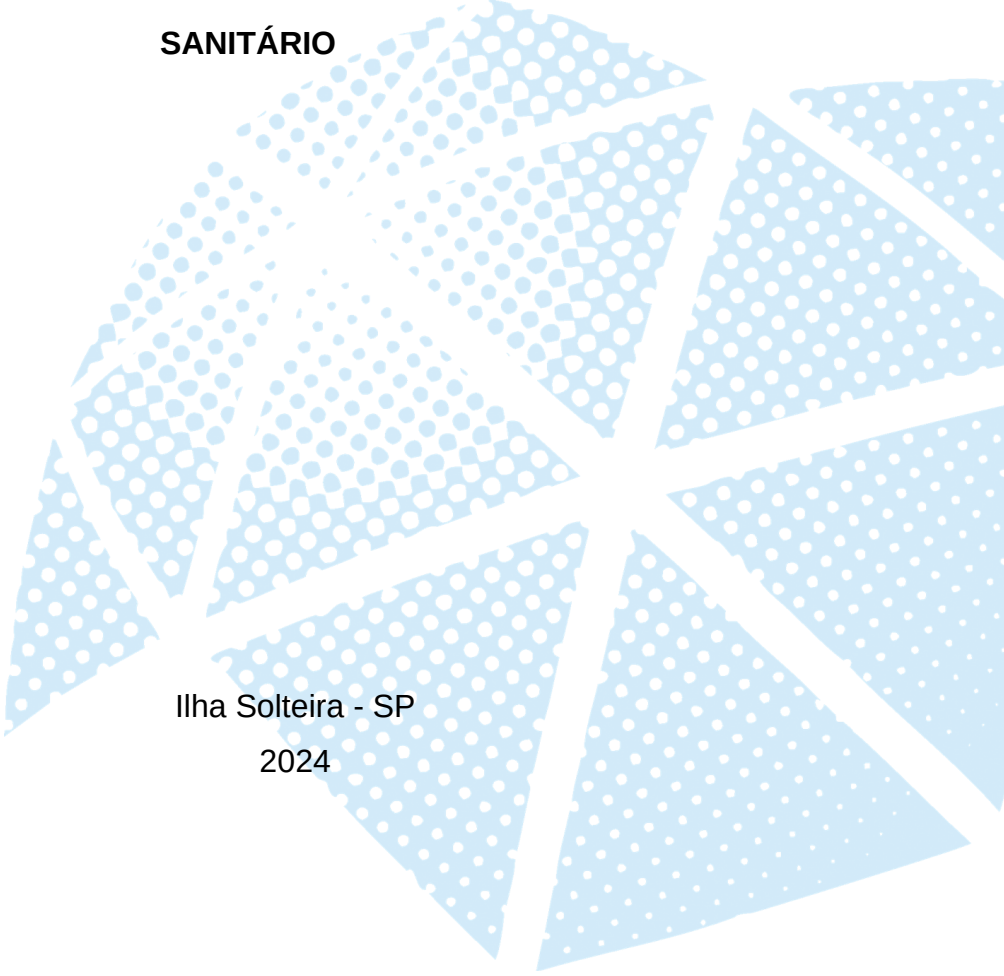


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ANA BEATRIZ LALUCE VAZ

CULTIVO DE *Wolffia brasiliensis* NO POLIMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO

Ilha Solteira - SP
2024



ANA BEATRIZ LALUCE VAZ

**CULTIVO DE *Wolffia brasiliensis* NO POLIMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Tsunao Matsumoto

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

V393c Vaz, Ana Beatriz Lalue. Cultivo de wolffia brasiliensis no polimento de esgoto sanitário / Ana Beatriz Lalue Vaz. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
226 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2024

Orientador: Tsunao Matsumoto
Inclui bibliografia

1. Polimento de esgoto. 2. Wolffia. 3. Macrófitas aquáticas. 4. Sistema de recirculação. 5. Águas residuárias.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto desta pesquisa reside na apresentação de um polimento biológico aos sistemas usuais de tratamento de efluentes, geralmente incapazes de remover todos os nutrientes presentes. O pós-tratamento com a macrófita aquática *Wolffia brasiliensis* apresenta elevada eficiência na remoção de nutrientes e matéria orgânica, evitando a eutrofização de recursos hídricos, mitigando os impactos causados pelo despejo de esgoto sanitário em corpos hídricos e contribuindo diretamente com o item nº 6 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o qual visa melhorar a qualidade da água e diminuir a quantidade de águas residuais não tratadas, através da minimização do uso de produtos químicos, resultando na reutilização segura à nível global. Consiste em um tratamento com baixo custo de implementação, operação e manutenção, apresentando-se como solução para a falta de recursos financeiros destinados ao tratamento de esgotos domésticos em diversos países, com destaque o Brasil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The impact of this research is to present a biological polishing to the usual effluent treatment systems, which are generally incapable to remove all the present nutrients. Post-treatment with the aquatic macrophyte *Wolffia brasiliensis* is highly efficient to remove nutrients and organic matter, preventing the eutrophication of water resources, mitigating the impacts caused by the discharge of sanitary sewage into water bodies and contributing directly to item 6 of the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs), which aims to improve water quality and reduce the amount of untreated wastewater by minimizing the use of chemicals, resulting in safe reuse globally. It is a low-cost treatment for implementation, operation and maintenance, and is a solution to the lack of financial resources for domestic sewage treatment in many countries, especially in Brazil.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CULTIVO DE WOLFFIA BRASILIENSIS NO POLIMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

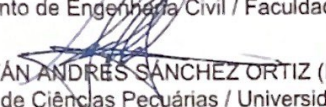
AUTORA: ANA BEATRIZ LALUCE VAZ

ORIENTADOR: TSUNAO MATSUMOTO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área:
Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. IVÁN ANDRÉS SANCHEZ ORTIZ (Participação Virtual)
Faculdade de Ciências Pecuárias / Universidad de Nariño



Documento assinado digitalmente

ALESSANDRO MINILLO

Data: 22/05/2024 15:17:40-0300

Verifique em <https://validar.j5.gov.br>

Prof. Dr. ALESSANDRO MINILLO (Participação Virtual)
Centro de Estudos em Recursos Naturais / Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS

Ilha Solteira, 22 de maio de 2024

Dedico este trabalho à minha
família, por toda ajuda, apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo amparo nos momentos difíceis, pelo dom da vida, pela força e sabedoria e por todas as bênçãos concedidas.

Meus pais Paulo Roberto Dias Vaz e Marilis Lalue Vaz pelo apoio e amor incondicionais e por toda ajuda e incentivo.

Aos meus tios e primas Margareth Rose Vaz Marini, Luiz Henrique Marini, Bianca Luiza Vaz Marini e Amanda Luma Vaz Marini, sem os quais nada disso seria possível.

