.I Estimativa do valor de Cs'  | 44        |
| III.V.II Estimativa do coeficiente de reoxigenação (Kla)  | 46        |
| III.V.III Estimativa do coeficiente de eficiência (K)   | 51        |
| III.VI Conclusões   | 56        |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO 4 - Considerações e recomendações finais da pesquisa</b>                              | <b>57</b> |
| IV.I Conclusões e recomendações finais da pesquisa  | 58        |
| Referências bibliográficas  | 59        |
| Apêndice  | 70        |

## APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

A proposta deste trabalho surgiu pela realização de um estágio não-obrigatório da autora na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Instrumentação (Embrapa), que contou com a colaboração de ideias e pensamentos dos orientadores e da autora, resultando no desenvolvimento satisfatório da pesquisa. A temática principal do trabalho é o estudo do desempenho de um jardim filtrante e do método de aeração por gravidade para reutilização da água em um tanque de piscicultura. Este trabalho está vinculado a projeto elaborado, financiado e executado pela Embrapa e cofinanciado pelo BNDES, para melhoria do sistema produtivo aquícola brasileiro (Embrapa SEG n. 21.17.02.001.05.02.007). Os dados brutos utilizados neste trabalho são de propriedade da Embrapa. O tratamento dos dados da eficiência do Jardim Filtrante, descritos no Capítulo 2 deste texto, foram conduzidos pela estudante com orientação dos profissionais da Embrapa. O tratamento e modelagem dos dados de aeração, descritos no Capítulo 3 desta monografia, foram conduzidos pela estudante, com orientação do prof. Daniel Costa.

Esta monografia foi elaborada em quatro capítulos, de forma a contribuir com o não repetimento de informações teóricas e metodológicas que serão utilizadas em cada capítulo. Além disso, esse modelo de estrutura auxilia e facilita na posterior publicação dos resultados mais importantes do trabalho.

Dessa forma, o capítulo inicial contém a descrição geral da pesquisa. Os dois capítulos seguintes estão estruturados em: introdução, objetivos, referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussão; e conclusões. O segundo capítulo discorre sobre a eficiência geral do Jardim Filtrante. O terceiro capítulo, por sua vez, possui foco no estudo do coeficiente de eficiência (K) na etapa de aeração do sistema. Por fim, o capítulo quatro apresenta as considerações finais da pesquisa e as recomendações gerais para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 1**

### **I. Descrição geral e embasamento teórico da pesquisa**

## I.I INTRODUÇÃO GERAL E JUSTIFICATIVA

A busca por produtos aquícolas nos últimos anos contribuiu com o aumento da demanda pela quantidade e pela qualidade de pescados no Brasil, sendo a tendência atual do mercado uma constante exigência de fornecimento dos produtos pesqueiros (PASCO, 2015). Como a pesca extrativa depende de diversos fatores externos incontroláveis e/ou imprevisíveis, a aquicultura se apresenta como a principal alternativa para atender às exigências do mercado brasileiro e mundial (NAYLOR *et al.*, 2000; FAO, 2014).

Em sistemas de aquicultura intensiva, os tanques de produção são abastecidos com grandes quantidades de peixes e de ração, o que comumente resulta em problemas ambientais, como poluição orgânica e eutrofização; e em mudanças nas variáveis limnológicas, decorrentes de um ou mais problemas ambientais (SULTANA *et al.*, 2017). Dessa forma, a manutenção da qualidade da água em sistemas de piscicultura é essencial não somente para garantir a qualidade do pescado para o consumidor final, como também para a produção ótima dos peixes, que está fortemente associada à sua qualidade de vida (BOYD; TUCKER, 2018).

Dentre as alternativas existentes para o tratamento de efluentes de aquicultura, tem-se o Jardim Filtrante, sendo a tecnologia explorada no presente trabalho. Diversos estudos avaliam a eficiência de tratamento de efluentes utilizando-se jardins filtrantes, apresentando resultados satisfatórios para os parâmetros atuais (DAVIS, 1994; DUARTE, 2002; BEVILACQUA *et al.*, 2006; DIAS *et al.*, 2010; BENASSI, 2018; EFFENDI *et al.*, 2018). Dentre as vantagens de utilizar o Jardim filtrante, tem-se o baixo custo de implantação, a fácil operação e manutenção; e a possibilidade de reutilização da água para diversas atividades não-potáveis.

Em tanques de piscicultura, com o aumento da concentração de nutrientes, ocorre a aceleração da produtividade de algas e o crescimento da produção orgânica, resultando na elevação da biomassa de fitoplâncton e, conseqüentemente, na diminuição da penetração de luz. Com isso, a taxa de decomposição e o consumo de oxigênio dissolvido pelos peixes podem resultar na produção de metano e gás sulfídrico no meio. Além disso, nessa fase, pode-se ter uma maior produção de matéria orgânica do que o sistema consegue consumir e decompor, gerando fortes mudanças no metabolismo do ecossistema e nas concentrações de oxigênio

dissolvido nas camadas superiores, o que oferece altos riscos aos peixes (MACEDO; SIPAÚBA-TAVARES, 2010).

Sendo assim, uma das variáveis mais importantes para a piscicultura e para sistemas hídricos é o oxigênio dissolvido. O problema da deficiência de oxigênio dissolvido em tanques de criação de peixes de água doce mostra-se uma grande ameaça e um dos fatores limitantes da aquicultura intensiva, pois o esgotamento do oxigênio dissolvido compromete o crescimento e a produção dos peixes (SULTANA *et al.*, 2017). Desse modo, o monitoramento e a manutenção dessa variável se fazem essenciais para os sistemas de piscicultura, devendo-se investir esforços para o desenvolvimento de sistemas de aeração eficientes e de baixo custo construtivo e de consumo energético. Pensando nisso, a presente monografia visou a análise da eficiência do tratamento de um efluente de piscicultura por meio de um jardim filtrante, bem como a avaliação da eficiência do sistema de aeração aplicado no jardim em questão.

## **I.II OBJETIVOS DA PESQUISA**

A presente pesquisa teve como objetivos: **(i)** Analisar as variáveis limnológicas do Jardim Filtrante, a partir das variáveis potencial hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE), Oxigênio Dissolvido (OD), Turbidez, Temperatura e Clorofila A; e **(ii)** Analisar a eficiência do sistema de aeração por gravidade através de quedas d'água, a partir do coeficiente de eficiência (K).

## **I.III. ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA**

A seguir são apresentados os métodos em comum para todos os capítulos da dissertação, sendo a metodologia específica para cada capítulo descrita nas seções dos mesmos.

### **I.III.I ÁREA DE ESTUDO**

O Jardim Filtrante em questão está localizado no Sítio São João, ao sul do município de São Carlos (22°09'16.1"S 47°50'49.0"W). A propriedade pertence à

Bacia do Ribeirão Feijão, sendo uma das principais bacias responsáveis pelo abastecimento de água da cidade, fornecendo 27% do total de água consumida pelo município (MACHADO; DUPAS, 2013; SAAE, 2020). Ademais, o clima de São Carlos é caracterizado como tropical com verão úmido e inverno seco, onde os maiores volumes de precipitação são comuns nos meses de outubro a março, sendo janeiro o mês mais chuvoso (COSTA, 2018).

A Figura 1 apresenta o lago (B) e o Jardim Filtrante (A) a serem estudados. O lago de piscicultura possui aproximadamente 600 m<sup>3</sup>, impermeabilizado com membrana de PVC. Sua utilização se dá principalmente para o cultivo de tilápias, onde os visitantes podem aderir ao sistema de pesque-pague.

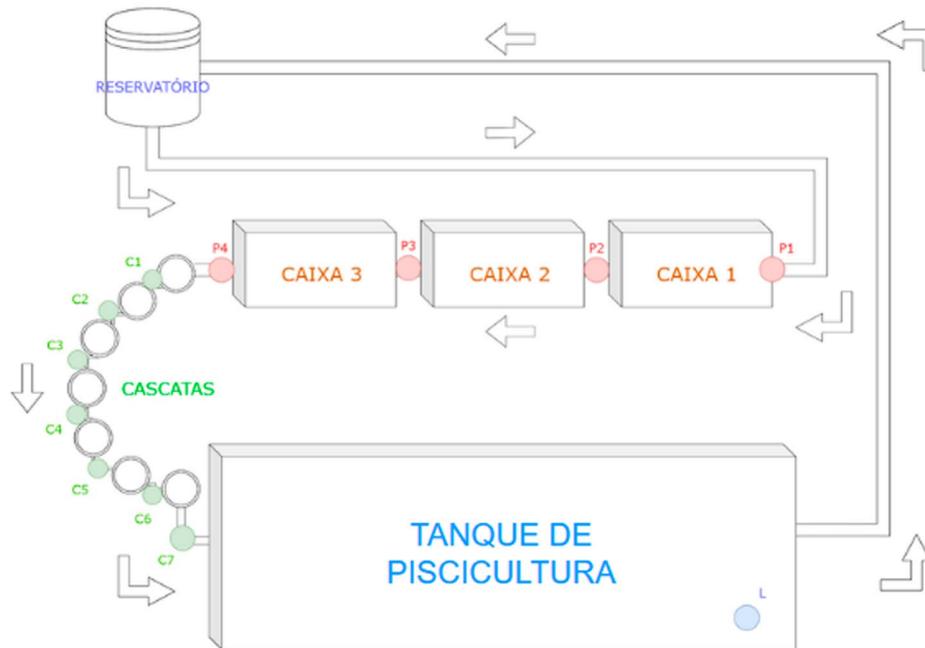
**Figura 1** – Imagem de satélite do Sítio São João. (A) Sistema piloto e (B) Lago artificial.



Fonte: Google maps, 2019.

O Jardim Filtrante, por sua vez, foi construído sobre o solo, apresentando um fluxo contínuo vertical e subsuperficial. A Figura 2 apresenta o esquema do Jardim, bem como seus componentes.

**Figura 2** – Croqui do Jardim Filtrante.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Jardim possui três caixas de madeira (4,0 x 2,0 x 0,3 m – C x L x P, respectivamente, cada caixa) impermeabilizadas com membrana de PVC, em série, com um desnível de 5 cm entre cada tanque. As caixas foram preenchidas com argila expandida e saturadas com água. O volume intersticial de cada caixa (volume total da caixa subtraído do volume da argila expandida) foi determinado em 0,76 m<sup>3</sup>, o que definiu um volume útil total do sistema de 2,28 m<sup>3</sup>. Em cada caixa, foram plantadas 80 mudas de Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*). Para melhor desenvolvimento das plantas, fez-se uma cobertura com sombrite, com 50% de sombreamento. O funcionamento do sistema, como um todo, se dá da seguinte forma: 1 – O efluente do lago é coletado por uma tubulação, onde é bombeado e direcionado ao reservatório, a fim de equalizar a pressão. 2 – Com a declividade do terreno e a pressão da água armazenada, o efluente é direcionado para a caixa 1 do jardim, passando por todas as caixas em série. O tempo de residência é de aproximadamente 7 horas. 3 – Após sair da terceira caixa, a água passa por 7 baldes de aeração (cascatas), com 19 litros totais cada, 4,75 litros úteis, e um desnível de 25 cm entre cada balde. 4 – Pela gravidade, a água retorna ao lago de piscicultura.

As caixas utilizadas no Jardim são preenchidas por argila expandida. As macrófitas utilizadas no sistema são da espécie *Zantedeschia aethiopica*, conhecidas popularmente como Copo de Leite. Inicialmente, foi possível observar que as macrófitas estavam diminuindo consideravelmente em cada caixa, sendo mais predominantes na primeira. Contudo, mesmo na primeira caixa, as plantas não apresentavam flores e estavam morrendo facilmente.

Para tentar mitigar esse problema, recentemente um sombreamento foi instalado nas três caixas a fim de diminuir a temperatura nas caixas. Foi possível observar visualmente a melhora nas condições das macrófitas, as quais nascem abundantemente em todas as caixas e apresentam flores (Figura 3).

**Figura 3** – Copos-de-leite do Jardim Filtrante após sombreamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

### I.III.II CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Gil (1999), o principal objetivo da pesquisa científica é descobrir respostas para os problemas existentes, fazendo uso de procedimentos científicos, sendo a escolha desse procedimento determinante para a forma que será realizada a coleta de dados. Assim, o Quadro 1 contém as classificações da pesquisa adotadas no trabalho.

**Quadro 1** – Classificação da pesquisa.

| <b>Classificação da Pesquisa</b>                    | <b>Tipo de Pesquisa</b> | <b>Descrição na pesquisa</b>  |
|---|-------------------------|---|
| Do ponto de vista de sua natureza                   | Aplicada                | Aplicação dos conhecimentos obtidos a fim de solucionar os problemas descritos ao longo da pesquisa.  |
| Do ponto de vista da forma de abordagem do problema | Qualitativa             | Revisão da literatura.  |
|   | Quantitativa            | Análise quantitativa da oxigenação da água.   |
| Do ponto de vista de seus objetivos                 | Exploratória            | Levantamento bibliográfico acerca da oxigenação da água para piscicultura; e análise de exemplos da literatura que auxiliem na compreensão do tema. |
|   | Descritiva              | Descrição das características da área de estudo, pertinentes à pesquisa.  |
|   | Analítica               | Análise do potencial de reoxigenação e de eficiência do sistema   |
| Do ponto de vista de procedimentos técnicos         | Pesquisa Teórica        | Revisão bibliográfica em periódicos científicos, livros, relatórios técnicos, cartilhas institucionais, entre outros.                               |
|   | Levantamento de dados   | Coleta de dados em campo.   |

Fonte: Adaptado de SILVA; MENEZES, 2005.

Para alcançar os objetivos propostos no projeto, etapas descritas a seguir foram cumpridas.

### I.III.III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura é o passo inicial para o desenvolvimento satisfatório do conhecimento científico, possibilitando o levantamento das informações já existentes, dando suporte e rigor às pesquisas (PINTO, 2019). Assim, a revisão bibliográfica facilita a identificação das lacunas ainda existentes no “estado da arte” de temas específicos, evitando, portanto, a repetição de pesquisas, direcionando-as de forma mais eficiente (BIOLCHINI *et al.*, 2005).

Para tanto, o levantamento bibliográfico foi realizado principalmente em artigos e livros retirados das plataformas de pesquisa: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Scielo (*Scientific Electronic Library Online*) e *Science Direct*.

Como estratégias de busca, foram utilizadas as palavras-chave: jardim filtrante, água de reúso, *wetlands* construídas, variáveis ambientais, qualidade da água, piscicultura, oxigenação, reoxigenação, aquicultura, balanço de oxigênio, coeficiente de oxigenação; e aeradores. As pesquisas foram realizadas nos idiomas português e

inglês, com o período de busca entre os anos 2010 a 2020, levando-se em consideração todos os tipos de documentos (periódicos científicos, livros, relatórios técnicos, cartilhas institucionais, entre outros).

## **CAPÍTULO 2**

### **II. Análise das variáveis limnológicas do jardim filtrante**

## II.1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento observado no setor da aquicultura nos últimos anos acompanha a preocupação com a demanda pela água, visto que, para produzir 1 kg de peixe são necessários, em média, 200 a 600 m<sup>3</sup> de água (EFFENDI *et al.*, 2018). Além disso, o efluente gerado por essa atividade inclui nutrientes e diversos compostos orgânicos e inorgânicos (amônia, fósforo, carbono orgânico dissolvido) que em altas concentrações podem deteriorar os corpos hídricos receptores (ENDUT *et al.*, 2011).

Uma alternativa para tratar os efluentes da aquicultura é o Jardim Filtrante (JF), também conhecido internacionalmente como *Wetland* Construída. Essa tecnologia é amplamente utilizada para o tratamento de efluentes domésticos por conta do seu baixo custo de operação, fácil manutenção e por não dependerem da utilização de energia fóssil (ZHANG *et al.*, 2010; SAEED; SUN, 2012), promovendo a remoção eficiente de nutrientes e componentes tóxicos da água por meio de macrófitas aquáticas e cascalho ou solo para realizar o tratamento (SAEED; SUN, 2012; MEI *et al.*, 2014).

A utilização de plantas para o tratamento dos efluentes é essencial para o funcionamento do Jardim, pois as macrófitas proporcionam uma superfície para que os filmes microbianos, principais responsáveis pelo tratamento, possam se estabelecer (SILVA, 2007; EFFENDI *et al.*, 2018). Além disso, as plantas podem remover e acumular os contaminantes do meio (fitorremediação), podendo ser usadas para mitigar, transferir, estabilizar ou degradar poluentes no solo e na água (OJOAWO; UDAYAKUMAR; NAIK, 2015).

Com isso, a macrófita escolhida para o sistema foi o Copo-de-leite (*Zantedeschia aethiopica* (L) Spreng). Essa planta ornamental é nativa da África do Sul (PELO, 2016), mas, apesar de ser uma planta exótica, sua seleção se deu pela possibilidade de o produtor vender as mudas, o que representa mais um diferencial do jardim filtrante em questão.

Nesse contexto, o capítulo 2 teve como objetivo analisar a performance de um jardim filtrante de fluxo vertical subsuperficial localizado no Sítio São João, em São Carlos/SP; no tratamento de um efluente oriundo de um tanque de piscicultura com recirculação de água, por meio da análise dos indicadores: pH, Temperatura, Clorofila A, Condutividade Elétrica (CE), Turbidez e Oxigênio Dissolvido (OD).

## II.II OBJETIVOS

Esse capítulo teve como objetivos: **(i)** Coletar dados das variáveis referentes à qualidade da água no Jardim Filtrante; **(ii)** Tratar estatisticamente os dados coletados; e **(iii)** Verificar a eficiência do Jardim baseado nas variáveis limnológicas.