Aos meus avós Maria Joana Dias Vaz (in memoriam) e Teotonio José Vaz (in memoriam) por todos os ensinamentos, amor e dedicação.

Ao meu orientador, prof. Dr. Tsunao Matsumoto, por todo tempo, auxílio, atenção e disposição para realização deste trabalho. Sou muito grata a todos os ensinamentos que recebi durante toda essa jornada de trabalho.

À prof. Dr.^a Liliane Santos de Camargos, por ceder as instalações dos laboratórios necessários às análises e por todo auxílio com os procedimentos a serem executados.

À prof. Dr.^a Liliane Lazzari Albertin por todas as contribuições no exame geral de qualificação e pela oportunidade de realizar e aprender com o Programa de Aperfeiçoamento e Apoio à Docência no Ensino Superior.

Ao prof. Dr. Iván Andrés Sánchez Ortiz pelas contribuições na disciplina ministrada, no exame de qualificação e por aceitar compor a banca examinadora.

Aos pesquisadores Dr. Denilson Burkert e Dr. Alessandro Minillo pelo interesse e disposição em fazerem parte da banca examinadora deste trabalho.

À prof. Dr.^a Rosane Freire Boina pela disposição e participação na banca examinadora da qualificação e defesa.

A todos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

VAZ, A. B. L. **Cultivo de *Wolffia brasiliensis* no polimento de esgoto sanitário.** 2024. 226f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024.

A implementação de tecnologias de tratamento de águas residuais, com baixo custo de instalação e manutenção, além de resultados eficientes, é fundamental no Brasil, tendo em vista que os recursos financeiros destinados ao tratamento de esgotos municipais são escassos. Os sistemas usuais de tratamento de efluentes mostram-se incapazes de remover todos os nutrientes presentes, prejudicando corpos hídricos receptores. As macrófitas aquáticas são utilizadas como forma de remoção de nutrientes, tornando-se uma alternativa viável de tratamento e polimento de águas residuárias, atuando como amenizador dos impactos ambientais e promovendo a preservação dos recursos hídricos. Diante disto, esse trabalho avaliou o polimento do efluente tratado em lagoa facultativa primária na Estação de Tratamento de Esgoto de Ilha Solteira – SP, com a macrófita aquática do gênero *Wolffia*, espécie *brasiliensis*. Foram avaliadas diferentes formas de cultivo, verificando condições de desenvolvimento da planta como luminosidade, temperatura e concentração do efluente receptor, e suas respectivas eficiências no pós-tratamento de esgoto para os parâmetros de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), turbidez, Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (PT), Sólidos Totais (ST), Sólidos Suspensos Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos (SD). As maiores eficiências de remoção obtidas na pesquisa para DQO, DBO, turbidez, NT, PT, ST, SST e SD foram de 86%, 99%, 99%, 100%, 100%, 61%, 95% e 13%, respectivamente. Ademais, realizou-se a caracterização química da biomassa da macrófita produzida em pesquisa, analisando possíveis formas de seu reaproveitamento, e obteve-se, como valores mais elevados, 30,87% de proteína, 9,5% de amido, 4,94% de nitrogênio e 0,86% de fósforo.

Palavras-chave: Polimento de esgoto; *Wolffia*; Macrófitas aquáticas; Sistema de recirculação; Águas residuárias.

ABSTRACT

VAZ, A.B.L. **Cultivation of *Wolffia brasiliensis* to polish sanitary sewage.** 2024. 226l. Thesis (Master's Degree) – Engineering Faculty, São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024.

The implementation of low installation and maintenance costs treatment technologies, as well as efficient results, it is essential in Brazil, given that financial resources for municipal sewage treatment are scarce. The usual effluent treatment systems are incapable to remove all present nutrients, damaging the receiving water bodies. Aquatic macrophytes are used as a way of removing nutrients, making them a viable alternative for treating and polishing wastewater, mitigating environmental impacts, and promoting preservation of water resources. In view of this, this study evaluated the polishing of treated effluent in a primary facultative lagoon at the Ilha Solteira – SP Sewage Treatment Plant, using the aquatic macrophyte of the gender *Wolffia*, species *brasiliensis*. Different cultivation methods were evaluated, checking plant development conditions such as luminosity, temperature and concentration of the receiving effluent, and their respective efficiencies in sewage after treatment for the parameters of Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Turbidity, Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), Total Solids (TS), Total Suspended Solids (TSS) and Dissolved Solids (DS). The highest removal efficiencies obtained in this study for COD, BOD, Turbidity, TN, TP, TS, TSS and DS were 86%, 99%, 99%, 100%, 100%, 61%, 95% and 13%, respectively. In addition, the chemical characterization of the macrophyte biomass produced in the research was carried out, analyzing possible ways of reusing it, and the highest values were 30.87% protein, 9.5% starch, 4.94% nitrogen and 0.86% phosphorus.

Keywords: Sewer polishing; *Wolffia*; Aquatic macrophytes; Recirculation system; Wastewater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Índices de captação de água por continente.....	35
Figura 2	- Fluxograma dos principais sistemas de lagoa de estabilização....	43
Figura 3	- Formas biológicas de macrófitas aquáticas.....	45
Figura 4	- Representação de processos que ocorrem durante o tratamento de efluentes, em lagoas com <i>lemnáceas</i>	47
Figura 5	- Morfologia das <i>lemnáceas</i>	48
Figura 6	- Distribuição geográfica da subfamília <i>Lemnoideae</i>	49
Figura 7	- Lagoa coberta por <i>lemnas</i>	50
Figura 8	- Comportamento do fósforo em lagoa com presença de <i>lemnas</i> ...	51
Figura 9	- <i>Wolffia arrhiza</i>	52
Figura 10	- <i>Wolffia brasiliensis</i>	52
Figura 11	- Vista da <i>Wolffia arrhiza</i>	55
Figura 12	- Vista da <i>Wolffia brasiliensis</i>	56
Figura 13	- Vista da <i>Wolffia columbiana</i>	56
Figura 14	- Vista da <i>Wolffia cylindracea</i>	57
Figura 15	- Vista da <i>Wolffia globosa</i>	57
Figura 16	- Local de coleta da <i>Wolffia</i> no centro de detenção provisória de São José do Rio Preto.....	58
Figura 17	- Esquema da ETE de Ilha Solteira -SP.....	59
Figura 18	- Fluxograma das etapas realizadas em pesquisa.....	60
Figura 19	- ETE de Ilha Solteira – SP.....	63
Figura 20	- Fluxograma da primeira etapa.....	64

Figura 21	- Unidade experimental utilizada, contendo iluminação e caixas de cultivo.....	65
Figura 22	- Caixas de cultivo do experimento bancada.....	66
Figura 23	- Sistema de cultivo para experimento de bancada.....	67
Figura 24	- Caixas de cultivo do experimento bancada.....	68
Figura 25	- Fluxograma da segunda etapa.....	70
Figura 26	- Organização das caixas de cultivo para a segunda etapa da pesquisa.....	71
Figura 27	- Sistema de cultivo dentro do laboratório.....	72
Figura 28	- ETE de Ilha Solteira - SP com pontos de coleta.....	73
Figura 29	- Detalhamento das lâmpadas utilizadas para terceira etapa do experimento.....	76
Figura 30	- Sistema completo utilizado para terceira etapa do experimento...	77
Figura 31	- Organização das caixas de cultivo internas.....	78
Figura 32	- Local de disposição das caixas de cultivo externas na estufa.....	78
Figura 33	- Disposição das caixas externas para a terceira etapa do experimento.....	79
Figura 34	- Vistas microscópicas da <i>Wolffia brasiliensis</i> adotada para pesquisa com ampliação de 50x.....	81
Figura 35	- Vista microscópica da <i>Wolffia brasiliensis</i> com medidas de comprimento com ampliação de 50x.....	82
Figura 36	- Monitoramento da densidade da <i>Wolffia</i> no primeiro ciclo dos experimentos iniciais.....	83
Figura 37	- Monitoramento da densidade da <i>Wolffia</i> no segundo ciclo dos experimentos iniciais.....	84

Figura 38	- Monitoramento da densidade da <i>Wolffia</i> no terceiro ciclo dos experimentos iniciais.....	86
Figura 39	- Resultados DQO para o terceiro ciclo do experimento inicial.....	87
Figura 40	- Eficiência obtida na remoção da DQO durante o terceiro ciclo da primeira etapa.....	88
Figura 41	- Resultados DBO para o terceiro ciclo do experimento inicial.....	89
Figura 42	- Eficiência obtida na remoção da DBO durante o terceiro ciclo da primeira etapa.....	90
Figura 43	- Resultados da turbidez para o terceiro ciclo do experimento inicial.....	91
Figura 44	- Eficiência obtida na remoção da turbidez durante o terceiro ciclo da primeira etapa.....	92
Figura 45	- Monitoramento da densidade da <i>Wolffia</i> no quarto ciclo dos experimentos iniciais.....	93
Figura 46	- Resultados da redução da DQO para o quarto ciclo do experimento inicial.....	94
Figura 47	- Eficiência obtida na remoção da DQO durante o quarto ciclo da primeira etapa.....	95
Figura 48	- Resultados da remoção de DQO no quarto ciclo do experimento inicial.....	96
Figura 49	- Eficiência obtida na remoção da DQO durante o quarto ciclo da primeira etapa.....	97
Figura 50	- Resultados da turbidez para o quarto ciclo dos experimentos iniciais.....	98
Figura 51	- Eficiência obtida na remoção de turbidez durante o quarto ciclo da primeira etapa.....	99

Figura 52	- Resultados das temperaturas médias internas e externas para os dois ciclos da segunda etapa.....	101
Figura 53	- Resultado do pH para o primeiro ciclo da segunda etapa.....	102
Figura 54	- Resultado do pH para o segundo ciclo da segunda etapa.....	103
Figura 55	- Resultados de OD para o primeiro ciclo da segunda etapa.....	106
Figura 56	- Resultados de OD para o segundo ciclo da segunda etapa.....	107
Figura 57	- Resultados da DQO para os seis primeiros dias de experimento do primeiro ciclo da segunda etapa.....	109
Figura 58	- Resultados da DQO do 9° ao 13° dia do primeiro ciclo da segunda etapa.....	110
Figura 59	- Resultados da DQO do 15° ao 20° dia do primeiro ciclo da segunda etapa.....	112
Figura 60	- Resultados da DQO do 22° ao 27° dia do primeiro ciclo da segunda etapa.....	113
Figura 61	- Resultados da DQO do 29° ao 25° dia do primeiro ciclo da segunda etapa.....	114
Figura 62	- Comportamento das caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO.....	115
Figura 63	- Comportamento das caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO.....	116
Figura 64	- Eficiências obtidas para remoção da DQO no primeiro ciclo da segunda etapa.....	117
Figura 65	- Resultados da DQO para os seis dias iniciais do segundo ciclo...	118
Figura 66	- Resultados para a DQO do 8° ao 13° dia do segundo ciclo.....	119
Figura 67	- Resultados para a DQO do 15° ao 20° dia do segundo ciclo.....	120

Figura 68	- Resultados para a DQO do 22° ao 27° dia do segundo ciclo.....	122
Figura 69	- Resultados para a DQO do 29° ao 35° dia do segundo ciclo.....	123
Figura 70	- Comportamento das caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO.....	124
Figura 71	- Comportamento das caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO.....	125
Figura 72	- Eficiências obtidas para remoção da DQO no segundo ciclo da segunda etapa.....	126
Figura 73	- Resultados da DBO para as caixas internas e externas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	127
Figura 74	- Resultados da DBO para as caixas internas e externas do segundo ciclo da segunda etapa.....	128
Figura 75	- Eficiências observadas para a remoção da DBO em ambos os ciclos da segunda etapa.....	129
Figura 76	- Resultados da Turbidez para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	131
Figura 77	- Resultados da Turbidez para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	132
Figura 78	- Resultados da Turbidez para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa.....	133
Figura 79	- Resultados da Turbidez para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa.....	134
Figura 80	- Eficiência observada na remoção da Turbidez para ambos os ciclos da segunda etapa.....	135
Figura 81	- Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas internas para o primeiro ciclo da segunda etapa.....	137

Figura 82	- Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas externas para o primeiro ciclo da segunda etapa.....	137
Figura 83	- Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas internas para o segundo ciclo da segunda etapa.....	138
Figura 84	- Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas externas para o segundo ciclo da segunda etapa.....	139
Figura 85	- Eficiência observada para a remoção de NT em ambos os ciclos da segunda etapa.....	140
Figura 86	- Resultados da concentração de Fósforo Total para o primeiro ciclo da segunda etapa.....	142
Figura 87	- Resultados da concentração de Fósforo Total para o segundo ciclo da segunda etapa.....	143
Figura 88	- Eficiência observada para a remoção de PT em ambos os ciclos da segunda etapa.....	144
Figura 89	- Resultados ST para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	145
Figura 90	- Resultados ST para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	146
Figura 91	- Resultados ST para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa.....	147
Figura 92	- Resultados ST para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa.....	148
Figura 93	- Eficiência observada na remoção de ST em ambos os ciclos da segunda etapa.....	149
Figura 94	- Resultados SST para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	150
Figura 95	- Resultados SST para as caixas externas do primeiro ciclo da	151