## II.III. REFERENCIAL TEÓRICO

### II.III.I WETLANDS CONSTRUÍDAS

*Wetland* construída (WC), ou Jardim Filtrante, é considerado um ecossistema artificial com tecnologia avançada e de baixo custo (SILVA, 2007; OLIVEIRA, 2014), cujo objetivo principal está na melhoria da qualidade dos efluentes, podendo ser reaproveitado para atividades de irrigação, piscicultura, campos, entre outros; oferecendo, ainda, forte vantagem econômica para pequenos agricultores (SILVA, 2007; SAEED; SUN, 2012).

Por ser um processo natural, que busca se assemelhar ao funcionamento de áreas úmidas naturais, essa tecnologia vem crescendo e sendo cada vez mais reconhecida internacionalmente (MANGO et al., 2017; GARCÍA-ÁVILA et al., 2019). Seu funcionamento é baseado no princípio de solo úmido cultivado, utilizando o solo e as raízes das plantas como meio para despoluir as águas por meio de processos biológicos, físicos e químicos (ZHANG et al., 2010).

Para os processos físicos nas WCs, têm-se: filtração, sedimentação, adsorção por força de Van Der Waals, e volatilização da amônia; para os processos químicos, têm-se: a adsorção dos componentes solúveis e em suspensão no substrato ou em superfícies das plantas, a decomposição e a oxidação e redução de metais. Por fim, para os processos biológicos, têm-se: metabolismo das bactérias, nitrificação, desnitrificação, metabolismo vegetal, e assimilação de nutrientes (DIAS et al., 2010; SILVA, 2007).

Entre as vantagens das WCs, os custos de construção e operação relativamente baixos se destacam (KOOTTATEP et al., 2001; DUARTE, 2002; IEA, 2004; ORIMOLOYE et al., 2018; GARCÍA-ÁVILA et al., 2019). Além dessa vantagem, menciona-se: fácil manutenção, não consome energia nem produtos químicos, reduz a matéria orgânica, oferece a possibilidade de reciclagem, reutilização e a valorização

dos efluentes, remove satisfatoriamente a matéria orgânica, os sólidos suspensos, o nitrogênio e o fósforo (CHERNICHARO, 2001; BENASSI, 2018).

### II.III.I.I COMPONENTES

As WCs possuem três componentes: o material suporte ou substrato, as macrófitas aquáticas e a comunidade microbológica; sendo o tratamento realizado por meio da interação física, química e biológica desses componentes com o efluente. As características de cada componente estão descritas a seguir.

- Substrato/Meio de suporte

O substrato nas WCs é o meio onde a maioria dos processos químicos e biológicos das wetlands construídas ocorrem, atribuindo-os, portanto, diversas funções, como meio de suporte para a instalação das macrófitas, ou até mesmo como filtro para reter os sólidos suspensos provenientes do efluente (VYMAZAL, 2002). A umidade no meio de suporte após entrar em contato com o efluente propicia a proliferação de microrganismos que acabam por se desenvolver e fixar no local, ficando em contato com o fluido constantemente, contribuindo com o tratamento da água (WOOD, 1995).

Há vários tipos de substratos que podem ser utilizados, como areia, cascalho, pedra, solo, entre outros (SANCHEZ, 2017). A escolha do substrato depende do tipo de escoamento e da remoção de poluentes esperada, não sendo recomendado apenas o uso de um substrato com alto teor de argila, visto que os poluentes tendem a acumular-se no mesmo e serão liberados novamente para o efluente após a saturação (DUARTE, 2002).

Ademais, Silva (2007) realizou um experimento granulométrico com diversas misturas de solo utilizando ou não um defloculante, o qual simula o processo que ocorre quando o esgoto é utilizado na WC. Como resultado, observou que o uso de solo com alto teor de argila propiciou a rápida colmatação do solo, reduzindo sua permeabilidade. Contudo, a argila e a matéria orgânica têm boa capacidade de troca catiônica, sendo interessante incorporá-la em quantidades pequenas a fim de aumentar a capacidade de troca catiônica no Jardim (SILVA, 2007).

Por outro lado, o manual de Tratamento de *Wetlands* Construídas de Águas Residuais Municipais não recomenda o uso de meios de suporte muito finos, pois entopem fácil e não mantêm a condutividade hidráulica alta (USEPA, 2000). Recomenda-se, portanto, o uso de cascalho e pedras (brita) de granulometrias diversas, entre 20 a 30 mm na zona de tratamento e 40 a 80 mm nas zonas de entrada, saída e tubulações (MACHADO *et al.*, 2016).

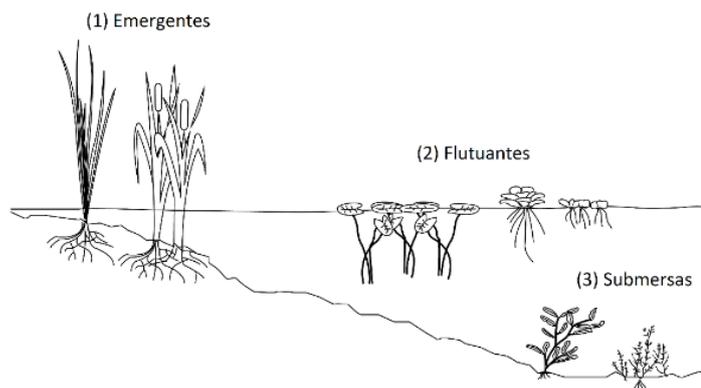
- Macrófitas aquáticas

O papel das plantas é fundamental para o funcionamento efetivo do jardim filtrante, pois fornecem a ligação de filmes microbianos; contribuem na filtração e adsorção dos efluentes; transferem oxigênio para o meio utilizando os rizomas e as raízes; e proporcionam o isolamento térmico (SILVA, 2007). Outrossim, além de realizarem a ciclagem dos nutrientes, a sombra das macrófitas impede o crescimento de algas sob o meio de suporte (KADLEC; WALLACE, 2008). Existem três grupos principais de macrófitas aquáticas, sendo eles descritos a seguir e apresentados na Figura 4.

- Submersas: Enraizadas no substrato, mantendo-se submersas na água, por vezes podendo possuir folhas flutuantes (SANCHEZ, 2017). As espécies mais utilizadas nos jardins filtrantes são: *Elodea canadensis*, *Elodea nuttallii*, *Ceratophyllum Demersum*, *Hydrilla verticillata*, *Cabomba Caroliniana*, *Myriophyllum heterophyllum*, *Potamogeton* spp (SILVA 2007);
- Livres flutuantes: Essas macrófitas possuem as raízes suspensas, sem enraizar no substrato, e podem ser encontradas submersas ou na superfície, movendo-se conforme a corrente d'água (USEPA, 2000). Essas plantas preferem ambientes com baixo fluxo de água e protegidos, sendo, portanto, restritivas (VYMAZAL, 2002). As espécies e os gêneros mais comuns utilizados são: *Eichhornia crassipes*, *Lemna*, *Hydrodictyon*, *Reticulatum L.*, *Scenedesmus acuminatus*, *Spirodela sp*, *Wolffia arrhiza*, *Azolla caroliniana* (SILVA, 2007).
- Emergentes: As macrófitas aquáticas emergentes se enraízam ao substrato e possuem caules e folhas aéreas, mantendo-as fora da água (SANCHEZ, 2017). Esse tipo de plantas são as mais utilizadas nos jardins filtrantes de fluxo

subsuperficial, pois adaptam-se tanto a substratos úmidos quanto para substratos totalmente saturados. As macrófitas desse tipo que são mais utilizadas nas *wetlands* construídas são: *Typha sp.* e *Eleocharis sp* (SILVA, 2007; SANCHEZ, 2017).

**Figura 4** – Tipos de macrófitas aquáticas.



Fonte: SANCHEZ, 2017.

- Comunidade microbiológica

A comunidade microbiológica nas WCs são as principais responsáveis por degradar os poluentes nas zonas das raízes, decompondo a matéria orgânica, ativando os processos biogeoquímicos e atuando em outros microrganismos (SILVA, 2007). As bactérias, tanto aeróbias quanto anaeróbias, são os microrganismos de maior abundância nas WCs, apesar de também ser bastante comum a presença de fungos (DAVIS, 1994).

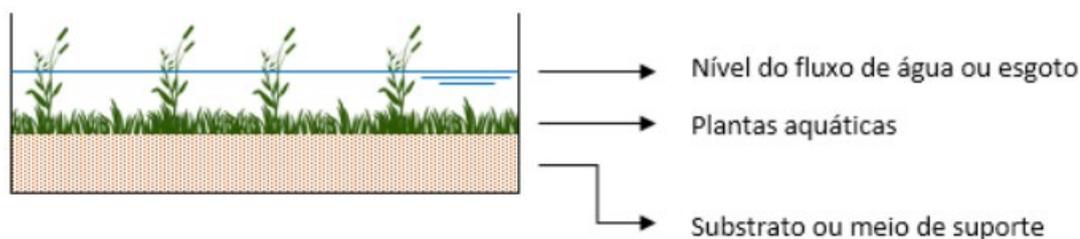
A disposição dos microrganismos é relativamente homogênea e com pouca diversidade, se desenvolvendo predominantemente presa às raízes e aos rizomas das macrófitas aquáticas, formando assim o biofilme (TRUU; JUHAHSON; TRUU, 2009). Ademais, o papel desempenhado pelos microrganismos nas CWs está associado à mineralização da matéria orgânica e do fósforo orgânico, bem como na conversão do nitrogênio em suas diversas formas, que podem ocorrer dependendo da disponibilidade de oxigênio e do acceptor de elétrons disponíveis no meio (WOOD, 1995).

## II.III.I.II CLASSIFICAÇÃO

As WCs podem ser separadas em dois tipos de acordo com o fluxo: superficial e subsuperficial, podendo esta última ser vertical, horizontal ou híbrida (SPERLING, 2016; BENASSI, 2018). Nos itens abaixo são exploradas as características de cada tipo.

- Wetland Construída de Fluxo Superficial (WCFS): Nesse tipo, o material de suporte encontra-se constantemente saturado e com o fluxo de água raso e de baixa velocidade percorrendo pela superfície (Figura 5) (SANCHEZ, 2017). Essas condições são adequadas para o estabelecimento de diversas macrófitas, sejam elas submersas, flutuantes ou emergentes. Esse tipo de WC, apesar de se aproximar dos naturais, é pouco utilizado (TRUU; JUHANSON; TRUU, 2009; SAEED; SUN, 2012). Ademais, sua utilização é recomendada para o tratamento terciário da água, com foco na remoção do fósforo (BENASSI, 2018).

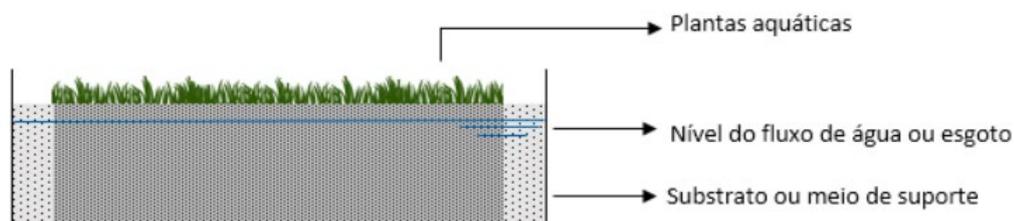
**Figura 5** – Representação de uma *wetland* construída de fluxo superficial.



Fonte: SANCHEZ, 2017.

- Wetland Construída de Fluxo Subsuperficial (WCFSS): Nesse caso, o fluxo da água percorre entre os poros do material filtrante, sob a superfície do leito plantado, fazendo com que o fluido entre em contato apenas com as raízes e os rizomas das macrófitas (Figura 6) (SANCHEZ, 2017). As plantas utilizadas nesse sistema são utilizadas macrófitas enraizadas no material suporte (TRUU; JUHANSON; TRUU, 2009; SAEED; SUN, 2012).

**Figura 6** – Representação de uma *wetland* construída de fluxo subsuperficial.

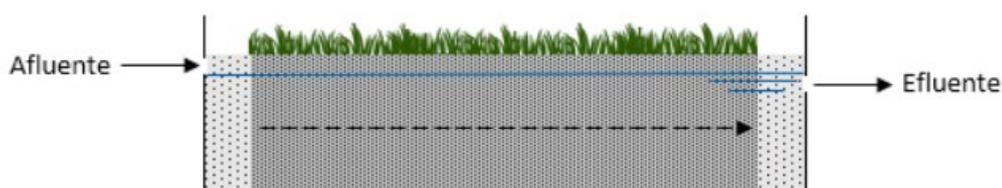


Fonte: SANCHEZ, 2017.

Dentro desse grupo têm-se dois tipos de WC de acordo com a direção do fluxo: vertical ou horizontal, como descrito a seguir.

- Fluxo subsuperficial horizontal (FH): O efluente é inserido pela entrada e percola horizontalmente pelo meio de suporte até atingir a saída, sendo coletado por um dispositivo de controle de nível (Figura 7), fazendo com que a água passe por zonas aeróbias, anaeróbias e anóxicas (SAEED; SUN, 2012; SANCHEZ, 2017). A principal vantagem desse tipo é a remoção de sólidos suspensos, de matéria orgânica e de patógenos (VYMAZAL, 2011). Uma desvantagem das WCFSSV é a possibilidade de entupimento do material filtrante, podendo isso ser evitado com a utilização de unidades de pré-tratamento (VYMAZAL, 2011).

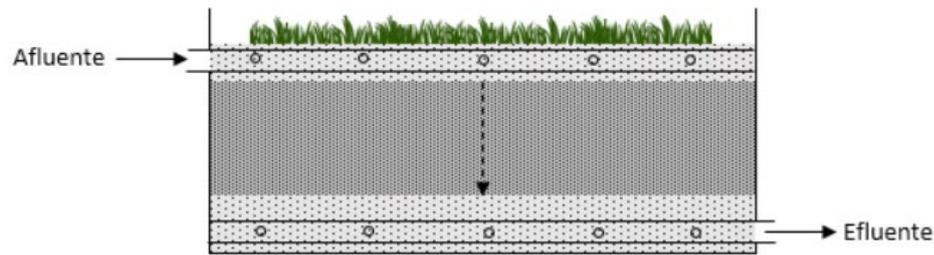
**Figura 7** – Representação de uma *wetland* construída de fluxo subsuperficial horizontal.



Fonte: SANCHEZ, 2017.

- Fluxo subsuperficial vertical (FV): No fluxo vertical, o efluente escoava verticalmente entre os espaços do material suporte, atingindo o fundo do leito onde é coletado por uma rede de drenagem (Figura 8) (Sanchez, 2017). A principal vantagem nesse tipo de WC é o aumento da capacidade de transferência do oxigênio atmosférico para o sistema, auxiliando na remoção da matéria orgânica e na nitrificação (COOPER, 1999; SILVA, 2007).

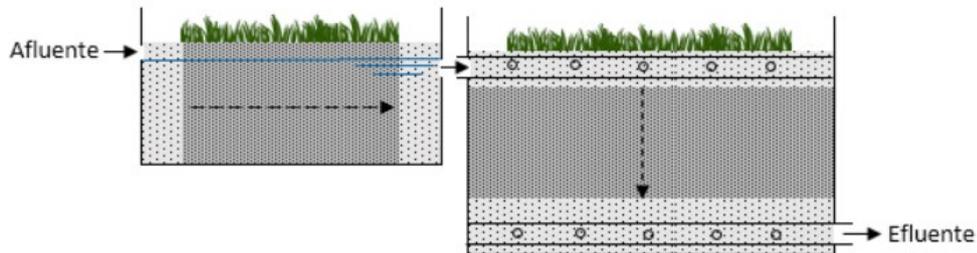
**Figura 8** – Representação de uma *wetland* construída de fluxo subsuperficial vertical.



Fonte: SANCHEZ, 2017.

- Fluxo subsuperficial híbrido (FH e FV): Tem-se, ainda, a WC de fluxo subsuperficial híbrida, o qual combina as vantagens dos dois sistemas de forma a melhorar a eficiência do tratamento do efluente (Figura 9) (SILVA, 2007; SANCHEZ, 2017). Como vantagens, há a possibilidade de remoção de DBO e sólidos suspensos totais; pode ocorrer a nitrificação completa; e a remoção considerável de nitrato (Cooper *et al.*, 1999).

**Figura 9** – Representação de uma *wetland* construída de fluxo subsuperficial híbrido.



Fonte: SANCHEZ, 2017.

## II.III.II *ZANTEDESCHIA AETHIOPICA (L) SPRENG*

*Zantedeschia aethiopica* (Figura 10), popularmente conhecida como Copo-de-leite, faz parte da família *Araceae*, da ordem *Alismatales* e da sub-família *Philodendroidea* (WEI *et al.*, 2012). É uma planta ornamental nativa da África do Sul, sendo perene e crescendo em condições pantanosas durante todo o ano (PELO, 2016).

**Figura 10** – *Zantedeschia aethiopica*.



Fonte: Vivadecora (2019). Disponível em: <https://www.vivadecora.com.br/revista/copo-de-leite/>.

Essa macrófita difere-se de outras plantas pela sua capacidade de sobrevivência em climas frios, sendo sensível a climas quentes (ALVARENGA *et al.*, 2008; PELO, 2016; MATTOS, 2019). Pela sua aparência, é a segunda planta mais exportada com aumento significativo da demanda internacional (HALLIGAN *et al.*, 2004; WEI *et al.*, 2012; PELO, 2016).

*Z. aethiopica*, além de ter propriedades medicinais, sendo considerada extremamente valiosa na África do sul, é uma importante fonte de alimentação na África, Ásia, Austrália, Europa e Estados Unidos da América, mostrando-se também com capacidade de limpar água e solos contaminados (SANDOVAL *et al.*, 2018).