	segunda etapa.....	
Figura 96	- Resultados SST para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa.....	152
Figura 97	- Resultados SST para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa.....	152
Figura 98	- Eficiências observadas para a remoção de SST em ambos os ciclos da segunda etapa.....	153
Figura 99	- Resultados SD para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	155
Figura 100	- Resultados SD para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa.....	155
Figura 101	- Resultados SD para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa.....	156
Figura 102	- Resultados SD para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa.....	157
Figura 103	- Eficiência observada na remoção de SD em ambos os ciclos da segunda etapa.....	158
Figura 104	- Resultado da caracterização da biomassa da <i>Wolffia</i>	159
Figura 105	- Resultado da caracterização da biomassa da <i>Wolffia</i>	160
Figura 106	- Temperatura média interna e externa ao laboratório durante a terceira etapa.....	164
Figura 107	- Valores obtidos para o pH para as unidades experimentais internas ao laboratório.....	165
Figura 108	- Valores obtidos para o pH para as unidades experimentais externas ao laboratório.....	167
Figura 109	- Valores obtidos para o OD para as unidades experimentais	169

	internas ao laboratório.....	
Figura 110	- Valores obtidos para o OD para as unidades experimentais externas ao laboratório.....	170
Figura 111	- Valores obtidos da turbidez para as unidades experimentais internas ao laboratório.....	172
Figura 112	- Valores obtidos da turbidez para as unidades experimentais externas ao laboratório.....	173
Figura 113	- Regressão linear observada para o parâmetro de turbidez para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D).....	174
Figura 114	- Regressão linear observada para o parâmetro de turbidez para as unidades experimentais CE(A), CWE(B), EDE(C) e CRE(D)...	175
Figura 115	- Valores obtidos de DQO para as unidades experimentais internas ao laboratório.....	180
Figura 116	- Valores obtidos de DQO para as unidades experimentais externas ao laboratório.....	181
Figura 117	- Regressão linear observada para o parâmetro de DQO para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D).....	182
Figura 118	- Regressão linear observada para o parâmetro de DQO para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)....	183
Figura 119	- Resultados para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais internas da terceira etapa.....	186
Figura 120	- Resultados para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais externas da terceira etapa.....	187
Figura 121	- Regressão linear observada para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D).....	188
Figura 122	- Regressão linear observada para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)....	

Figura 123	- Valores observados para o NT das unidades experimentais internas.....	192
Figura 124	- Valores observados para o NT das unidades experimentais externas.....	193
Figura 125	- Regressão linear observada para o parâmetro de NT para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D).....	194
Figura 126	- Regressão linear observada para o parâmetro de NT para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)....	195
Figura 127	- Valores obtidos para PT para as unidades internas da terceira etapa.....	198
Figura 128	- Valores obtidos para PT para as unidades externas da terceira etapa.....	199
Figura 129	- Regressão linear observada para o parâmetro de PT para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D).....	200
Figura 130	- Regressão linear observada para o parâmetro de PT para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)....	201
Figura 131	- Valores obtidos para ST para todas as unidades experimentais da terceira etapa.....	205
Figura 132	- Valores obtidos para SST para todas as unidades experimentais da terceira etapa.....	206
Figura 133	- Valores obtidos para SD para todas as unidades experimentais da terceira etapa.....	207
Figura 134	- Regressão linear observada para o parâmetro de ST para a unidade experimental CE.....	208
Figura 135	- Regressão linear observada para o parâmetro de ST para a unidade experimental CR.....	208
Figura 136	- Regressão linear observada para o parâmetro de SST para a	

	unidade experimental CR.....	209
Figura 137	- Regressão linear observada para o parâmetro de SD para a unidade experimental CE.....	210
Figura 138	- Regressão linear observada para o parâmetro de SD para a unidade experimental CW.....	210
Figura 139	- Caixa externa contendo a <i>Wolffia</i> com elevada quantidade de algas (A), em comparação com a caixa interna que contém a <i>Wolffia</i> (B).....	213

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Principais características químicas dos esgotos domésticos.....	39
Quadro 2	- Principais características físicas dos esgotos domésticos.....	40
Quadro 3	- Parâmetro, métodos e equipamentos utilizados nas análises.....	62
Quadro 4	- Resumo das características principais dos experimentos iniciais.	69
Quadro 5	- Parâmetros analisados e suas respectivas frequências.....	74
Quadro 6	- Análises da caracterização da biomassa.....	75
Quadro 7	- Análises da caracterização da biomassa.....	76
Quadro 8	- Parâmetros analisados e suas respectivas frequências.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição típica de águas residuárias urbanas não tratadas em Portugal e nos Estados Unidos (EUA).....	37
Tabela 2	- Características típicas das águas residuárias domésticas.....	38
Tabela 3	- Resumo de alguns requisitos ambientais importantes para a criação da <i>Wolffia</i>	54
Tabela 4	- Valores obtidos para DQO, DBO e turbidez para o primeiro ciclo da primeira etapa.....	83
Tabela 5	- Valores obtidos para DQO, DBO e turbidez para o segundo ciclo da primeira etapa.....	85
Tabela 6	- Temperatura interna e externa para ambos os ciclos da segunda etapa.....	100
Tabela 7	- Quantidades de reposição de efluente semanal para o primeiro ciclo.....	104
Tabela 8	- Quantidades de reposição de efluente semanal para o segundo ciclo.....	104
Tabela 9	- Resultado do pH para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	105
Tabela 10	- Resultado do pH para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	105
Tabela 11	- Resultados do Oxigênio Dissolvido para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	108
Tabela 12	- Resultados do Oxigênio Dissolvido para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	108
Tabela 13	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	109
Tabela 14	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	111
Tabela 15	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	112
Tabela 16	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas	

	após reposição e DQO analisada.....	114
Tabela 17	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	118
Tabela 18	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	120
Tabela 19	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	121
Tabela 20	- Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.....	122
Tabela 21	- Resultados da DBO para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	130
Tabela 22	- Resultados da DBO para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	130
Tabela 23	- Resultados da turbidez para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	136
Tabela 24	- Resultados da turbidez para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	136
Tabela 25	- Resultados do NT para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	141
Tabela 26	- Resultados do NT para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	141
Tabela 27	- Resultados do PT para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	144
Tabela 28	- Resultados do PT para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	145
Tabela 29	- Resultados do ST para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	149
Tabela 30	- Resultados do ST para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	150
Tabela 31	- Resultados do SST para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	154
Tabela 32	- Resultados do SST para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	154

Tabela 33	- Resultados do SD para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.....	158
Tabela 34	- Resultados do SD para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.....	159
Tabela 35	- Parâmetros analisados para efluentes de reposição.....	161
Tabela 36	- Quantidades necessárias para reposição do efluente.....	162
Tabela 37	- Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de temperatura para a terceira etapa.....	163
Tabela 38	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para o pH.....	165
Tabela 39	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para o OD.....	168
Tabela 40	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para a turbidez.....	171
Tabela 41	- Eficiências de remoção de turbidez para unidades experimentais da terceira etapa.....	176
Tabela 42	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para a DQO.....	177
Tabela 43	- Eficiências de remoção de DQO para a terceira etapa.....	184
Tabela 44	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para a DBO.....	185
Tabela 45	- Eficiências de remoção de DBO para a terceira etapa.....	190
Tabela 46	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para o NT.....	191
Tabela 47	- Eficiências de remoção de NT para a terceira etapa.....	196
Tabela 48	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para o PT.....	197
Tabela 49	- Eficiências de remoção de PT para a terceira etapa.....	202
Tabela 50	- Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente para SST e SD.....	203
Tabela 51	- Médias do desdobramento da interação dupla dos fatores tratamento e dia, para ST.....	204

Tabela 52	- Médias do desdobramento da interação dupla dos fatores ambiente e dia, para ST.....	204
Tabela 53	- Eficiências de remoção de ST para a terceira etapa.....	211
Tabela 54	- Eficiências de remoção de SST para a terceira etapa.....	211
Tabela 55	- Eficiências de remoção de SD para a terceira etapa.....	212
Tabela 56	- Eficiências máximas obtidas para os parâmetros estudados em comparação a outras pesquisas.....	216

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AR	Águas residuárias
ARD	Águas Residuárias Domésticas
ARI	Águas Residuárias Industriais
ARU	Águas Residuárias Urbanas
COT	Carbono Orgânico Total
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
OD	Oxigênio Dissolvido
N	Elemento Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
P	Elemento Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Fósforo Total
SD	Sólidos Dissolvidos
SDF	Sólidos Dissolvidos Fixos
SDV	Sólidos Dissolvidos Voláteis
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
T	Temperatura
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
Unesp	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
NTU	<i>(Nephelometric Turbidity Unit)</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
E	Eficiência (%)
C _i	Concentração inicial do parâmetro estudado
C _f	Concentração final do parâmetro estudado
Result mist	Resultado calculado para a mistura do parâmetro em questão
Vol da cx	Volume da caixa no momento da reposição do efluente
Result da cx	Valor do parâmetro analisado anterior a reposição do efluente
Vol do ef	Quantidade necessária de efluente de reposição
Result do ef	Valor do parâmetro analisado no efluente de reposição
Vol total	Volume total da unidade experimental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	30
2	OBJETIVOS.....	33
2.1	OBJETIVO GERAL.....	33
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	34
3.1	PANORAMA GERAL DA ÁGUA.....	34
3.2	ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	36
3.3	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	40
3.3.1	Tratamento de águas residuárias por lagoas de estabilização.....	42
3.4	MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	44
3.4.1	Família <i>Lemnaceae</i>.....	48
3.5	<i>WOLFFIA</i>	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.1	PRIMEIRA ETAPA.....	63
4.1.1	Primeiro ciclo.....	64
4.1.2	Segundo ciclo.....	66
4.1.3	Terceiro ciclo.....	67
4.1.4	Quarto ciclo.....	68
4.1.5	Resumo do experimento inicial.....	69
4.2	SEGUNDA ETAPA.....	69
4.2.1	Caracterização da biomassa.....	75
4.3	TERCEIRA ETAPA.....	76
4.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS E ESTATÍSTICAS.....	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81

5.1	IDENTIFICAÇÃO DA ESPÉCIE DE WOLFFIA.....	81
5.2	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS INICIAIS.....	82
5.2.1	Resultados do primeiro ciclo dos experimentos iniciais.....	82
5.2.2	Resultados do segundo ciclo dos experimentos iniciais.....	84
5.2.3	Resultados do terceiro ciclo dos experimentos iniciais.....	85
5.2.3.1	<i>Adensamento da Wolffia brasiliensis.....</i>	85
5.2.3.2	<i>Resultado da remoção DQO para o terceiro ciclo experimento inicial....</i>	86
5.2.3.3	<i>Resultado da remoção DBO para o terceiro ciclo experimento inicial....</i>	88
5.2.3.4	<i>Resultado da turbidez para o terceiro ciclo experimento inicial.....</i>	90
5.2.4	Resultados para o quarto ciclo dos experimentos iniciais.....	92
5.2.4.1	<i>Adensamento da Wolffia brasiliensis.....</i>	92
5.2.4.2	<i>Resultado da remoção da DQO para o quarto ciclo experimento inicial.</i>	93
5.2.4.3	<i>Resultado da remoção da DBO para o quarto ciclo experimento inicial.</i>	95
5.2.4.4	<i>Resultado da turbidez para o quarto ciclo experimento inicial.....</i>	97
5.3	RESULTADOS DA SEGUNTA ETAPA.....	99
5.3.1	Temperatura ambiente.....	100
5.3.2	PH.....	101
5.3.3	Oxigênio Dissolvido.....	105
5.3.4	DQO.....	108
5.3.4.1	<i>Resultado da DQO para o primeiro ciclo.....</i>	108
5.3.4.2	<i>Resultado da DQO para o segundo ciclo.....</i>	117
5.3.5	DBO.....	126
5.3.6	Turbidez.....	130
5.3.7	Nitrogênio Total.....	136
5.3.8	Fósforo Total.....	141
5.3.9	Sólidos Totais.....	145
5.3.10	Sólidos Suspensos Totais.....	150
5.3.11	Sólidos Dissolvidos.....	154
5.3.12	Caracterização da biomassa.....	159
5.4	RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA.....	161
5.4.1	Temperatura ambiente.....	163
5.4.2	Potencial hidrogeniônico (pH).....	164

5.4.3	Oxigênio Dissolvido (OD).....	167
5.4.4	Turbidez.....	170
5.4.5	Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	176
5.4.6	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	184
5.4.7	Nitrogênio Total (NT).....	190
5.4.8	Fósforo Total (PT).....	196
5.4.9	Sólidos Totais (ST), Suspensos Totais (SST) e Dissolvidos (SD).....	202
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	212
6	CONCLUSÃO.....	217
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	218
	REFERÊNCIAS.....	219

1 INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento demográfico aumenta bruscamente a demanda por água potável, o processo de poluição e interfere diretamente na degradação dos ecossistemas aquáticos. A limitação deste recurso faz com que a população busque métodos mais conscientes de utilização (FAO, 2022).

Os principais desequilíbrios ambientais estão diretamente ligados a atividades inadequadas dos humanos. Um dos principais fatores citados como uma solução viável é o tratamento e o despejo adequado das águas residuárias (Almeida *et al.*, 2019).

As águas residuárias urbanas são águas que tiveram alguma finalidade e apresentam suas características naturais alteradas (Lucena *et al.*, 2018), consistem em uma mistura de substâncias compostas por diversos microrganismos de diferentes tipos, podendo estes ser de origem fecal e/ou patogénica (Monte; Albuquerque, 2010). Os sistemas convencionais de tratamento de efluentes, utilizados na maioria dos casos, não são capazes de remover todos os micro poluentes presentes, levando a contaminação de corpos hídricos receptores (Ikehata *et al.*, 2006).