## **II.IV MATERIAIS E MÉTODO**

### **II.IV.I COLETA DE DADOS**

Foram realizadas nove coletas no período da manhã entre os dias 13/09/2019 e 13/11/2020 utilizando a sonda multiparâmetro, da marca AQUAS INC., modelo MAX 2. Os pontos coletados foram: um ponto dentro do tanque de piscicultura (L), quatro pontos no subsistema P, sendo eles: P1 (antes da 1ª caixa), P2 (antes da 2ª caixa), P3 (antes da 3ª caixa), e P4 (antes da 4ª caixa); e sete no subsistema C, antes de cada balde de aeração e após o último balde. A divisão do sistema do Jardim Filtrante em dois subsistemas foi escolhida para facilitar a análise estatística e a interpretação dos resultados, uma vez que suas características físico-químicas e biológicas se

diferem consideravelmente. O subsistema P refere-se ao jardim filtrante, considerando as três caixas impermeabilizadas em série, composto pelos pontos P1, P2, P3 e P4 (Figura 2). O subsistema C diz respeito às cascatas de aeração, representadas pelos pontos C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7 (Figura 2).

As análises foram realizadas levando em consideração as variáveis limnológicas: Potencial Hidrogeniônico (pH), Temperatura, Clorofila A, Condutividade Elétrica (CE), Oxigênio Dissolvido (OD), e Turbidez.

#### II.IV.II ANÁLISE DAS VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS

Realizou-se, para ambos subsistemas, os testes não-paramétricos de Friedman e Wilcoxon por meio do *software* R, considerando o grau de confiança de 95% ( $\alpha=0,05$ ), a fim de verificar o comportamento de cada variável dentro dos subsistemas. Ademais, realizou-se a comparação das variáveis no lago de piscicultura (L) e após o jardim (P4 e C7) com a resolução CONAMA nº 357/05, considerando os padrões de qualidade de água doce, classe 1 (classe especial para águas destinadas à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas) (BRASIL, 2005); e com dados encontrados na literatura sobre recomendação do limite para as tilápias. Cabe ressaltar que se não fosse feito o reúso das águas para o tanque de piscicultura e o efluente fosse destinado a corpos d'água receptores, seria levado em consideração a resolução CONAMA nº 430/2011. Contudo, para os propósitos desse trabalho, a resolução CONAMA nº 357/05 mostrou-se a mais adequada.

#### II.IV.III EFICIÊNCIA DO JARDIM FILTRANTE

Por fim, o objetivo específico “Verificar a eficiência do Jardim baseado nas variáveis limnológicas” foi realizado por meio da comparação dos resultados obtidos com a literatura, sendo, portanto, uma análise quanti-qualitativa, permitindo um melhor entendimento sobre o comportamento das variáveis e da eficiência do Jardim.

## II.V RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado da comparação dos pontos P4 e C7 do sistema do Jardim, tem-se a Tabela 1 abaixo.

**Tabela 1** – Comparação das variáveis de qualidade da água.

| Variáveis          | L<br>(média) | P4<br>(média) | C7<br>(média) | CONAMA n°<br>357/05 | Limite  |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|---|
| Temperatura (°C)   | 25,2         | 27,1          | 25,4          | -                   | 11 - 42 (FAO, 2020)                             |
| Turbidez (NTU)     | 44,7         | 21,9          | 21,6          | até 40,00           | -   |
| pH                 | 6,85         | 6,5           | 6,9           | entre 6,0 - 9,0     | 6,0 - 9,0 (POPMA; MASSER, 1999)                 |
| OD (mg/L)          | 5,8          | 1,70          | 6,5           | ≥ 6,0               | 5,0 - Saturação (SILVA; FERREIRA; LOGATO, 2001) |
| Clorofila A (µg/L) | 95,62        | 56,5          | 67,4          | até 10,0            | -   |
| CE (µS/cm)         | 38,7         | 48            | 51            | -                   | Recomendado: 120 - 500 (EEEP, 2011)             |

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Observando a Tabela 1, é possível afirmar que a temperatura não varia consideravelmente entre os pontos L, P4 e C7, mas diminui suavemente ao longo das cascatas de aeração, mantendo-se na faixa recomendada para a criação de tilápias. Outrossim, a temperatura entre 21,8 °C e 26,7 °C é adequada para uma remoção eficiente da matéria orgânica (BOHORQUEZ; PAREDES; ARIAS, 2017; GARCÍA-ÁVILA *et al.*, 2019), embora esta determinação não tenha sido realizada no jardim em questão.

A turbidez apresenta uma grande variação entre o ponto L e os pontos P4 e C7, ultrapassando o recomendado pela CONAMA n° 357/05 no ponto L. Uma das causas para esse aumento pode estar relacionada ao resultado dos sistemas de criação de organismos aquáticos, com o aumento dos nutrientes no sistema, influenciando no crescimento da produtividade de algas, o que aumenta a turbidez biogênica da água (MACEDO; SIPAÚBA-TAVARES, 2010).

O pH manteve-se na faixa recomendada nos pontos observados, sem apresentar grande variação. O valor entre 6,5 e 6,9 caracteriza um ambiente levemente ácido, mas ideal para o crescimento ótimo da tilápia (DELONG; LOSORDO; RAKOCY, 2009). Segundo García-Ávila *et al.* (2019), a leve diminuição

do pH após o Jardim pode estar relacionada à produção de substâncias orgânicas que acabam acidificando o meio como resultado da atividade microbiana na biomassa em decomposição, bem como pela mineralização do material orgânico, gerando  $\text{CO}_2$  em equilíbrio químico com ácido carbônico no meio aquoso. Ainda segundo os autores, esse comportamento também pode estar associado com a degradação da matéria orgânica, onde as bactérias heterotróficas produzem ácido acético, ácido láctico e ácido butírico.

No caso do OD, uma das variáveis mais importantes para a criação dos peixes, observou-se uma grande diferença entre os pontos L e C7 com o ponto P4. Essa diminuição do OD após o Jardim está associada ao consumo do oxigênio para a transformação de amônia ( $\text{NH}_3$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no subsistema P, bem como devido ao trecho que liga o ponto L ao subsistema P, que é composto por tubulações e um reservatório fechado, sem o recebimento de luz. Dessa forma, há apenas o consumo de OD, sem elementos que contribuam para sua produção.

Contudo, após a passagem pelas cascatas de aeração, as quais transferem o oxigênio atmosférico para a água por difusão (VIEIRA, 2020), observa-se o aumento do OD a ponto de alcançar a faixa sugerida pelo CONAMA nº 357 e pelo recomendado pela literatura. Silva, Ferreira e Logato (2001) afirmam que o OD mínimo recomendado é de 5,0 mg/L para um crescimento ótimo dos peixes.

A Clorofila A é um indicador de produtividade primária e do estado trófico de um ambiente aquático (BEVILACQUA *et al.*, 2006), sendo isso também estimado pelo OD. Ao comparar os valores do Quadro 1, é possível observar que os pontos L, P4 e C7 encontram-se acima do recomendado pela CONAMA nº 357/05.

Por fim, no caso da CE, pode-se observar que há um aumento após a saída do Jardim (P4) e após as cascatas de aeração (C7). Sabe-se que essa variável é um indicador da produção primária e, portanto, da produção de peixes (BHATNAGAR; DEVI, 2013). A condutividade é diretamente proporcional à concentração de íons dissolvidos, sendo o aumento observado um indicativo de que o Jardim apresenta baixa capacidade de remoção dos mesmos (STONE; THOMFORDE, 2004). A produção destes íons deve estar ocorrendo via degradação biológica da matéria orgânica, principalmente dos resíduos de ração e excreta dos peixes.

## II.V.I SUBSISTEMA P

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes de Friedman e Wilcoxon, bem como onde encontram-se as diferenças, quando as mesmas foram identificadas. Vale ressaltar que o resultado do teste de Friedman mostra se há evidências de diferenças significativas entre os dados analisados ( $\alpha \leq 0,05$ ). Com isso, é realizado o teste de Wilcoxon, sendo possível observar onde encontram-se as diferenças.

**Tabela 2** – Resultado do teste de Friedman e Wilcoxon no subsistema P.

| Variável                | Friedman      | Wilcoxon                           |
|-------------------------|---------------|------------------------------------|
| Temperatura (°C)        | <b>0.876</b>  | -                                  |
| pH                      | <b>0.599</b>  | -                                  |
| CE ( $\mu\text{S/cm}$ ) | <b>0,0004</b> | Diferença com tendência a aumentar |
| OD (mg/L)               | <b>0,114</b>  | -                                  |
| Turbidez                | <b>0.0396</b> | Diferença com tendência a diminuir |
| Clorofila A             | <b>0,781</b>  | -                                  |

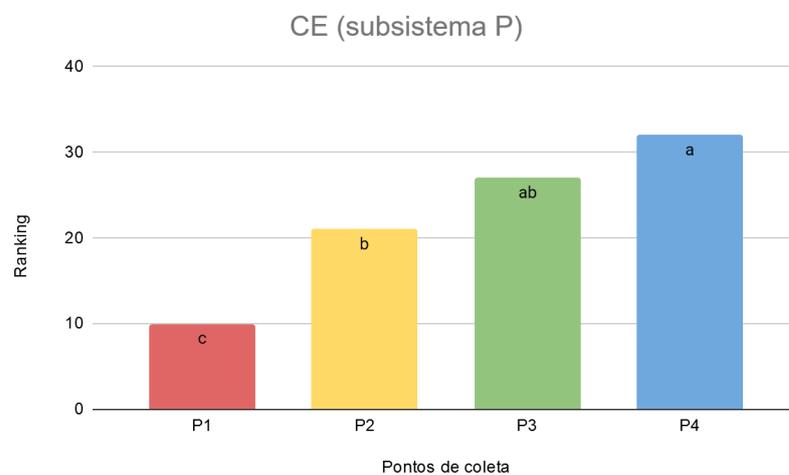
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Assim, é possível inferir que há evidências de que exista diferença significativa na Condutividade Elétrica, onde a diferença foi observada em todos os pontos (Gráfico 1); e na turbidez, com diferença significativa entre P1, P3 e P4; e P2 e P4 (Gráfico 2). Observando o Gráfico 1, é possível afirmar que a partir do Ponto 1 há uma tendência a aumentar a CE dentro do Subsistema P, o que indica que o Jardim possui baixa capacidade de remoção dos sólidos totais dissolvidos (BHATNAGAR; DEVI, 2013).

Sabe-se que os valores de CE são diretamente proporcionais à concentração de íons em solução (COSTA, 2018). Ao adicionar nutrientes na água por meio da ração, os íons presentes na mistura são dissolvidos pela decomposição do material, aumentando a condutividade elétrica (BIASSIO, 2017). Com isso, esperava-se que essa variável tivesse um comportamento contrário ao observado, apresentando a redução dos sólidos dissolvidos devido a absorção de nutrientes pelas macrófitas, sendo isso representado pela diminuição da CE (SAMPAIO *et al.*, 2007; LEONEL; MARTELLI; SILVA, 2013). Andrade (2008) relata que valores altos de condutividade podem indicar uma alta taxa de decomposição, enquanto valores baixos são evidências de elevada produção primária. Dessa forma, a CE pode indicar indiretamente a disponibilidade de nutrientes.

O aumento da CE no jardim é uma limitação da tecnologia, visto que para a redução dos sais seria recomendado a instalação de uma membrana de diálise entre os pontos P4 e C1, e/ou a renovação parcial da água do sistema com certa periodicidade. Contudo, os objetivos do jardim filtrante em questão são o baixo custo e o retorno da água ao tanque de tilápias, o que inviabiliza a inclusão de tecnologias de alto custo, como a membrana de diálise. Ademais, vale ressaltar que a tilápia possui capacidade em suportar amplas variações de salinidade, permitindo sua disseminação em ambientes de água doce, salobra ou salgadas (PIMENTEL, 2006).

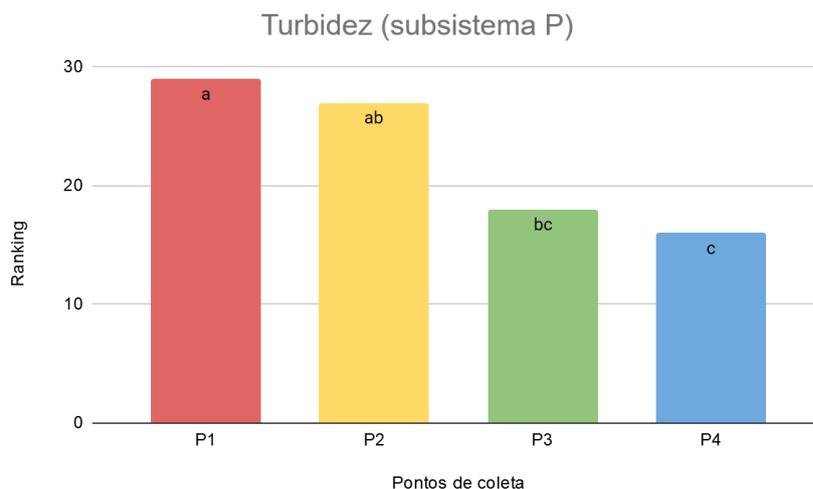
**Gráfico 1** – Resultado do teste de Wilcoxon na CE do subsistema P.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Em relação à turbidez, o Gráfico 2 apresenta a diferença entre os pontos P1, P3 e P4; e P2 e P4, com tendência a diminuir. Sabe-se que essa variável pode ser influenciada tanto por fatores abióticos, como partículas sólidas em suspensão; quanto por fatores bióticos, como algas e microrganismos (ANDRADE, 2008). De qualquer maneira, a redução da turbidez ao longo do sistema de tratamento, se mostrou coerente com o esperado.

**Gráfico 2** – Resultado do teste de Wilcoxon na turbidez do subsistema P.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## II.V.II SUBSISTEMA C

A Tabela 3 apresenta os resultados dos testes de Friedman e Wilcoxon para o subsistema C.

**Tabela 3** – Resultado do teste de Friedman e Wilcoxon no subsistema C.

| Variável    | Friedman | Wilcoxon                           |
|-------------|----------|------------------------------------|
| Temperatura | 0,00001  | Diferença com tendência a diminuir |
| pH          | 3.06e-07 | Diferença com tendência a aumentar |
| CE          | 0,328    | -                                  |
| OD (mg/L)   | 1.66e-08 | Diferença com tendência a aumentar |
| Turbidez    | 0,721    | -                                  |
| Clorofila A | 0,104    | -                                  |

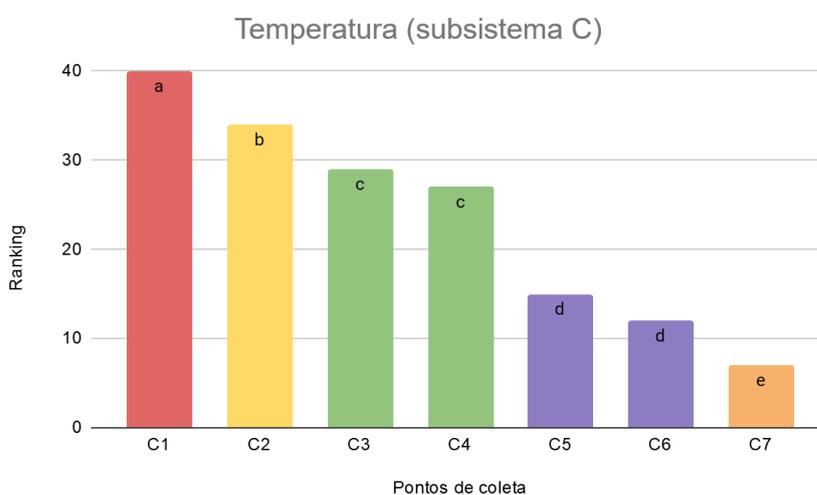
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Com os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se afirmar que apenas as variáveis CE, Turbidez e Clorofila A não apresentaram evidências de diferenças significativas ao longo das cascatas de aeração.

Em relação à temperatura, o Gráfico 3 apresenta o comportamento da variável, a qual possui uma tendência a diminuir ao longo das cascatas devido à queda entre os baldes de aeração. A temperatura e o OD (Gráfico 4) são inversamente proporcionais. À medida que a temperatura diminui, aumenta-se a solubilidade do

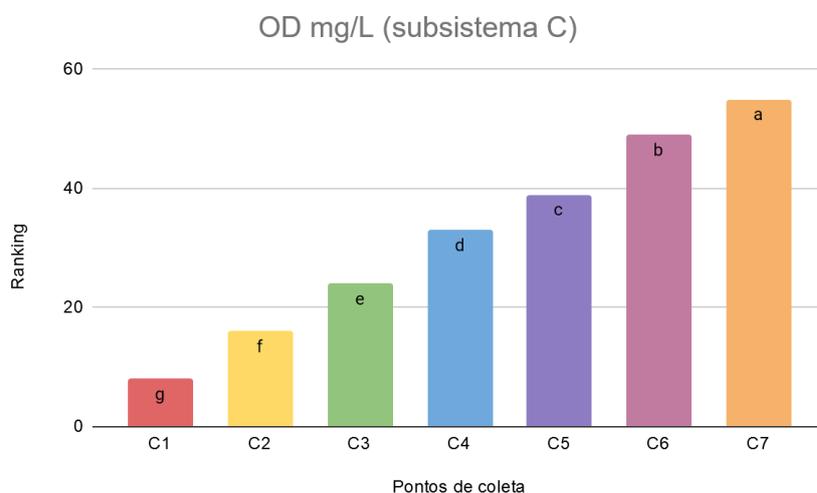
oxigênio na água (PETRUF; SACCO; LUCIO, 2011). Outro fator que pode responder o comportamento dessas duas variáveis é que, com a queda da água resultante das cascatas, além da redução da temperatura, há a transferência do oxigênio atmosférico para a água por difusão (VIEIRA, 2020). Vale ressaltar, ainda, que a água que sai do ponto P4, anterior às cascatas de aeração, apresenta baixa concentração de oxigênio dissolvido devido aos processos de degradação da matéria orgânica, sendo outro fator que explica o comportamento dessa variável.

**Gráfico 3** – Resultado do teste de Wilcoxon na temperatura no subsistema C.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

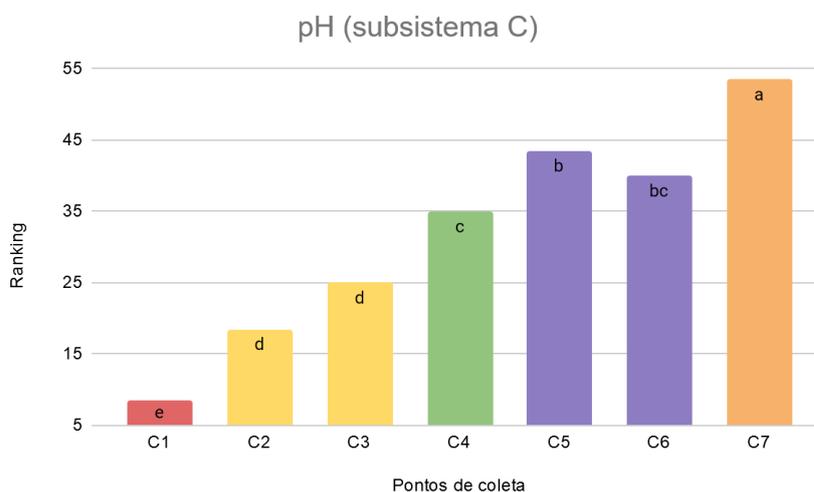
**Gráfico 4** – Resultado do teste de Wilcoxon no OD (mg/L) no subsistema C.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Por fim, para o pH, é possível observar que há uma tendência a aumentar ao longo das cascatas, com uma grande diferença entre os pontos C1 e C7 (Gráfico 5). Apesar de ter sido identificado esse aumento, a média dos dados de pH foi de 6,95, indicando um ambiente praticamente neutro, não apresentando riscos para a saúde dos peixes. Segundo Petruf, Sacco e Lucio (2011), os valores de pH podem ser influenciados pela concentração de íons H<sup>+</sup> resultantes da ionização de ácido carbônico. Além disso, o pH é diretamente influenciado pela taxa fotossintética do ecossistema, tendendo a aumentar quando esta se eleva (BUZELLI; CUNHA-SANTINO, 2013)

**Gráfico 5** – Resultado do teste de Wilcoxon no pH do subsistema C.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## II.VI CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o efluente de piscicultura tratado pelo Jardim apresenta a temperatura, a turbidez, o pH e o OD adequados para a piscicultura conforme a resolução CONAMA nº 357/05 e a literatura levantada. A CE e a Clorofila A não se enquadram no recomendado pela literatura e pela resolução em questão. Além disso, foi observado que, no subsistema P, apenas a CE e a turbidez apresentaram indícios de diferença significativa, sendo necessárias mais coletas e análises para melhor compreensão do comportamento das demais variáveis. A CE apontou, ainda, um aumento ao longo do subsistema P; enquanto a turbidez apresentou tendência a diminuir.

Já no subsistema C, o OD e a temperatura apresentaram um comportamento conforme o esperado, com um aumento significativo do oxigênio e a diminuição da temperatura, alcançando os níveis exigidos pela lei e estando de acordo com o recomendado para a criação de tilápias. O pH também apresentou diferença significativa nesse subsistema, porém manteve-se próximo à neutralidade, não apresentando riscos aos peixes.

Por fim, os dados foram coletados no período de adaptação das macrófitas aquáticas, devendo ser realizado um novo estudo para avaliar o desempenho do Jardim após o estabelecimento das plantas. Não obstante, o Jardim Filtrante apresentou potencial de aprimoramento para o tratamento adequado do efluente de piscicultura e até o momento demonstra desempenho satisfatório para o retorno da água tratada ao tanque de piscicultura.

## **CAPÍTULO 3**

### **III. Análise da eficiência de aeração por gravidade: coeficiente de eficiência (K)**

### III.I INTRODUÇÃO

O oxigênio é um elemento fundamental para a existência e para a manutenção dos organismos aeróbios. No caso dos peixes, a respiração está associada à absorção do oxigênio molecular (dissolvido) presente na água (BOYD; TUCKER, 2018). Contudo, esse elemento possui baixa solubilidade (SPERLING, 2016), sendo sua disponibilidade dependente da difusão do oxigênio presente na atmosfera para a água, ou do resultado da fotossíntese realizada pelas plantas aquáticas existentes no meio (BOYD; TUCKER, 2018).

Ao poluir um curso d'água, o impacto mais nocivo do ponto de vista ecológico, é a redução da concentração de Oxigênio Dissolvido (OD), resultado da respiração dos microrganismos responsáveis pela degradação do material orgânico (BARROS *et al.*, 2010). Segundo Sperling (2016), durante o processo de autodepuração em um corpo d'água, tem-se um balanço entre as fontes que produzem e as que consomem oxigênio. Dessa forma, quando a taxa de produção supera a de consumo, a concentração de OD tende a aumentar; assim como quando a taxa de consumo é maior que a de produção, a tendência é a concentração de OD diminuir.

No geral, o fenômeno da autodepuração está associado ao “restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes” (SPERLING, 2016, p. 136), no qual os compostos orgânicos são convertidos em compostos estáveis não prejudiciais ecologicamente (e.g. CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O) (SPERLING, 2016). Conhecer e entender o fenômeno da autodepuração é importante para utilizar adequadamente a capacidade de assimilação do meio; e para impedir o lançamento de despejos acima do que o corpo d'água suporta (SPERLING, 2016).

Dentre os principais fenômenos interagentes no processo de balanço do OD, a oxidação da matéria orgânica, a demanda bentônica e a nitrificação são responsáveis pelo consumo de oxigênio do meio; e a reaeração atmosférica e a fotossíntese são encarregadas pela produção desse elemento (SPERLING, 2016).

Em reservatórios como lagos para aquicultura, diferentemente dos corpos hídricos naturais, a manutenção de OD não é balanceada, pois há mais elementos consumidores (redutores) de oxigênio do que produtores (BEVILACQUA *et al.*, 2006). Essa situação pode se tornar crítica aos peixes principalmente no período noturno, onde a ação da fotossíntese das plantas aquáticas é suspensa (BOYD; TUCKER, 2018), podendo afetar o crescimento dos peixes visto que o consumo do oxigênio é

destinado somente à respiração e não ao crescimento (SULTANA *et al.*, 2017); ou até mesmo levá-los à morte.

Nesse sentido, diversos estudos recentes buscam analisar meios de mitigar e entender esse problema. Nos Estados Unidos, Boyd e Tucker (2018), a fim de estudar o desenvolvimento de aeradores artificiais na piscicultura, concluíram que, apesar de a disponibilidade de alimentos ser a principal responsável pela alta produção de peixes, esta está intimamente relacionada à aeração e à concentração de OD no meio. Em Bangladesh, na Ásia Meridional, Sultana *et al.* (2017) verificaram que a aeração teve influência positiva na concentração de OD em lagoas de barro voltadas para produção de peixes, além de aumentar também o tamanho e o peso dos animais.

Já na Alemanha, Oberle *et al.* (2019), no intuito de testar a viabilidade da energia fotovoltaica para a aeração de lagoas de piscicultura, constataram que a estratificação térmica em lagos rasos influencia fortemente a distribuição de oxigênio, formando diferentes camadas de temperatura no corpo d'água, inibindo a difusão deste elemento. Assim, ao romper essa estratificação, tem-se o aumento de OD no lago artificial, acabando por influenciar na concentração de oxigênio à noite.

Assim, é seguro afirmar que a aeração adequada oferece diversas oportunidades de crescimento dentro do setor de aquicultura, podendo aumentar a produtividade de pescados, bem como seu crescimento e peso, sendo essencial também para a saúde do animal (BOYD; TUCKER, 2018).

Diante do exposto, o presente capítulo teve como objetivo geral analisar o coeficiente de eficiência (K) em um sistema de piscicultura com recirculação de água proveniente de um lago artificial de tilápias que está localizado a montante de um sistema de Jardim Filtrante (JF).

Há diversas formas de regular a concentração de OD em um tanque de piscicultura, como por meio do uso de aparelhos que introduzem automaticamente o oxigênio atmosférico na água, ou até mesmo com a renovação e a troca da água do tanque. Para tanto, a escolha do tipo de aerador a ser utilizado é de extrema importância, uma vez que a eficiência do mesmo depende de sua adequação às condições do tanque de cultivo (PASCO, 2015).

A inserção de oxigênio pelos aeradores pode ser separada em dois grupos, sendo eles: incorporação do ar na água (difusão do oxigênio atmosférico por microbolhas e alta pressão), como compressores de turbina; e incorporação da água no ar (captação de moléculas de oxigênio em contato com gotículas de água),

como aeradores de pás (BOYD; TUCKER, 2018). Em sua grande maioria, os aeradores funcionam com o uso de energia elétrica (PASCO, 2015), sendo um diferencial do sistema de aeração presente no JF a ser analisado na pesquisa, visto que seu funcionamento não utiliza energia elétrica, dependendo apenas da ação da gravidade.

### **III.II OBJETIVOS**

Esse capítulo teve como objetivos: **(i)** Estimar a Concentração de Saturação de oxigênio ( $C_s'$ ) para cada dia; **(ii)** Estimar o coeficiente de reoxigenação ( $Kla$ ) na etapa de aeração do sistema; **(iii)** Estimar o coeficiente de eficiência ( $K$ ) para cada dia; e **(iv)** Comparar os valores de  $K$  com a literatura.

### **III.III REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **III.III.I AERAÇÃO EM AQUICULTURA**

Para que seja possível alcançar um bom desempenho na aquicultura, o produtor deve-se certificar de que as variáveis de qualidade da água enquadraram-se nos valores exigidos para cada espécie cultivada, fato que, frequentemente, representa altos custos. Segundo Boyd (1998), a produtividade dos tanques de produção é limitada principalmente pela concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) na água. Contudo, há diferentes métodos para controlar a concentração de OD, como a renovação da água ou até mesmo aparelhos que incorporam o oxigênio da atmosfera mecanicamente (KEPENYES; VARADI, 1984).

Dessa forma, equipamentos denominados de aeradores foram recomendados pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) com o intuito de intensificar o controle da concentração de OD nos tanques de aquicultura (PASCO, 2015). Há diversos tipos de aeradores, cujas características dependem de cada fabricante. Entretanto, aeradores maiores são recomendados para amplas áreas de cultivo, enquanto aeradores que geram maior correnteza horizontal são os mais recomendados para tanques rasos (BOYD, 1989).

Os aeradores podem incorporar o oxigênio de duas maneiras: via ar-água (oxigênio é difundido na água ao inserir o ar presente na atmosfera por micro

borbulhas a grande pressão), como os compressores de turbina; e por incorporação da água no ar (a água é impulsionada para ter contato com o ar atmosférico, captando moléculas de oxigênio na superfície das gotículas), como os aeradores de fluxo horizontal (VINATEA, 2004; TUCKER, 2005).

Tem-se no mercado, em sua maioria, aeradores movidos à energia elétrica (PASCO, 2015). Há duas variáveis técnicas que avaliam a incorporação de oxigênio do aerador, que são: SOTR (*Standard Oxygen Transfer Rate*) e SAE (*Standard Aerator Efficiency*) (BOYD, 1989). O SOTR indica quantos kg de oxigênio foram incorporados na água por hora de funcionamento e pelo modelo do aerador utilizado (kg O<sub>2</sub>/h). Já o SAE indica a eficiência dos aeradores, relacionando o SOTR com a potência do motor do aerador, resultando na informação do consumo de energia elétrica do aerador, independente da potência utilizada (BOYD, 1989; VINATEA, 2004; PASCO, 2015). Segundo Pasco (2015), deve-se escolher o sistema de aeração analisando além dos índices de desempenho, o efeito do aerador nas variáveis físico-químicas da água.

Além dos sistemas de aeração mecânicos, tem-se os sistemas por gravidade (cascatas de aeração), que se apresentam como uma alternativa viável principalmente em regiões com alta declividade, diminuindo o custo de implantação e operação (MATOS; JÚNIOR; MATOS, 2015). As cascatas de aeração, comumente situadas a jusante de estações de tratamento, possuem como objetivo aumentar a concentração de OD do efluente tratado para possibilitar o seu reaproveitamento ou lançamento em um corpo receptor.

Os sistemas de aeração por gravidade são utilizados antes da aeração bruta da água, a fim de remover sais manganosos ou ferrosos e para introduzir oxigênio e nitrogênio atmosférico e proporcionar a exaustão de compostos orgânicos voláteis (BAGATUR, 2009; KUMAR *et al.*, 2013; MATOS; JÚNIOR; MATOS, 2015). Além disso, esses sistemas também são aplicados na pós-aeração da água tratada, apresentando-se como uma alternativa para o tratamento de água voltado para a potabilidade ou para águas residuárias (KUMAR *et al.*, 2013).

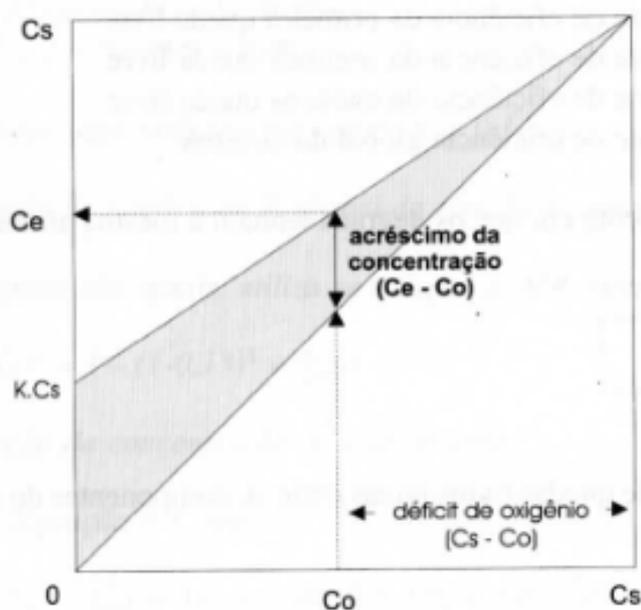
A entrada de ar no escoamento em queda livre nas cascatas ocorre pela superfície superior e inferior da lâmina de água (SPERLING, 2007). Na camada inferior, tem-se a formação de uma camada cisalhante, com alta turbulência, permitindo entrada de ar interfacial, elevando a eficiência de aeração do sistema (BAYLAR; EMIROGLU; BAGATUR, 2009).

### III.III.II COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA (K)

É possível estimar a concentração de oxigênio do efluente a jusante com base no coeficiente de eficiência  $K$ , que é utilizado no caso de aeração por gravidade. Com o valor de  $K$  para cada queda d'água do sistema de aeração em cascatas, é possível estimar a concentração de OD no efluente para diferentes condições de concentrações afluentes e de saturação (SPERLING, 2007).

O coeficiente  $K$  é específico e constante para cada sistema de aeração se a vazão afluente permanecer constante (SPERLING, 2007). A Figura 11 abaixo representa a aplicação da equação do cálculo do coeficiente  $K$  (Equação 9), onde obtém-se o valor de  $C_e$  por meio dos valores de  $C_s$  e  $K$ . A Figura 11 aponta a influência que o déficit de oxigênio possui no aumento da concentração do mesmo.

**Figura 11** – Estimativa do ganho de OD na aeração por gravidade.



Fonte: Sperling, 2007.

O valor de  $K$  estabelece a fração da concentração de saturação que será adicionada ao se realizar a aeração de uma água sem oxigênio (SPERLING, 2007). Analisando a figura, é possível inferir, também, que quanto maior a concentração afluente  $C_0$ , menor será o déficit de oxigênio e, assim, menor o acréscimo da concentração de oxigênio, como geralmente é o caso de efluentes de lagoa facultativa e de maturação, que apresentam altos valores de OD (SPERLING, 2007).

### III.III.III FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO

A difusão do oxigênio na água, sua solubilidade, e sua passagem por meio da interface ar-água determinam a quantidade de oxigênio que é transferida do ar para a água por unidade de tempo (CÔRREA, 2006). Esses processos sofrem influência da interdependência entre diversos fatores, como: temperatura, concentração de saturação, concentração instantânea do oxigênio na água, turbulência, dimensões e geometria do local e do sistema de aeração (CÔRREA, 2006).

Há três teorias que buscam explicar a transferência de massa entre as fases gasosa e líquida, sendo elas a teoria dos dois filmes, a teoria da penetração e a teoria da renovação superficial (SCHROEDER; 1977, BARBOSA JÚNIOR, 1989; SHIAU, 1995). Uma breve descrição das teorias está apresentada a seguir.

#### III.III.III.I TEORIA DOS DOIS FILMES

Lewis e Whitman (1924) propuseram um modelo físico simplista que busca descrever a interface de transferência sem levar em consideração a complexidade das questões hidrodinâmicas existentes durante a transferência de gases (COSTA, 2011). A teoria dos dois filmes, a mais antiga e simples, propõe que na superfície da interface ocorre a formação de um filme líquido e um gasoso, que se mantém estagnados, gerando resistência à passagem do gás da fase gasosa para líquida (CÔRREA, 2006; COSTA, 2011).