A falta de recursos financeiros para a implementação de infraestrutura sanitária urbana adequada ampliam os impactos causados pelo despejo de esgoto em corpos hídricos (Scriptore; Toneto Júnior, 2012). De acordo com Jones *et al.* (2021), apenas 63% das águas residuárias produzidas globalmente são coletadas e 52% tratadas.

Diante disso, novas formas de tratamentos, principalmente aquelas que apresentam baixo custo de instalação e elevada eficiência, têm sido mencionadas. A fitorremediação tem sido muito utilizada e consiste na remoção de elementos poluentes através das macrófitas aquáticas (Uysal, 2013), além disso, é descrito como um método eficiente para o tratamento de diferentes categorias de efluentes (Ekperusi *et al.*, 2019).

As macrófitas são plantas com grande potencial de adaptação ecológica, uma vez que podem ser encontradas em ambientes de águas salgadas, doces ou salobras (Silva, 2011). Desta forma, possuem a capacidade de permanecer em ambientes aquáticos com elevada disponibilidade de nutrientes, como as águas residuárias, temperatura e intensidade da luz (Lacoul; Freedman, 2006). Além disso,

em altas densidades, podem atuar como tratamento de esgoto, melhorando consideravelmente a qualidade da água (Silva, 2011).

Inúmeras funções são atribuídas às macrófitas aquáticas, entre elas a ciclagem de nutrientes, uma vez que os absorvem das áreas profundas e os tornam disponíveis a outras comunidades. Ademais, removem nutrientes de zonas que apresentam eutrofização e atuam como uma barreira de proteção contra a erosão nas margens dos corpos d'água (CEMIG, 2021).

Dentre as diversas espécies de macrófitas aquáticas flutuantes, destacam-se as menores angiospermas conhecidas no mundo, as plantas pertencentes à subfamília *Lemnoideae* (antiga família *Lemnaceae*) (Buss *et al.*, 2015), a qual compreende 5 gêneros (*Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia*, *Landoltia* e *Wolffiella*) e 37 espécies de plantas aquáticas monocotiledôneas (Pott; Pott, 2000; Buss *et al.*, 2015).

A *Lemnoideae* vem sendo bastante utilizada como forma de polimento de efluentes, uma vez que se apresenta como opção viável, eficiente e econômica, na remoção de nutrientes, tendo em vista que possuem elevada capacidade de assimilação destes. Com isso, promovem condições favoráveis aos processos de decomposição da matéria orgânica (Mohedano, 2010).

Segundo Cheng *et al.* (2002), a fácil adaptação a diferentes meios aquáticos e a elevada eficiência consistem nas principais vantagens do polimento com macrófitas, entretanto, possuem outros atributos que levam a sua utilização na depuração de efluentes orgânicos, como a grande capacidade de remoção de sólidos suspensos e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o alto requerimento por nutrientes como fósforo e nitrogênio, o acelerado desenvolvimento entre os vegetais vasculares impedindo a proliferação de algas e de insetos, tendo em vista que inibem a penetração de luz solar. Além disso, apresentam biomassa de elevada qualidade (Suppadit *et al.*, 2008).

As macrófitas do gênero *Wolffia*, conhecidas como as menores macrófitas da família *Lemnoideae*, possuem o menor tamanho de fronde, flutuam livremente na superfície da água, podem ser globosas, ovóides a subcirculares, cilíndricas, cônicas em forma de barco ou noz, com 1 ou 2 frondes unidas, não possuem raiz e sua distribuição ocorre em regiões tropical-subtropical e quente-temperada das Américas (Buss *et al.*, 2015), possuem rápida reprodução e crescimento (Suppadit *et al.*, 2008).

De acordo com Faskin (1999), a *Wolffia* pode apresentar, para cada 100g de biomassa, de 6,80 a 45,0g de proteína. Segundo Landolt; Kandeler (1987), a biomassa seca destas plantas pode apresentar teor de lipídio de 1,8% a 9,2%, fibra bruta de 5,7% a 16,2% e proteína bruta de 6,8% a 45%. Diante disto, é notável a viabilidade da utilização da biomassa para diversas funcionalidades, como alimentação animal.

Desta forma, diversos trabalhos mencionam as possíveis vantagens da utilização da *Wolffia* como forma de polimento de esgotos, entretanto, os estudos sobre o tratamento de águas residuárias com esta planta ainda são escassos. Não se sabe o nível exato ideal de fertilização do ambiente que propicie o crescimento vegetal com produção de biomassa vegetal de qualidade em teor de: carboidratos; proteínas, fibras e lipídios (Landolt; Kandeler, 1987).

Neste contexto, o trabalho em questão tem o intuito de realizar um processo de polimento do esgoto sanitário, tratado anteriormente na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Ilha Solteira – SP por meio de lagoas facultativas primárias, com a macrófita do gênero *Wolffia*. Foram analisadas as condições ideais para o desenvolvimento da planta, verificando a influência da luminosidade, temperatura e adensamento no sistema, além de verificar a eficiência na remoção de: DQO, DBO, NT, PT, turbidez, ST, SST e SD.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho consistiu em avaliar, em escala laboratorial, as características favoráveis do efluente e do ambiente para o cultivo da *Wolffia brasiliensis* em esgoto sanitário tratado previamente em lagoas facultativas primárias e avaliar sua eficiência como sistema de polimento deste efluente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficiência da *Wolffia brasiliensis* na remoção da DBO, DQO, turbidez, NT, PT, ST, SST e SD do efluente proveniente do tratamento em lagoa facultativa como forma de polimento;
- Mensurar as características do efluente e do ambiente que propiciem o melhor desenvolvimento da *Wolffia brasiliensis*;
- Realizar a caracterização química da biomassa produzida.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 PANORAMA GERAL DA ÁGUA

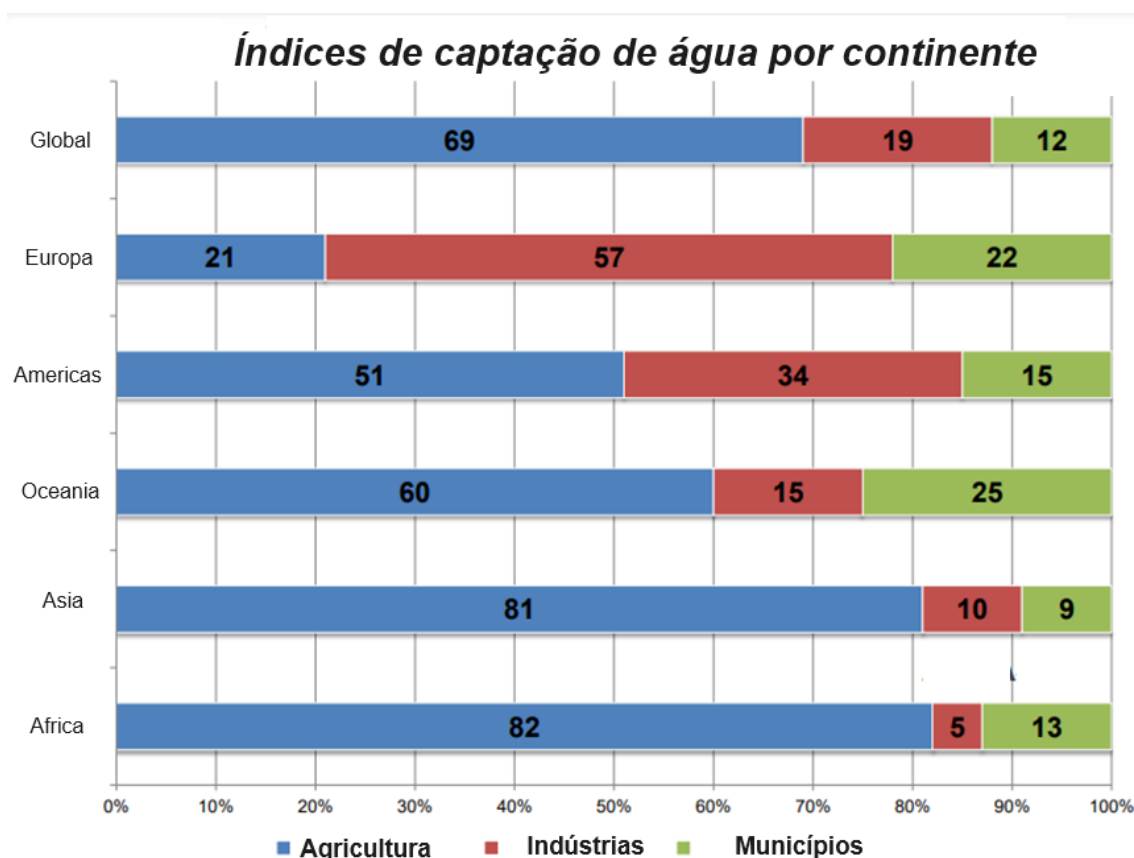
De acordo com Casarin; Santos (2011), a água é um elemento fundamental à vida e corresponde a 70% do corpo humano. Desde as sociedades antigas esse recurso é visto como a semente da vida e um elemento de grande força (Casarin; Santos, 2011).

Apesar de 70% da superfície terrestre ser coberta por água, apenas 2,5% é doce e grande parte ainda encontra-se na forma de geleiras, águas subterrâneas e outros reservatórios (Casarin; Santos, 2011). Com isto, percebe-se que uma parcela bem pequena de água está disponível para a utilização humana.

Além disso, a agricultura e a agropecuária, atividades essenciais à vida humana, utilizam esse recurso em grande escala, tornando-o ainda mais escasso (Casarin; Santos, 2011).

A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO) possui um sistema global de coleta e análise de dados sobre a água (AQUASTAT) no qual se distinguem três tipos de captação de água: agrícola (incluindo irrigação, pecuária e aquacultura), municipal (incluindo doméstica) e industrial. Os índices de captação de água por continente são retratados na Figura 1.

Figura 1 - Índices de captação de água por continente.



Fonte: Adaptado de FAO, (2015).

Países como a Índia, Ásia Central e a China, possuem baixa precipitação, desse modo, utilizam cerca de 90% toda a sua disponibilidade hídrica regional para fins agrícolas (FAO, 2018).

Ademais, o aumento gradativo da população, a expansão das atividades de extração, o desmatamento e a poluição também acabam causando prejuízos aos corpos de água doce existentes. O acúmulo de lixo e o descarte inadequado do esgoto vêm resultando em desequilíbrios severos, uma vez que tornam os corpos hídricos inutilizáveis para abastecimento de água. Muitas fontes de água são poluídas por esgotos de casas, fábricas e pelo escoamento de agrotóxicos (Casarin; Santos, 2011). Dessa forma, a preocupação maior com os processos ambientais é causada pelo acelerado crescimento populacional, deterioração dos ecossistemas, escassez dos recursos naturais, contaminações advindas principalmente dos setores industriais e degradação da própria qualidade de vida (Almeida *et al.*, 2019).

De acordo com Almeida *et al.* (2019), é importante reconhecer os desequilíbrios ambientais que estão diretamente ligados a atividades inadequadas dos humanos. Existem dois fatores principais que devem ser pautados de forma

conjunta para uma possível solução adequada da má utilização da água: o destino do esgoto e o desperdício de água e de alimentos (Almeida *et al.*, 2019)

Um estudo desenvolvido por Jones *et al.* (2021) estima que a produção anual de águas residuárias é de 359,4 bilhões de m³, sendo coletado 225,6 bilhões de m³ e tratado 188,1 bilhões de m³ por ano, ou seja, apenas 63% das águas residuárias produzidas globalmente são coletadas e 52% tratadas.

Além disso, a reutilização de águas residuárias estimada é de 40,7 bilhões de m³, sendo apenas 11% do total de águas residuárias produzidas (Jones *et al.*, 2021).

Torna-se fundamental gerenciar os recursos hídricos disponíveis para evitar maiores danos ambientais (Lucena *et al.*, 2018), priorizando formas sustentáveis para o tratamento e a reutilização das águas residuárias.

3.2 ÁGUAS RESIDUARIÁS

As águas residuárias são águas que passaram por alguma forma de utilização, diante disso, possuem suas características naturais alteradas e características específicas para cada forma de utilização (Von Sperling, 2005).

De acordo com Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 1997) no Decreto-Lei n.º 152/97, as Águas Residuárias (AR) podem ser definidas como:

Águas Residuárias Domésticas (ARD) – as águas residuais de serviços e de instalações residenciais, essencialmente provenientes do metabolismo humano e de atividades domésticas;
 Águas Residuárias Industriais (ARI) – as águas residuais provenientes de qualquer atividade que não possam ser classificadas como águas residuais domésticas nem sejam águas pluviais; e
 Águas Residuárias Urbanas (ARU) – as águas residuais domésticas ou a mistura destas águas residuais industriais e ou com águas pluviais.

As águas residuárias urbanas podem conter substâncias suspensas ou dissolvidas, orgânicas e inorgânicas, ou seja, estas águas consistem, assim, em uma mistura de substâncias, compostas por diversos microrganismos de diferentes tipos, podendo estes ser de origem fecal e/ou patogênica (Monte; Albuquerque, 2010).