As hipóteses mais importantes que essa teoria adotou foram: 1. O fluxo massa do volume acontece nos dois lados da interface gás-líquido; 2. As condições de regime são permanentes; e 3. Há o estabelecimento instantâneo das condições de equilíbrio entre as fases (gasosa e líquida) na interface (CÔRREA, 2006). Vale ressaltar que os autores da teoria em questão tinham como objetivo estimar a importância das resistências das fases líquida e gasosa em relação a gases diversos com diferentes solubilidades (COSTA, 2011).

### III.III.III.II TEORIA DA PENETRAÇÃO

O modelo proposto por Higbie (1935) postulou a teoria da penetração, contradizendo o modelo dos dois filmes, afirmando que os gases dissolvidos não estabelecem um perfil linear de concentração, característica de um regime permanente. Higbie (1935) buscava compreender as etapas iniciais da transferência de massa entre as fases, considerando no modelo o efeito da substituição contínua do líquido da interface por outros elementos fluidos (CÔRREA, 2006; COSTA, 2011).

Higbie (1935) propunha, ainda, que o líquido e o gás ao serem colocados em contato, faz com que o filme líquido passe a ter a concentração da massa líquida, permitindo a penetração do gás dissolvido (CHAPRA, 1997).

### III.III.III.III TEORIA DA RENOVAÇÃO SUPERFICIAL

Danckwerts (1951) expandiu a teoria da penetração ao considerar situações em que partes do líquido encontravam-se na interface em períodos de tempo finitos, levando em consideração, também, que a turbulência em um líquido que está sendo agitado estende-se até a superfície (COSTA, 2011). Esse conceito supõe que existe uma taxa de produção de superfície nova por unidade de superfície disponível, sendo independentemente da idade do líquido em questão. Tal conceito é conhecido como teoria da renovação superficial aleatória.

### III.III.IV FATORES QUE INFLUENCIAM A TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO

Diversos fatores podem influenciar na transferência de oxigênio, dependendo do tipo do sistema de aeração. Em aeração por difusão do ar, destaca-se a influência da temperatura, de componentes orgânicos, turbulência, área de transferência, concentração da saturação, entre outros.

#### III.III.IV.I CONCENTRAÇÃO DA SATURAÇÃO ( $C_s$ )

O valor da saturação de oxigênio ( $C_s$ ) possui relação com a pressão parcial do oxigênio na fase gasosa, sendo essa relação expressa pela lei de Henry:

$$P' = H.C_s \quad (1)$$

Em que  $P'$  é a pressão parcial do oxigênio, para o ar = 0,209 x pressão total ( $ML^{-1}.T^{-2}$ );  $C_s$  é a concentração de saturação do oxigênio ( $ML^{-3}$ ); e  $H$  é a constante de Henry.

O  $C_s$  pode ser influenciado pela temperatura, salinidade, altitude e pela presença de componentes químicos (SPERLING, 2005). O aumento da altitude resulta na diminuição da pressão atmosférica e, portanto, na pressão parcial do oxigênio, diminuindo a concentração da saturação em equilíbrio (CÔRREA, 2006).

### III.III.IV.II COEFICIENTE DE REOXIGENAÇÃO ( $K_La$ )

O coeficiente de reoxigenação ( $K_La$ ) é uma das principais variáveis para o dimensionamento de uma unidade de tratamento de efluentes (CÔRREA, 2006). O  $K_La$  é uma medida da velocidade que o sistema de aeração consegue transferir oxigênio para a água, sendo uma referência da eficiência do sistema.

Há diferentes métodos para estimar o coeficiente de oxigenação ( $K_La$ ), e são inúmeros os fatores físicos envolvidos no processo de reaeração superficial (COSTA, 2011; COSTA *et al.*, 2015).

Melching e Flores (1999) apresentaram algumas variáveis que devem ser consideradas ao se realizar estudos que envolvem a determinação do  $K_La$ , sendo elas: profundidade principal ( $H$ ), velocidade ( $U$ ), largura superficial ( $W$ ), fator de forma da seção transversal ( $\psi$ ), número de Froude ( $Fr$ ), aceleração gravitacional ( $g$ ), declividade ( $i$ ), velocidade de cisalhamento ( $v'$ ), vazão ( $Q$ ), viscosidade cinemática ( $\nu$ ), coeficiente de difusão molecular ( $D_m$ ), tensão superficial da água ( $T_s$ ), taxa de dissipação de energia por unidade de massa ( $g_{vi}$ ) e coeficiente de rugosidade ( $n$ ). Sendo assim, o  $K_La$  pode ser representado pela seguinte expressão:

$$K_La = f[H, U, W, \psi, Fr, g, i, v', Q, \nu, D_m, T_s, n] \quad (2)$$

Gualtieri, Gualtieri e Doria (2002) realizaram uma investigação sobre o processo de transferência de massa na interface ar-água baseada em análise adimensional, e demonstraram que o coeficiente de reoxigenação superficial

adimensional ( $K_L a_{ND}$ ) possui uma relação de proporcionalidade com as variáveis adimensionais de Froude (Fr), inclinação (i), Reynolds (Re), Sherwood (Sh), Weber (We) e rugosidade relativa (S), podendo desta maneira ser representado pela seguinte relação:

$$K_L a_{ND} = f[Fr, i, R, Sh, We, S] \quad (3)$$

Devido às dificuldades operacionais e obtenção de instrumentação para se aferir todos os fatores físicos envolvidos nas variáveis apresentadas nas expressões 2 e 3, a determinação do  $K_L a$  pode ser realizada por meio de métodos empíricos e que possuem o coeficiente de oxigenação ( $K_L a$ ) como uma incógnita a ser encontrada através do processo de calibração da equação empírica utilizada. Sendo que, no caso desta pesquisa, o processo de calibração consiste em ajustar o modelo aos dados empíricos que foram encontrados no campo.

### III.IV MATERIAIS E MÉTODO

#### III.IV.I ESTIMATIVA DO VALOR DE $C_s$ '

O valor de  $C_s$  (mg/l) pode ser obtido por algumas fórmulas empíricas levando-se em consideração a temperatura da água, a altitude e a salinidade, sendo que quanto maior a temperatura  $T$  (°C), menor o valor de  $C_s$ ; e quanto maior a altitude, menor o valor de  $C_s$  (SPERLING, 2005). Por tratar-se de um ambiente de água doce, optou-se por não levar em consideração a influência da salinidade. Para os valores da temperatura, utilizou-se as médias diárias dos pontos P4 a C7. Foi utilizado um valor de  $C_s$  por dia. A fórmula para o cálculo do  $C_s$  comumente utilizada é (PÖPEL, 1979):

$$C_s = 14,652 - 4,1022 \cdot 10^{-1} \cdot T + 7,9910 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (4)$$

Adicionando-se a influência da altitude, que foi obtida pela estimativa gerada no *software* Google Earth, tem-se a equação (QASIM, 1985):

$$f_H = \frac{C'_s}{C_s} = \left(1 - \frac{H}{9450}\right) \quad (5)$$

em que,

$f_H$  = Fator de correção da  $C_s$  de OD pela altitude (adimensional);

$C'_s$  = Concentração de saturação na altitude H (mg/l); e

$H$  = Altitude (m).

### III.IV.II ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE REOXIGENAÇÃO ( $K_La$ )

Parte do entendimento dessa variável foi descrito no item III.III.IV.II Coeficiente de reoxigenação ( $K_La$ ), do capítulo 3. De acordo com Boyd e Tucker (2018) a taxa de variação da concentração de OD ao longo do tempo na água pode ser descrita como:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{k}{F} \cdot \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (6)$$

Onde  $\frac{dc}{dt}$  é a taxa de variação da concentração de oxigênio;  $k$  é o coeficiente de difusão;  $F$  é a espessura do filme líquido;  $A$  é a área por onde o oxigênio está se difundindo;  $V$  é o volume de água em que o oxigênio está difundindo;  $C_s$  é a concentração de OD na saturação; e  $C$  é a concentração real de OD. Como na prática a área ( $A$ ) e a espessura do filme líquido ( $F$ ) são fatores de difícil obtenção,  $A/V$  e  $k/F$  são combinados para determinar o coeficiente geral de transferência de oxigênio ( $K_La$ ). Com isso, a Equação 6 pode ser reescrita como:

$$\frac{dc}{dt} = K_La(C_s - C) \quad (7)$$

A Equação 7 acima é usualmente utilizada para a obtenção do coeficiente de oxigenação ( $K_La$ ), e foi inicialmente proposta a partir do modelo clássico de Adney e Becker (1919), sendo este um modelo empírico e possui como objetivo descrever a taxa com que gases que são pouco solúveis dissolvem-se na água, como é o caso do oxigênio.

Ao integrar a Equação 7 para uma concentração inicial ( $C_0$ ), obtém-se a seguinte solução analítica que será utilizada para o cálculo do  $K_L a$ , cumprindo, assim, o objetivo específico ii:

$$C = C_s - (C_s - C_0)e^{-k_L a \cdot t} \quad (8)$$

Como essa equação trata-se de um modelo empírico, os dados utilizados foram provenientes das coletas realizadas em campo desde a primeira coleta após a implantação do Jardim Filtrante (13/09/19) até a última coleta realizada no período de estágio da aluna (29/10/2020). Os dados de OD foram obtidos por meio da sonda multiparâmetro.

A calibração dos dados refere-se ao ajuste do modelo a ser utilizado ao conjunto de dados obtidos experimentalmente, sendo necessário alterar variáveis do modelo para que concilie com os dados (CHAPRA; CANALE, 2014), sendo isso realizado pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), fazendo-se uso da ferramenta *Solver* do *software* Excel (GIORGETTI, 2008; COSTA, 2015).

### III.IV.III ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA (K)

A concentração de oxigênio efluente, a jusante, pode ser estimada por meio do coeficiente de transferência de gases, sendo este o coeficiente de eficiência (K) no caso da aeração por gravidade. Com o valor de K conhecido para cada queda d'água, pode-se estimar a concentração efluente conforme a concentração afluenta, a montante, e de saturação, sendo a equação descrita a seguir (SPERLING, 2007):

$$C_e = C_o + K \cdot (C_s' - C_o) \quad (9)$$

em que,

$C_e$  = Concentração efluente (jusante) de oxigênio (mg/L);

$C_o$  = Concentração afluenta (montante) de oxigênio (mg/L);

$C_s'$  = Concentração de saturação de oxigênio, com correção da temperatura e da altitude (mg/L);

$K$  = Coeficiente de eficiência (adimensional)

O valor de K é inalterável e específico para cada queda d'água contanto que a vazão afluyente seja constante. O coeficiente em questão pode ser calculado pela Equação 10, sendo um rearranjo da Equação 9 (SPERLING, 2007).

$$K = \frac{C_e - C_o}{C_s' - C_o} \quad (10)$$

A fim de padronizar os valores de K obtidos para comparação com a literatura, Gulliver *et al.* (1990, *apud* BAYLAR *et al.*, 2009), recomendaram a aplicação da equação 11, que obtém um valor para o K corrigido para 20 °C.

$$1 - K_{20} = (1 - K_T)^{\frac{1}{f}} \quad (11)$$

em que,

$K_T$  = Eficiência de aeração na temperatura atual da água;

$K_{20}$  = Eficiência de aeração na temperatura da água de 20 °C; e

$f$  = Expoente descrito pela expressão 12:

$$f = 1 + 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot (T - 20) + 8,26 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 20)^2 \quad (12)$$

#### III.IV.IV COMPARAÇÃO DOS VALORES DE K COM A LITERATURA

Há registros na literatura de fórmulas empíricas para a determinação do K conforme a altura da queda de cada degrau e outras condições (Tabela 4). Assim, realizou-se a comparação do valor de K obtido pela Equação 10, com os valores obtidos aplicando as fórmulas observadas na literatura (*apud* SPERLING, 2007).

**Tabela 4** – Determinação do coeficiente de eficiência K.

| <b>Autor</b>            | <b>Coeficiente K</b>                      | <b>Coeficientes da equação</b>   |
|-------------------------|---|--|
| Barret, Gameson e Ogden | $K = P \cdot (1 + 0,046 \cdot T) \cdot H$ | P = 0,45 (água limpa)<br>P = 0,36 (água poluída)<br>P = 0,29 (esgoto)  |
| Pomeroy                 | $K = 1 - e^{-F \cdot H}$                  | F = $0,53m^{-1}$ (água limpa sobre vertedores e comportas)<br>F = $0,41m^{-1}$ (água ligeiramente poluída, em vertedores)<br>F = $0,28m^{-1}$ (efluentes de tratamento, em vertedores) |

Fonte: Adaptado de Sperling, 2007.

H = Altura de cada queda livre (m)

T = Temperatura do líquido (°C)

P e F = Constantes empíricas

### III.V RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### III.V.I ESTIMATIVA DO VALOR DE Cs'

Aplicando-se a equação 4 e 5, foi possível estimar o valor diário da saturação de oxigênio com a correção da temperatura (Cs) e da altitude (Cs') (Tabela 5).

**Tabela 5** – Estimativa dos valores de Cs e Cs'.

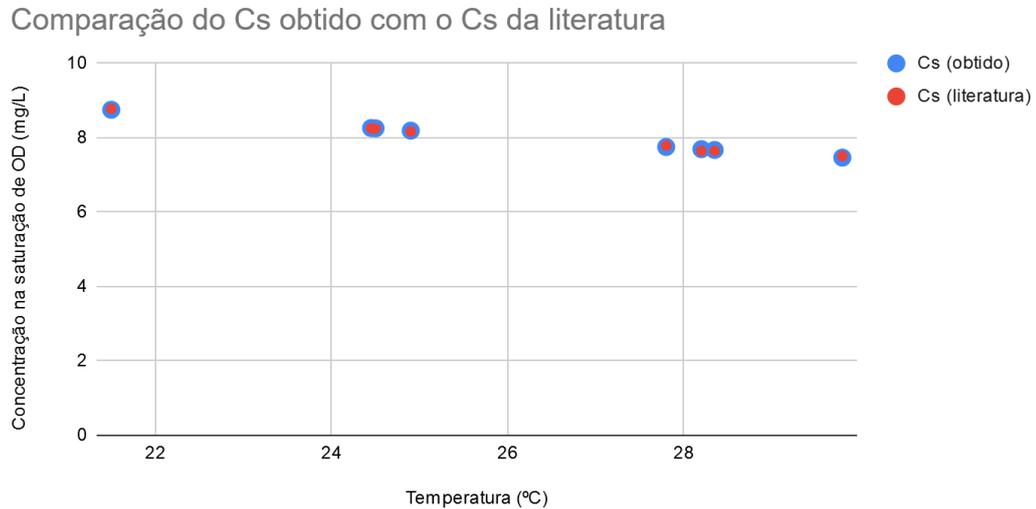
| <b>Data da coleta</b> | <b>Cs (mg/L)</b> | <b>Cs' (mg/L)</b> |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| 13/09/19              | 8,75             | 8,07              |
| 26/09/19              | 7,67             | 7,07              |
| 11/10/19              | 7,47             | 6,88              |
| 24/10/19              | 7,75             | 7,14              |
| 07/11/19              | 7,69             | 7,09              |
| 06/02/20              | 8,26             | 7,61              |
| 22/10/20              | 8,25             | 7,61              |
| 29/10/20              | 8,19             | 7,55              |

Fonte: Realizado pela autora, 2020.

Comparando com a literatura os valores de obtidos de Cs (Gráfico 6), observa-se que há pouca variação entre o Cs observado em campo com a influência da

temperatura e o Cs sugerido por Siste *et al.* (2011) de acordo com a temperatura da água.

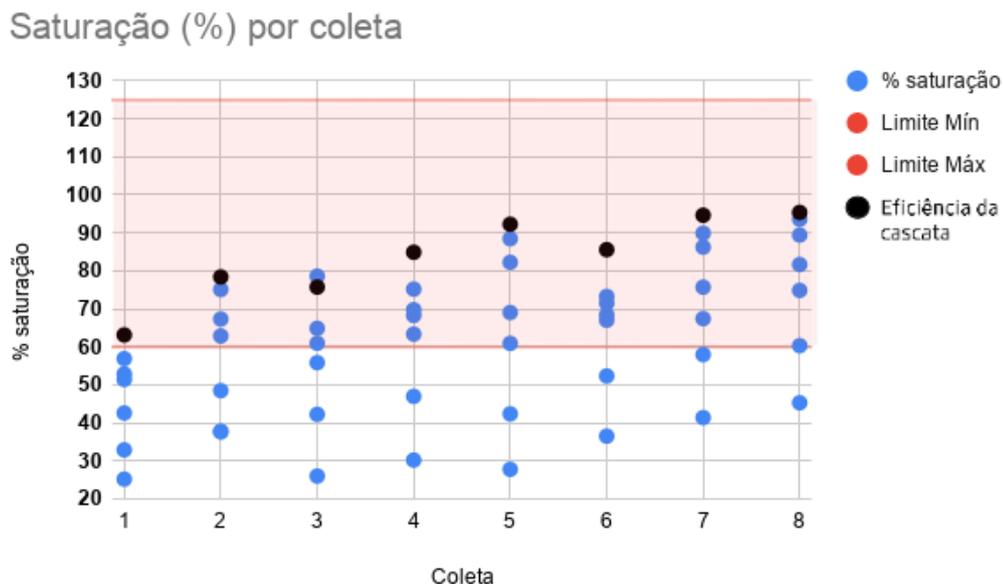
**Gráfico 6** – Comparação dos valores de Cs com a literatura.



Fonte: Realizado pela autora, 2020.

O Gráfico 7 representa a distribuição da porcentagem de saturação por ponto em cada coleta. Ou seja, tomando-se como referencial qualquer uma das coletas realizadas, de acordo com o Gráfico 7, o aumento do OD com relação ao percentual de saturação se refere as amostragens realizadas ao longo da cascata de aeração, de montante para jusante. Assim, os pontos experimentais apresentados na cor preta no campo do Gráfico 7, denominado de “Eficiência da Cascata”, se referem aos valores de eficiência de oxigenação da cascata no dia da coleta, sendo estes os valores de maior interesse para a manutenção do atendimento dos níveis de OD no tanque de piscicultura, pois é onde está localizado o final da cascata de aeração e início do tanque de piscicultura.

**Gráfico 7** – Análise da porcentagem de saturação com a literatura.



Fonte: Realizado pela autora, 2020.

As porcentagens foram obtidas pela divisão do OD obtido em cada ponto pelo  $C_s'$  de cada coleta, multiplicado por 100 (SISTE *et al.*, 2011). De acordo com Siste *et al.* (2011), o recomendado para a maior parte das espécies de peixe é que o OD se encontra na faixa de 60% a 125% da saturação, o que significa que em todas as companhias de amostragem realizadas a cascata de aeração cumpriu com o atendimento das condições mínimas de oxigenação do sistema estudado.

Além disso, Silva, Ferreira e Logato (2001) afirmam que o OD mínimo recomendado é de 5,0 mg/L para um crescimento ótimo dos peixes, o que confirma a eficiência quanto ao atendimento do padrão de qualidade da água, da cascata de aeração utilizada, no requisito de OD para o tanque de piscicultura. Os valores de concentração de OD, em mg/L, podem ser visualizados na Tabela 6 que está presente na seguinte seção “ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE REOXIGENAÇÃO ( $K_{LA}$ )”.

### III.V.II ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE REOXIGENAÇÃO ( $K_{LA}$ )

Para a estimativa do  $K_{La}$ , levou-se em consideração o tempo (min), que foi obtido pelo valor médio da vazão nas cascatas de aeração, considerando que o volume útil dos baldes é de 4,75 litros. Assim, a Tabela 6 representa os valores estimados de  $K_{La}$  para cada dia. Encontra-se no Apêndice as curvas de reoxigenação

para os oito dias coletados. Essas curvas foram realizadas por meio da correlação dos dados experimentais de  $K_{la}$  em função do tempo. Estão apresentados os dados experimentais (pontos discretos) e o modelo (linha contínua), que foi ajustado por meio do  $K_{la}$ ,  $C_s'$  e  $C_0$ .

**Tabela 6** – Estimativa dos valores de  $K_{la}$ .

| Data           | Ponto | Tempo (min) | $C_s'$<br>(mg/L) | OD<br>(mg/L) | Modelo<br>(mg/L) | Desvio | $K_{la}$<br>(1/min) |
|----------------|-------|-------------|------------------|--------------|------------------|--------|---------------------|
| 13/09/2019     | P4    | 0,00        | 8,07             | 3,015        | 3,02             | 0,00   | 0,030               |
|                | C1    | 1,83        |                  | 2,034        | 3,28             | 1,56   |                     |
|                | C2    | 3,66        |                  | 2,655        | 3,54             | 0,78   |                     |
|                | C3    | 5,49        |                  | 3,438        | 3,78             | 0,12   |                     |
|                | C4    | 7,32        |                  | 4,149        | 4,01             | 0,02   |                     |
|                | C5    | 9,15        |                  | 4,266        | 4,23             | 0,00   |                     |
|                | C6    | 10,98       |                  | 4,59         | 4,43             | 0,02   |                     |
|                | C7    | 12,81       |                  | 5,094        | 4,63             | 0,22   |                     |
| Soma do desvio |       |             |                  |              |                  | 2,73   |                     |
| 26/09/2019     | P4    | 0,00        | 7,07             | 1,44         | 1,44             | 0,00   | 0,098               |
|                | C1    | 1,83        |                  | 2,664        | 2,36             | 0,09   |                     |
|                | C2    | 3,66        |                  | 2,673        | 3,14             | 0,22   |                     |
|                | C3    | 5,49        |                  | 3,429        | 3,78             | 0,13   |                     |
|                | C4    | 7,32        |                  | 4,761        | 4,32             | 0,19   |                     |
|                | C5    | 9,15        |                  | 4,446        | 4,77             | 0,11   |                     |
|                | C6    | 10,98       |                  | 5,31         | 5,15             | 0,03   |                     |
|                | C7    | 12,81       |                  | 5,544        | 5,47             | 0,01   |                     |
| Soma do desvio |       |             |                  |              |                  | 0,76   |                     |

Fonte: Realizado pela autora, 2020.

Tabela 6 – Continuação.

| Data           | Ponto | Tempo (min) | Cs' (mg/L) | OD (mg/L) | Modelo (mg/L) | Desvio | Kla (1/min) |
|----------------|-------|-------------|------------|-----------|---------------|--------|-------------|
| 11/10/2019     | P4    | 0,00        | 6,88       | 1,332     | 1,33          | 0,00   | 0,1         |
|                | C1    | 1,83        |            | 1,791     | 2,26          | 0,22   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 2,907     | 3,03          | 0,02   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 3,843     | 3,68          | 0,03   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 4,194     | 4,21          | 0,00   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 4,464     | 4,66          | 0,04   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 5,409     | 5,03          | 0,14   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 5,211     | 5,34          | 0,02   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 0,46   |             |
| 24/10/2019     | P4    | 0,00        | 7,14       | 1,152     | 1,15          | 0,00   | 0,13        |
|                | C1    | 1,83        |            | 2,16      | 2,42          | 0,07   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 3,357     | 3,42          | 0,00   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 4,527     | 4,21          | 0,10   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 4,878     | 4,83          | 0,00   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 4,986     | 5,32          | 0,11   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 5,373     | 5,71          | 0,11   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 6,066     | 6,01          | 0,00   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 0,40   |             |
| 07/11/2019     | P4    | 0,00        | 7,09       | 0,936     | 0,94          | 0,00   | 0,15        |
|                | C1    | 1,83        |            | 1,971     | 2,41          | 0,20   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 3,006     | 3,54          | 0,28   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 4,32      | 4,39          | 0,00   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 4,896     | 5,04          | 0,02   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 5,832     | 5,53          | 0,09   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 6,273     | 5,90          | 0,14   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 6,543     | 6,19          | 0,13   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 0,85   |             |

Fonte: Realizado pela autora, 2020.

Tabela 6 – Continuação.

| Data           | Ponto | Tempo (min) | Cs' (mg/L) | OD (mg/L) | Modelo (mg/L) | Desvio | Kla (1/min) |
|----------------|-------|-------------|------------|-----------|---------------|--------|-------------|
| 06/02/2020     | P4    | 0,00        | 7,61       | 1,296     | 1,30          | 0,00   | 0,15        |
|                | C1    | 1,83        |            | 2,78      | 2,81          | 0,00   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 3,99      | 3,97          | 0,00   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 5,10      | 4,84          | 0,07   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 5,21      | 5,51          | 0,09   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 5,45      | 6,01          | 0,32   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 5,58      | 6,40          | 0,67   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 6,52      | 6,69          | 0,03   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 1,18   |             |
| 22/10/2020     | P4    | 0,00        | 7,61       | 0,594     | 0,59          | 0,00   | 0,2         |
|                | C1    | 1,83        |            | 3,15      | 2,74          | 0,17   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 4,41      | 4,23          | 0,03   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 5,13      | 5,27          | 0,02   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 5,76      | 5,98          | 0,05   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 6,56      | 6,48          | 0,01   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 6,84      | 6,83          | 0,00   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 7,20      | 7,07          | 0,02   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 0,29   |             |
| 29/10/2020     | P4    | 0,00        | 7,55       | 2,196     | 2,20          | 0,00   | 0,18        |
|                | C1    | 1,83        |            | 3,42      | 3,70          | 0,08   |             |
|                | C2    | 3,66        |            | 4,55      | 4,78          | 0,05   |             |
|                | C3    | 5,49        |            | 5,65      | 5,56          | 0,01   |             |
|                | C4    | 7,32        |            | 6,17      | 6,11          | 0,00   |             |
|                | C5    | 9,15        |            | 6,75      | 6,52          | 0,05   |             |
|                | C6    | 10,98       |            | 7,07      | 6,81          | 0,07   |             |
|                | C7    | 12,81       |            | 7,20      | 7,01          | 0,03   |             |
| Soma do desvio |       |             |            |           |               | 0,29   |             |

Fonte: Realizado pela autora, 2020.

Observando a Tabela 6, nota-se que o Coeficiente de Reaeração (K<sub>la</sub>) varia entre 0,03 e 0,2/min. Transformando os valores de K<sub>la</sub> em 1/dia, e corrigindo para a temperatura de 20 °C (Tabela 8) por meio da Equação 12 (COSTA, 2011), é possível comparar os resultados com o observado por Sperling (2014) (Tabela 7).

$$K_{La(t)} = K_{La(20)} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (12)$$

em que,

$K_{La(t)}$  = K<sub>La</sub> a uma temperatura T qualquer;

$K_{La(20)}$  = K<sub>La</sub> a uma temperatura de 20 °C;

$\theta$  = Coeficiente de correção da temperatura.

O valor de  $\theta$  comumente utilizado é 1,024, que representa a média entre os valores extremos apontados por Streeter e Phelps (1926), Elmore e West (1961), Churchill *et al.* (1962) e Tsvoglou (1967) (COSTA, 2011).

**Tabela 7** – Valores típicos do K<sub>la</sub> a 20 °C.

| Corpo d'água                       | K <sub>la</sub> (1/dia)<br>Profundo | K <sub>la</sub> (1/dia)<br>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 | 0,45                                | 0,69                            |
| Rios rápidos                       | 0,69                                | 1,15                            |
| Corredeiras e quedas d'água        | >1,15                               | >1,61                           |

Fonte: Adaptado de Sperling (2014).

A Tabela 8 representa a comparação dos valores observados com os valores da literatura (Tabela 7). Pode-se observar que o resultado condiz com o descrito por Sperling (2014), como era esperado, caracterizando o sistema de aeração como quedas d'água em locais rasos (>1,61).

**Tabela 8** – Comparação do  $K_{la}$  observado com a literatura.

| <b>Data da coleta</b> | <b><math>K_{la}</math> observado (1/dia) - 20 °C</b> | <b>Classificação da literatura</b>  |
|-----------------------|--|-------------------------------------|
| 13/09/2019            | 38,01  | Corredeiras e quedas d'água (>1,61) |
| 26/09/2019            | 136,19   |                                     |
| 11/10/2019            | 118,13   |                                     |
| 24/10/2019            | 148,38   |                                     |
| 07/11/2019            | 179,52   |                                     |
| 06/02/2020            | 177,83   |                                     |
| 22/10/2020            | 259,15   |                                     |
| 29/10/2020            | 230,76   |                                     |

Fonte: Realizado pela autora (2020).

Com essa comparação pode-se verificar que o sistema de aeração por gravidade utilizado neste trabalho, que foi desenvolvido para a recuperação dos níveis de oxigênio dissolvido do sistema de piscicultura, apresentou resultados satisfatórios e teve um desempenho significativamente superior ao encontrado em corredeiras e quedas d'águas naturais.

Considerando a eficácia do sistema de aeração, será sugerido como trabalhos futuros a análise de custo-benefício deste sistema em comparação com sistemas de aeração comerciais que utilizam o princípio da agitação mecânica superficial e da aeração com ar difuso.

### III.V.III ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA (K)

Aplicando-se a metodologia, foi possível obter os valores de K conforme a Equação 9, a uma temperatura qualquer do efluente observada em cada dia de coleta. Os valores de K foram corrigidos para a temperatura de 20 °C (Equação 11) para comparação com a literatura. Os valores obtidos estão na Tabela 9:

**Tabela 9** – Valores de K para diferentes temperaturas.

| <b>Data da coleta</b> | <b>Temperatura Média (°C)</b> | <b>K (T)</b> | <b>K (20 °C)</b> |
|-----------------------|-------------------------------|--------------|------------------|
| 13/09/2019            | 21,5                          | 0,05         | 0,05             |
| 26/09/2019            | 28,3                          | 0,16         | 0,14             |
| 11/10/2019            | 29,8                          | 0,17         | 0,14             |
| 24/10/2019            | 27,8                          | 0,21         | 0,18             |
| 07/11/2019            | 28,2                          | 0,24         | 0,21             |
| 06/02/2020            | 24,4                          | 0,24         | 0,22             |
| 22/10/2020            | 24,5                          | 0,31         | 0,29             |
| 29/10/2020            | 24,9                          | 0,28         | 0,26             |

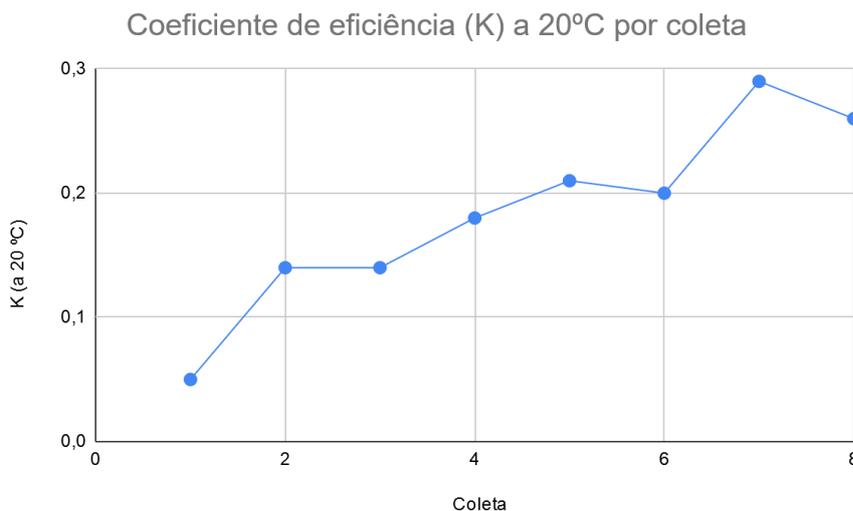
T = Temperatura do efluente.

Fonte: Realizado pela autora (2020).

Um fator que pode interferir no cálculo de K é a vazão do sistema, a qual varia de acordo com as características hidráulicas do sistema, que é influenciada por: horas de trabalho do conjunto motor-bomba, nível de água do reservatório, e perda de carga hidráulica no jardim filtrante. Foram coletados 2 valores de vazão nos dias 22/10/2020 e 29/10/2020, os quais resultaram em 3,62 L/min e 1,58 L/min, respectivamente. Apesar de a diferença ter sido alta, nota-se que o valor de K não teve uma alteração considerável nesses dias, e a temperatura também foi semelhante.

Analisando ainda os valores de K obtidos, observa-se um aumento conforme as coletas, apresentado no Gráfico 8. O aumento da eficiência do sistema de aeração do Jardim Filtrante pode estar associado ao estabelecimento adequado das macrófitas nas três caixas, que auxiliam no estabelecimento de microrganismos que deterioram a matéria orgânica e consomem oxigênio; o que ocorreu principalmente após a instalação do sombrite, na coleta 6 (06/02/2020), com consequente aumento do valor K após a 6ª coleta (Gráfico 8), que variou de 0,20 para 0,29. Por fim, confirma-se o aumento dos valores de K ao longo das cascatas de aeração, pois tem-se a adição de OD por difusão na água, que entra nas cascatas com baixos valores de OD.

**Gráfico 8** – Valores de K (20°C) conforme as coletas.



Fonte: Realizado pela autora, 2020.

Comparando os valores de K à 20 °C com os valores de K obtidos aplicando a equação de Barret, Gameson e Ogden (*apud* SPERLING, 2007), apresentadas na Tabela 4, obteve-se a Tabela 10.

**Tabela 10** – Comparação dos valores de K do trabalho e de Barret, Gameson e Ogden (20 °C).

| Data       | K             |                          |                            |                      |
|------------|---------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
|            | Este trabalho | Barret, Gameson e Ogden  |                            |                      |
|            |               | P = 0,45<br>(água limpa) | P = 0,36<br>(água poluída) | P = 0,29<br>(esgoto) |
| 13/09/2019 | 0,05          |                          |                            |                      |
| 26/09/2019 | 0,14          |                          |                            |                      |
| 11/10/2019 | 0,14          |                          |                            |                      |
| 24/10/2019 | 0,18          |                          |                            |                      |
| 07/11/2019 | 0,21          | 0,22                     | 0,17                       | 0,14                 |
| 06/02/2020 | 0,22          |                          |                            |                      |
| 22/10/2020 | 0,29          |                          |                            |                      |
| 29/10/2020 | 0,26          |                          |                            |                      |

P = constante empírica

Fonte: Realizado pela autora (2020).

Para melhor visualização, gerou-se o Gráfico 9. Entende-se que há um gradiente entre as características da água (limpa, poluída e esgoto), o que foi representado no Gráfico 9 com os valores médios entre cada característica. Nota-se que da coleta 1 à 3 o valor de K enquadra-se na classificação “esgoto” segundo o modelo. A coleta 4 classificou o efluente como “água poluída”. Da coleta 5 à 8, tem-se o efluente classificado como “água limpa”. Novamente, a comparação corrobora com o argumento de que os valores de K obtidos podem estar associados à eficiência do Jardim Filtrante, que também está relacionado às macrófitas aquáticas.

**Gráfico 9** – Comparação dos valores de K com o modelo de Barret, Gameson e Ogden.



Fonte: Realizado pela autora (2020).

Comparou-se, ainda, os valores de K observados com o K obtido pela equação sugerida por Pomeroy (SPERLING, 2007) (Tabela 4). Assim, obteve-se a Tabela 11 abaixo.

**Tabela 11** – Comparação dos valores de K do trabalho e de Pomeroy (20°C).

| Data       | K             |                                |                                  |  |
|------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|--|
|            | Este trabalho | Pomeroy                        |                                  |  |
|            |               | F = 0,53 (1/m)<br>(água limpa) | F = 0,41 (1/m)<br>(água poluída) | F = 0,28 (1/m)<br>(efluente de tratamento) |
| 13/09/2019 | 0,05          |                                |                                  |  |
| 26/09/2019 | 0,14          |                                |                                  |  |
| 11/10/2019 | 0,14          |                                |                                  |  |
| 24/10/2019 | 0,18          | 0,12                           | 0,10                             | 0,07                                       |
| 07/11/2019 | 0,21          |                                |                                  |  |
| 06/02/2020 | 0,22          |                                |                                  |  |
| 22/10/2020 | 0,29          |                                |                                  |  |
| 29/10/2020 | 0,26          |                                |                                  |  |

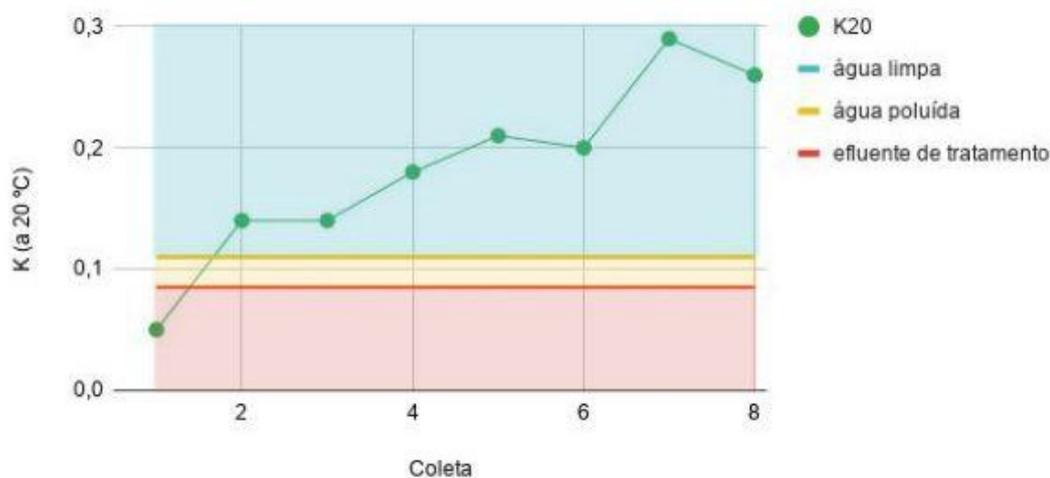
F = constante empírica

Fonte: Realizado pela autora (2020).

A equação de Pomeroy para o cálculo de K leva em consideração apenas o valor de F, dado pelo autor, e a altura da queda, que no caso do Jardim Filtrante analisado a altura é de 0,25 m. Para melhor visualização dos dados, tem-se o Gráfico 10 abaixo. Segundo o modelo de Pomeroy, o Jardim Filtrante em questão apresenta uma água classificada majoritariamente como limpa após o tratamento e as cascatas de aeração.

**Gráfico 10** – Comparação dos valores de K com o modelo de Pomeroy.

Comparação dos valores de K (deste trabalho) com K (Pomeroy)



Fonte: Realizado pela autora (2020).

### III.VI CONCLUSÕES

Concluiu-se que o valor de  $C_s'$  apresentou pouca variação ao longo das coletas, tendo como maior valor 8,07 mg/L, e menor, 6,88 mg/L. O valor do coeficiente de reaeração ( $Kla$ ) apresentou uma variação entre 0,03 e 0,2/min para uma temperatura qualquer do efluente. Em todas as campanhas de amostragem realizadas a cascata de aeração cumpriu com o atendimento das condições mínimas de oxigenação do sistema estudado.

Após a correção da temperatura para 20°C, observou-se que os valores obtidos do  $Kla$  enquadram o sistema de aeração em condições superiores as quedas d'água em locais rasos segundo a literatura. Essa comparação afirmou a eficiência satisfatória do sistema de aeração por gravidade desenvolvido no jardim filtrante em questão, apresentando um desempenho consideravelmente superior ao observado em corpos d'águas naturais.

Em relação ao coeficiente de eficiência ( $K$ ), notou-se um aumento da eficiência do sistema ao longo das coletas realizadas, o que pode estar associado ao estabelecimento das macrófitas aquáticas no Jardim Filtrante. Ao comparar os valores de  $K$  deste trabalho com os valores obtidos pela aplicação das equações propostas por Barret, Gameson e Ogden, à 20 °C, observou-se que, das coletas 1 a 3 o efluente foi classificado como “esgoto”; na coleta 4, obteve-se a classificação “água poluída”; e nas coletas 5 a 8, “água limpa”.

Realizando a comparação dos valores de  $K$  do trabalho com os valores obtidos pelas equações sugeridas por Pomeroy, foi possível observar um quadro inverso em relação a comparação anterior. Seguindo o modelo de Pomeroy, a partir da 2ª coleta o efluente foi classificado como “água limpa”. A 1ª coleta classificou-o como “efluente de tratamento”. É importante salientar que esta classificação (“esgoto”, “água poluída”, “água limpa”; e “efluente de tratamento”, “água poluída”, “água limpa”) foi obtida em comparação com os resultados encontrados por esses autores, que se refere a uma classificação do ponto de vista apenas do oxigênio dissolvido (OD), não estando envolvidas análises sobre outras variáveis de qualidade da água.

Os resultados obtidos confirmam a eficiência do sistema de aeração por gravidade desenvolvido no jardim filtrante em questão, sendo possível afirmar que para as condições e variáveis analisadas os resultados foram bastante satisfatórios para o sistema de piscicultura em questão.

## **CAPÍTULO 4**

### **IV. Considerações e recomendações finais da pesquisa**

#### **IV.I CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS DA PESQUISA**

Os resultados obtidos na presente pesquisa contribuem para o entendimento, para o banco de dados do país, para a comparação e para a análise do Jardim Filtrante e do sistema de aeração por gravidade estudados, auxiliando no aprimoramento das tecnologias apresentadas, bem como em futuras aplicações das mesmas em outras localidades.

As análises das variáveis limnológicas do Jardim Filtrante apresentaram que o sistema possui a capacidade de tratar o efluente de piscicultura no que diz respeito às variáveis temperatura, turbidez, pH e OD, de forma a estar adequado para ser reutilizado na piscicultura, atendendo a resolução CONAMA nº 357/05 e a literatura especializada.

Além de o Jardim apresentar baixo custo de manutenção e operação, o tratamento e a aeração contribuem com vantagens econômicas como a reutilização da água com qualidade, e a aeração satisfatória por gravidade, com baixo custo energético. Ademais, a escolha do Copo-de-leite como macrófitas aquáticas para o sistema oferece uma oportunidade de renda para o produtor, uma vez que essas plantas ornamentais podem ser vendidas.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se o estudo do custo-benefício do sistema de aeração por gravidade apresentado neste trabalho, com os sistemas de aeração comerciais que fazem uso da agitação mecânica superficial e da aeração com ar difuso. Além disso, recomenda-se a continuidade dos estudos relacionados à eficiência do Jardim Filtrante após o estabelecimento das macrófitas aquáticas, considerando variáveis adicionais da qualidade da água, tais como DBO, DQO, Nitrogênio, Fósforo, coliformes totais e fecais, entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, A. F. *et al.* Estudo de tratabilidade em escala piloto de processo de fitorremediação aeróbio-anaeróbio para pós-tratamento de esgoto sanitário. *In: II COLÓQUIO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA UniFOA*, 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 2008, v. 3, n.1.

ANDRADE, A. C. de. **Cultivo de tilápia do nilo (*oreochromis niloticus*) em efluente do sistema de lagoas de estabilização da estação de tratamento de esgotos de samambaia - DF**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

BAGATUR, T. Evaluation of pre aeration with V-notch weir and cascade structures in clarifiers. **Journal of Environmental Engineering**, Nova Iorque, v. 135, p. 176-184. 2009.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Desenvolvimento de metodologia para a determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso**. 1989. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989.

BARROS, F. M. *et al.* Balanço de oxigênio no rio Turvo Sujo-MG em diferentes épocas do ano. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 19, n. 1, p. 71-80, 2010.

BAYLAR, A.; EMIROGLU, M. E.; BAGATUR, T. Influence of chute slope on oxygen content in stepped waterways. **Gazy University Journal of Science**, v. 22, n. 4, p. 325-332, 2009.

BENASSI, R. F. (org.). **Manual de sistemas de wetlands construídas para o tratamento de esgoto sanitário: implantação, operação e manutenção**. Sabesp, FUNASA, 2018, 53 p. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/326352770\\_Manual\\_de\\_sistemas\\_de\\_Wetlands\\_construidas\\_para\\_o\\_tratamento\\_de\\_esgotos\\_sanitario\\_implantacao\\_operacao\\_e\\_manutencao](https://www.researchgate.net/publication/326352770_Manual_de_sistemas_de_Wetlands_construidas_para_o_tratamento_de_esgotos_sanitario_implantacao_operacao_e_manutencao)>

BEVILACQUA, P. D. *et al.* Uso de esgotos tratados para produção animal. *In*: FLORENCIO, L. *et al.* **Reúso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologias de tratamento para esse fim**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2006.

BHATNAGAR, A.; DEVI, P. Water quality guidelines for the management of pond fish culture. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 3, n. 6, p. 1980–2009, 2013.

BIASSO, V. C. de. **Tratamento de efluente na indústria de eucalipto utilizando eletroflotação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

BIOLCHINI, J. *et al.* Systematic review in software engineering. System Engineering and Computer Science Department COPPE/UFRJ, **Technical Report ES**, v. 679, n. 05, p. 45, 2005.

BOHORQUEZ, E.; PAREDES, D.; ARIAS, C. A. Vertical flow-constructed wetlands for domestic wastewater treatment under tropical conditions: Effect of different design and operational parameters. **Environmental Technology**, v. 38, n. 2, p. 199-208, 2017.

BOYD, C. E. **Water Quality Management and Aeration in Shrimp Farming**. Fisheries and Allied Aquacultures Departmental Series, Auburn University, 83 p. 1989.

BOYD, C. E. Pond water aeration systems. **Aquacultural Engineering**, v. 18, p. 9-40, 1998.

BOYD, C. E.; TUCKER, E. L. T. C. S. Dissolved Oxygen and Aeration in Ictalurid Catfish Aquaculture. **Journal of the world aquaculture society**, v. 49, n. 1, p. 7-70, 2018.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <[www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf)>. Acesso em: 10 ago. de 2020.

BUZZELLI, G. M.; CUNHA-SANTINO, M. B. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP). **Ambi-Agua**, Taubaté, v.8, n. 1, p. 186-205, 2013.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling**. McGraw-Hill, 1997.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. 7. ed. Nova Iorque: McGrawHill Education, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Belo Horizonte: v. 2, p. 55-63, 2001.

COOPER, P. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. **Water Science and Technology**, v. 40, n.3, p. 1-9, 1999.

COOPER, P. *et al.* Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 283-289, 1999.

CÔRREA, L. C. **Controle do processo da transferência de oxigênio em corpos hídricos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

COSTA, C. W. **Mapeamentos geoambientais, em escala 1:50.000, aplicados em análises de planejamento territorial de manancial periurbano: bacia do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**. 2018. Dissertação (Doutorado em Ciências Ambientais) – Faculdade de Medicina, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

COSTA, D. J. L. **Estudo da influência de macro-rugosidades do leito de um canal hidráulico sobre o coeficiente de reoxigenação superficial**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia hidráulica e saneamento) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COSTA, D. J. L. **Modelo Matemático para Avaliação Hidrodinâmica de Escoamentos em Regime Não-permanente**. 2015. Dissertação (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

DANCKWERTS, P. V. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 43, n. 6, p. 1460-1467, 1951.

DAVIS, L (Org.). **A handbook of constructed wetlands: a guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region**. Pennsylvania: USDA and the USEPA Region III, 1994.

DELONG, D. P.; LOSORDO, T. M.; RAKOCY, J. E. Tank culture of tilapia. **SRAC**, v. 282, p. 1–8, 2009.

DIAS, E. H. O. *et al.* Eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal em wetlands construídas: avaliação comparativa entre modelagens teóricas e dados reais de um sistema piloto no sudeste do Brasil. *In*: XXXII CONGRESSO AIDIS, 2010, Punta Cana. **Anais [...]**. República Dominicana: ABES, 2010. p. 1-7.

DIAS, V. N. *et al.* Fito-etars: pressupostos teóricos de funcionamento e tipos. *In*: 9º ENCONTRO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO, 2000, Loures. **Anais [...]**. Portugal: 2000, p. 587-607.

DUARTE, S. **Estudo das potencialidades das zonas húmidas artificiais no tratamento de efluentes aquícolas**. 2002. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Engenharia do Ambiente) – Departamento de Engenharia Biológica e Química, Universidade de Lisboa, Portugal, 2002.

EFFENDI, H. *et al.* Ammonia and orthophosphate removal of tilapia cultivation wastewater with *Vetiveria zizanioides*. **Journal of King Saud University**, v. 32, p. 207-212, 2018.

ENDUT, A. *et al.* Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. **Desalination and Water Treatment**, v. 32, p. 422-430, 2011.

ESCOLA ESTADUAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL - EEEP. **Limnologia e qualidade da água**. Ceará: Governo do Estado do Ceará, Secretaria da educação, 2011, 65 p. Disponível em: <[https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/01/aquicultura\\_limnologia\\_e\\_qualidade\\_da\\_agua.pdf](https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/01/aquicultura_limnologia_e_qualidade_da_agua.pdf)>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2014 **Cultured aquatic species information programme: *Oreochromis niloticus***. Disponível em: <[http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis\\_niloticus/en](http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/en)>. Acesso em: 10 ago. de 2020.

GARCÍA-ÁVILA, F. *et al.* Performance of *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. **International Soil and Water Conservations Research**, v. 7, p. 286-296, 2019.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GIORGETTI, M. F. **Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia**. São Carlos: Suprema, 2008.

HALLIGAN, E. A. *et al.* Vegetative and floral shoot development of *Zantedeschia black magic*. **Sci Hortic**, v. 99, p. 55-65, 2004.

HIGBIE, R. The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure. **Transactions of the AIChE**, v. 31, p. 365-389, 1935.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. **Treatment wetlands**. 2. ed. Boca Raton: CRC press, 2008. 348 p.

KEPENYES, J., VÁRADI, L. Aeration and oxygenation in aquaculture. *In*: INLAND AQUACULTURE ENGINEERING, 1984. **Anais [...]**. Aquaculture Development and Coordination Programme, UNDP, FAO, UDCP/REP/84/21, 1984, p. 473-50.

KOOTTATEP, T. *et al.* Potentials of vertical-flow constructed wetlands for septage treatment in tropical regions. **Water and Sanitation in Developing Countries**. 2001. Department Sanitation, Water and Solid Waste for Development. Disponível em: <<https://www.eawag.ch/en/departament/sandec/#FSM>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

KUMAR, A. *et al.* Design characteristics of pooled circular stepped cascade aeration system. **Aquacultural Engineering**, New York, v. 56, p. 51-58, 2013.

LEONEL, L. F.; MARTELLI, L. F. A.; SILVA, W. T. L. da. Avaliação do efluente de fossa séptica biodigestora e jardim filtrante. *In*: III SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT, 2013, São Pedro. **Anais [...]**. São Paulo: SIGERA, p. 1-4, 2013.

LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. Principles of gas absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, n. 12, p. 825-833, 1924.

MACEDO, C. F.; SIPAÚBA-TAVARES, L. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações. **Bol. Inst. Pesca**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 149-163, 2010.

MACHADO, A. I. *et al.* Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. **Journal of Environmental Management**, 2016.

MACHADO, F. H.; DUPAS, F. A. Valoração de recursos hídricos como subsídio na gestão do manancial urbano do Ribeirão do Feijão, São Carlos - SP. **GEOUSP - espaço e tempo**, n. 3, p. 111-126, 2013.

MANGO, N. *et al.* Awareness and adoption of land, soil and water conservation practices in the Chinyanja Triangle, Southern Africa. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 5, p. 122-129, 2017.

MATOS, A. T.; JÚNIOR, V. E.; MATOS, M. P. Eficiência de aeração e consumo de oxigênio no tratamento de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro em sistema de aeração em cascata. **Eng. Agríc.**, v. 35, n. 5, Jaboticabal, 2015.

MATTOS, D. G. **Sistema antioxidante de Copo-de-leite submetido à baixa temperatura**. 2019. Dissertação (Doutorado em Produção Vegetal) – Programa de pós-graduação em agronomia/fitotecnia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2019.

MEI, X. *et al.* Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater. **Water Research**, v. 50, p. 147-159, 2014.

NAOR, V. *et al.* A developmental pattern of flowering in coloured *Zantedeschia* spp.: Effects of bud position and gibberellin. **Journal of Plant Growth and Regulation**, v. 23, p. 269-279, 2005.

NAYLOR, R. L. Effect of aquaculture on world fish supplies. **Nature**, v. 405, p. 1017–1024, 2000.

OBERLE, M. *et al.* Diurnal stratification of oxygen in shallow aquaculture ponds in central Europe and recommendations for optimal aeration. **Aquaculture**, v. 501, p. 482–487, 2019.

OJOAWO, S. O., UDAYAKUMAR, G., NAIK, P. Phytoremediation of phosphorus and nitrogen with *Canna x generalis* reeds in domestic wastewater through NMAMIT constructed wetland. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 349–356, 2015.

OLIVEIRA, C. V. S. de. **Tratamento de águas cinzas domésticas por *wetland* de escoamento subsuperficial contendo macrófitas aquáticas**: um estudo de caso.

2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2014.

ORIMOLOYE, I. R. *et al.* Geospatial analysis of wetland dynamics: Wetland depletion and biodiversity conservation of Isimangaliso Wetland. **Journal of King Saud University Science**, South Africa, 2018.

PASCO, J. J. M. **Aeração em cultivos superintensivos de tilápias *Oreochromis niloticus*, em bioflocos e com troca mínima de água.** 2015. Dissertação (Doutorado em Aquicultura) – Programa de Pós-Graduação em Aquicultura, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

PAWLOWICZ, R. Calculating the conductivity of natural waters. **Limnology and Oceanography**, Waco, v. 6, p. 489–501, 2008.

PELO, S. P. **Phytochemical analysis and antibacterial properties of *Zantedeschia Aethiopica*.** 2016. Dissertação (Doutorado em Biotecnologia) – Faculdade de Ciência, Universidade de Johannesburgo, África do Sul, 2016.

PETRUF, L. A.; SACCO, V. A.; LUCIO, L. C. Oxigênio dissolvido (OD), potencial hidrogeniônico (pH), temperatura e condutividade elétrica como parâmetros físico-químicos da água do Ribeirão Morangueira, Maringá/PR. *In: VII EPCC, 2011, Maringá. Anais [...].* Paraná: CESUMAR, p. 1-4, 2011.

PINTO, M. J. R. **Avaliação de condições ambientais de nascentes de cursos de água:** Ferramenta de subsídio à gestão de recursos hídricos e ao planejamento de bacias hidrográficas. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, 2019.

PIMENTEL, M. L. **Descrição de manejo do policultivo tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) e camarão marinho (*Litopenaeus vannamei*) em viveiros estuarinos.** 2006. Monografia (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

POPMA, T.; MASSER, M. Tilapia Life Story and Biology. **Southern Regional Aquaculture Center Publication**, n. 283, 1999.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p. 429-448, 2012.

SAMPAIO, S. C. *et al.* Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuais. **Irriga**, v. 12, n. 4, p. 557-562, 2007.

SANCHEZ, A. A. **Desempenho de sistema piloto de alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal no tratamento secundário de efluente sanitário**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do ABC, 2017.

SANDOVAL, L. C. *et al.* Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. **Sustainability**, v. 9, 2018.

SCHROEDER, E. D. **Water and wastewater treatment**, McGraw-Hill, p.97, 1977.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO (SAAE). **Mananciais**. Disponível em: <https://www.saaesaocarlos.com.br/saaesc/index.php/agua/mananciais>. Acesso em: 19 de jun. de 2020.

SHIAU, C. C. **Oxygen transfer in bubble and bubbleless aeration systems**. 1995. Dissertação (Doutorado) – University of Wollongong, Department of civil and Mining Engineering, 1995.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: UFSC, 4ª ed. rev. e atual., 2005.

SILVA, S. C. **“Wetlands Construídos” de Fluxo Vertical com Meio Suporte de Solo Natural Modificado no Tratamento de Esgotos Domésticos**. 2007. Dissertação (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVA, V. K.; FERREIRA, M. W.; LOGATO, P. V. R. 2001. **Qualidade da Água na Piscicultura**. Boletim de Extensão da UFLA, Lavras, MG, n. 94. Disponível em:<<http://www.editora.ufla.br>>. Acesso em: 28 de dez. de 2020.

SISTE, C. E. *et al.* **Manual para formação e capacitação de grupos comunitários em metodologias participativas de monitoramento de qualidade da água**. Carlos Eduardo Siste, Enio Giuliano Girão, Bryan L. Duncan; tradução Ivan Vieira (Org.), 2011, 48 p. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical. ISSN: 2179-8184.

SLAUGHTER, R. J. *et al.* Poisonous plants in New Zealand: A review of those that are most commonly enquired about to the national poisons centre. **New Zealand Medical Journal**, v. 125, n.1367, p. 87-118, 2012.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 2005, 452 p.

SPERLING, M. V. **Waste Stabilisation Ponds**. IWA Publishing, 2007, v. 3, 175 p.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 2014. v. 1. 472 p.

SPERLING, M. V. **Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos**. 4. ed., v. 2. Editora UFMG, 2016.

STONE, N. M.; THOMFORDE, H. K. **Understanding Your Fish Pond Water Analysis Report**. Cooperative Extension Program, University of Arkansas at Pine Bluff Aquaculture / Fisheries, 2004.

SULTANA, T. *et al.* Effect of aeration on growth and production of fish in intensive aquaculture systems in earthen ponds. **J. Bangladesh Agril. Univ.**, Bangladesh, v. 15, n. 1, p. 113–122, 2017.

TRUU, M.; JUHANSON, J.; TRUU, J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 13, p. 3958-3971, 2009.

TUCKER, C. **Pond Aeration**. SRAC, n. 3700, 8 p, 2005. Disponível em: <[https://freshwater-aquaculture.extension.org/wp-content/uploads/2019/08/Pond\\_Aeration.pdf](https://freshwater-aquaculture.extension.org/wp-content/uploads/2019/08/Pond_Aeration.pdf)>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**. Office of Research and Development. Cincinnati (OH), 2000.

VIEIRA, M. R. **Os principais parâmetros monitorados pelas sondas multiparâmetros são: pH, condutividade, temperatura, turbidez, clorofila ou cianobactérias e oxigênio dissolvido**. Disponível em: <[http://www.agsolve.com.br/news\\_upload/file/Parametros%20da%20Qualidade%20da%20Agua.pdf](http://www.agsolve.com.br/news_upload/file/Parametros%20da%20Qualidade%20da%20Agua.pdf)>. Acesso em: 14 jul. 2020.

VINATEA, L. **Princípios químicos de qualidade da água em aquicultura**. 2 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 61–69, 2011.

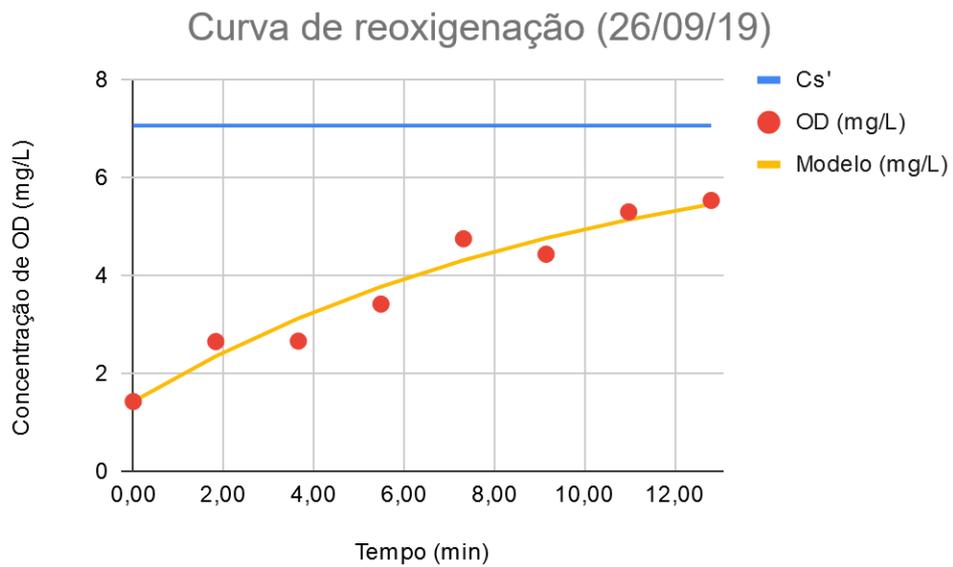
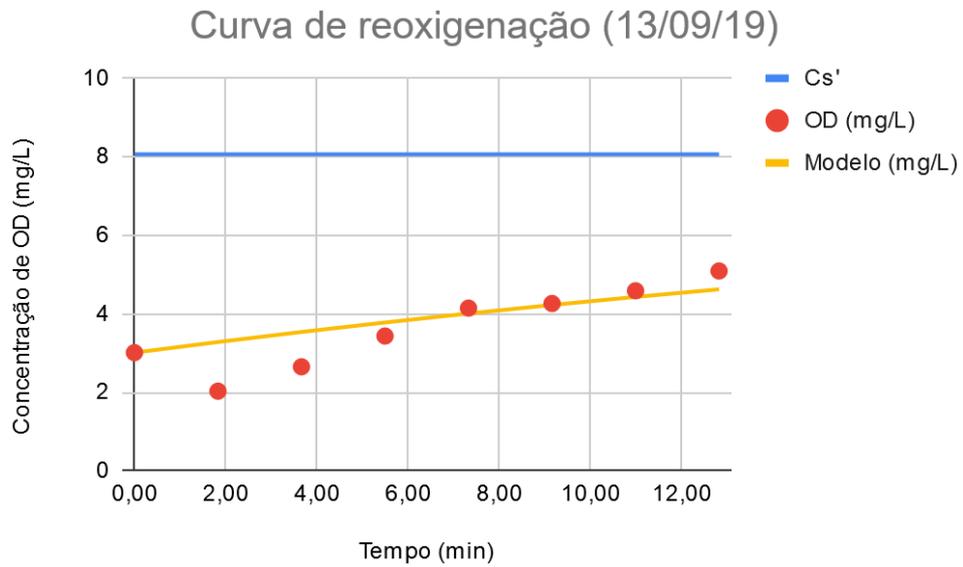
WEI, Z. Z. *et al.* Identification and characterization of 43 novel polymorphic EST-SSR markers for Arum lily, *Zantedeschia aethiopica* (Araceae). **American Journal of Botany**, v. 99, n. 12, p. 493-497, 2012.

WOOD, A. Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 21–29, 1995.

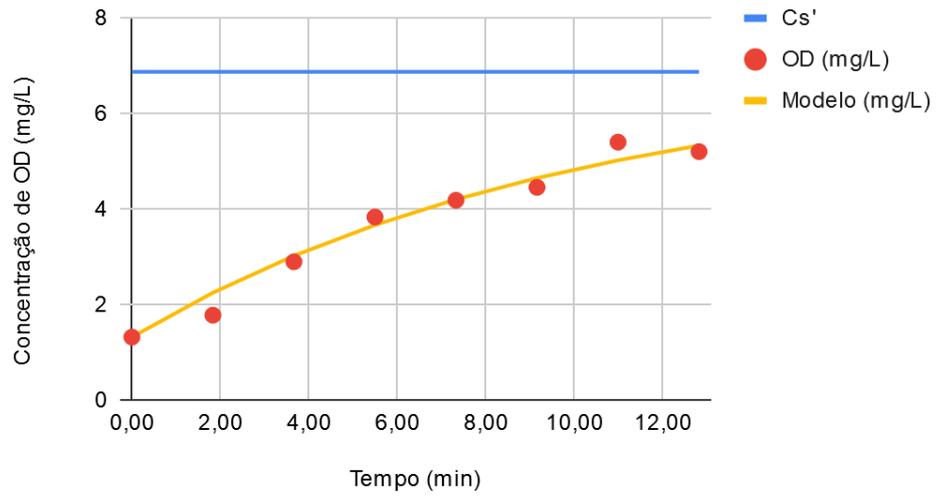
ZHANG, L. *et al.* Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater. **Desalination**, v. 250, p. 915–920, 2010.

## APÊNDICE

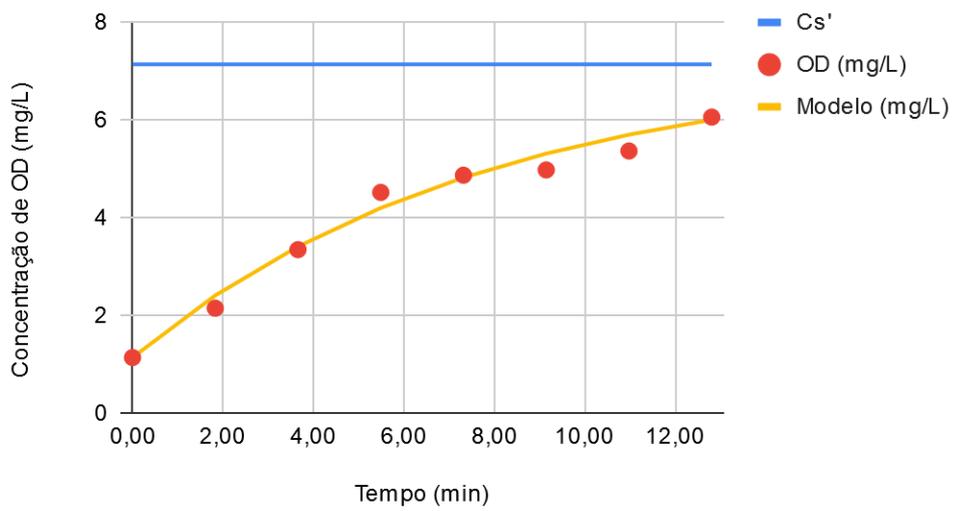
Curvas de reoxigenação para cada coleta realizada.



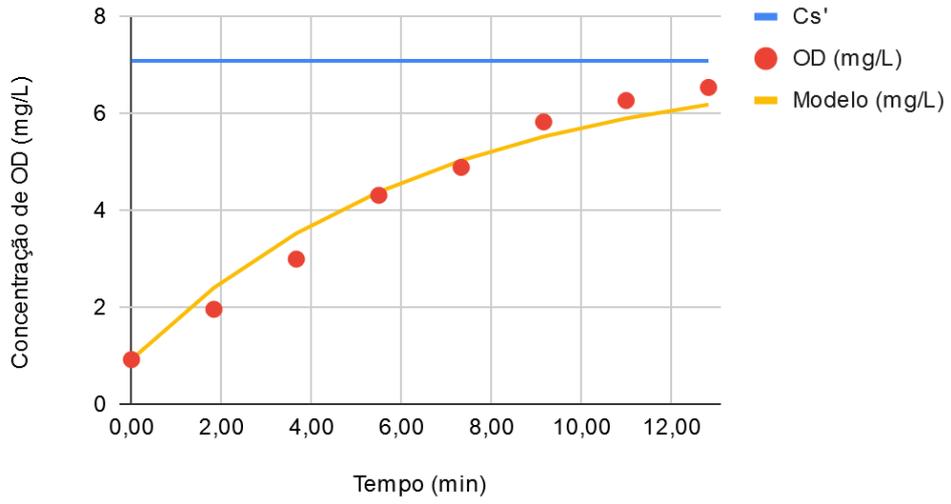
Curva de reoxigenação (11/10/19)



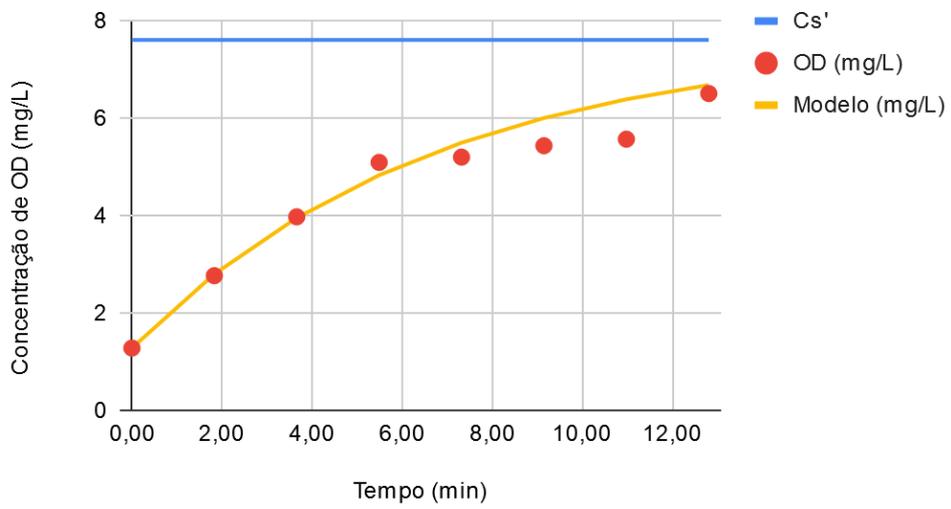
Curva de reoxigenação (24/10/19)



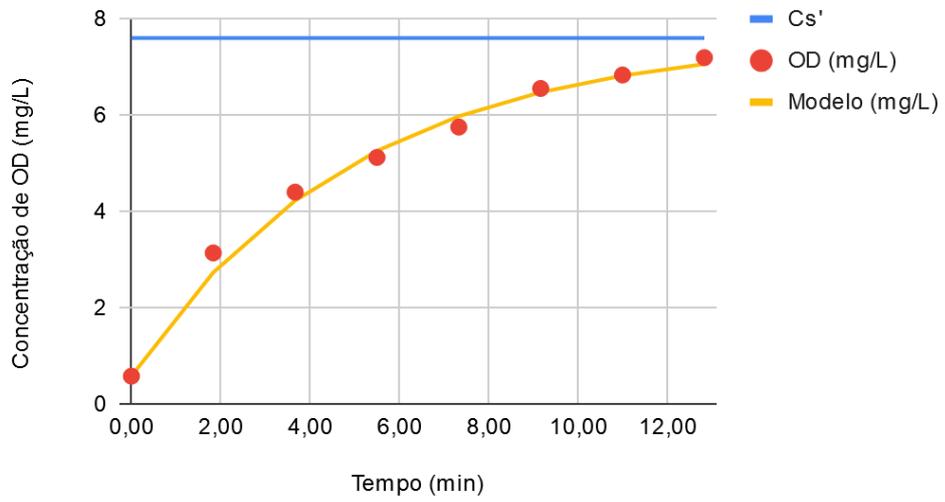
Curva de reoxigenação (07/11/19)



Curva de reoxigenação (06/02/20)



Curva de reoxigenação (22/10/20)



Curva de reoxigenação (29/10/20)