As principais composições de águas residuárias não tratadas de dois países distintos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1- Composição típica de águas residuárias urbanas não tratadas em Portugal e nos Estados Unidos (EUA).

Poluente	Unidades	EUA		Portugal	
		Intervalo de variação	Valor Típico	Intervalo de variação	Valor Típico
Sólidos Totais (ST)	mg/L	390-1230	720	60-980	715
Sólidos Dissolvidos (SD)	mg/L	270-860	500	210-720	550
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF)	mg/L	160-520	300	-	-
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV)	mg/L	110-340	200	-	-
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	120-400	210	90-430	190
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	mg/L	25-85	50	9-24	16
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	mg/L	95-315	160	34-109	72
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	5-20	10	-	-
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO _{5,20})	mg/L O ₂	110-350	190	444-1338	290
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L O ₂	250-800	430	746-1946	608
Carbono Orgânico Total (COT)	mg/L	80-260	140	-	-
Nitrogênio Total (NT)	mg/L N	20-70	40	53-88	60
Nitrogênio Orgânico (N-org)	mg/L N	8-25	15	11,8-16,0	14
Nitrogênio Amoniacal (N-NH ₄)	mg/L NH ₄	12-45	25	32-81	38
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L NO ₂	0-vestígios	0	vestígios-1,31	0,19
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L NO ₃	0-vestígios	0	vestígios-3,3	0,5
Fósforo Total (PT)	mg/L P	4-12	7	3,5-13	8,5
Fósforo Orgânico (P-org)	mg/L P	1-4	2	-	-
Fósforo Inorgânico (P-ort)	mg/L P	3-10	5	-	9
Cloretos	mg/L	30-90	50	120-136	128
Sulfatos	mg/L	20-50	30	42-75	47
Óleos e gordura	mg/L	50-100	90	39-475	115

Fonte: Adaptado de Monte; Albuquerque (2010).

A composição da água residuária urbana depende principalmente de sua origem podendo ser doméstica, comercial ou industrial, sendo influenciada também pela comunidade, ou seja, clima e tipo do sistema de drenagem (unitário ou separativo) (Monte *et al.*, 2016).

As águas residuárias domésticas, provindas principalmente de residências ou quaisquer outras edificações que possuam cozinhas, lavanderia ou banheiro, são compostas por urina, fezes, papel, restos de comida, produtos de limpeza e água de banho (Jordão; Pessôa, 2006), ou seja, o esgoto bruto é constituído 99,9% de água

e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos e microrganismos remanescentes (Von Sperling, 2005).

As principais características das águas residuárias domésticas são mostradas na Tabela 2 e Quadros 1 e 2.

Tabela 2 - Características típicas das águas residuárias domésticas.

Parâmetros		Esgoto forte	Esgoto médio	Esgoto fraco
Químicos	DQO (mg/L)	800	400	200
	DBO _{5,20} (mg/L)	400	200	100
	OD (mg/L)	0	0	0
	Nitrogênio Total (mg/L)	85	40	20
	Nitrogênio Orgânico (mg/L)	35	20	10
	Amônia livre (mg/L)	50	20	10
	Nitritos (mg/L)	0,1	0,05	0
	Nitratos (mg/L)	0,4	0,2	0,1
	Fósforo Total (mg/L)	20	10	5
	Fósforo orgânico (mg/L)	7	4	2
	Fósforo Inorgânico (mg/L)	13	6	3
Físicos	ST (mg/L)	1160	730	370
	SST (mg/L)	360	230	120
Biológicos	Coliformes Totais (NMP/100mL)	10 ⁶ a 10 ⁹		
	<i>E. coli</i> (EC/g.fezes)	10 ⁹		
	Helmintos (ovos/100mL)	10 ³		
	Protozoários (cistos/100mL)	10 ³		
DQO: demanda química de oxigênio; DBO _{5,20} : demanda bioquímica de oxigênio no 5° dia à 20°C;		ST: sólidos totais; SST: sólidos suspensos totais; <i>E. coli</i> : <i>Escherichia coli</i> .		

Fonte: Adaptado de Jordão; Pessoa (2011).

Quadro 1- Principais características químicas dos esgotos domésticos.

Parâmetros	Descrição
Sólidos Totais	Orgânicos e inorgânicos; suspensos e dissolvidos; sedimentáveis.
Suspensos	Fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que são retidos em filtros de papel com aberturas de dimensões padronizadas (0,45 a 2 μm).
Fixos	Componentes minerais não incineráveis, inertes, dos sólidos em suspensão e dissolvidos.
Voláteis	Componentes orgânicos dos sólidos em suspensão e dissolvidos.
Dissolvidos	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que não são retidos nos filtros de papel descritos acima.
Matéria orgânica	Mistura heterogênea de diversos compostos orgânicos. Principais componentes: proteína, carboidratos e lipídios.
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio medida no 5º dia a 20°C. É uma medida de oxigênio consumida após 5 dias pelos microrganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica.
DQO	Demanda Química de Oxigênio. Representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea.
DBO última	Demanda Última de Oxigênio. Representa o consumo total de oxigênio, ao final de vários dias, requerida pelos microrganismos para a oxidação bioquímica da matéria orgânica.
Nitrogênio Total	O Nitrogênio Total inclui o Nitrogênio Orgânico, Amônia, Nitrito e Nitrato. É um nutriente indispensável para o desenvolvimento dos microrganismos no tratamento biológico. O Nitrogênio Orgânico e a Amônia compreendem o denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK).
Nitrogênio Orgânico	Nitrogênio na forma de proteínas, aminoácidos e ureia.
Amônia	Produzida como primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico.
Nitrito	Estágio intermediário da oxidação da amônia. Praticamente ausente no esgoto bruto.
Nitrato	Produto da oxidação da amônia. Praticamente ausente no esgoto bruto.
Fósforo Total	O Fósforo Total existe na forma orgânica e inorgânica. É um nutriente indispensável no tratamento biológico.
Fósforo Orgânico	Combinado a matéria orgânica.
Fósforo Inorgânico	Ortofosfato e polifosfatos.
pH	Indicador das características ácidas ou básicas do esgoto. Os processos de oxidação biológica tendem a reduzir o pH.
Alcalinidade	Indicador da capacidade tampão do meio (resistências a variações do pH). Devido a presença de bicarbonato, carbonato e íon hidroxila.

Fonte: Adaptado de Arceivala (1981), Qasim (1985), Metcalf & Eddy (1991).

Quadro 2 - Principais características físicas dos esgotos domésticos.

Parâmetro	Descrição
Temperatura	-Ligeiramente superior à da água de abastecimento -Variação conforme as estações -Influência na atividade microbiana -Influência na solubilidade dos gases -Influência na viscosidade do líquido
Cor	-Esgoto fresco: ligeiramente cinza -Esgoto séptico: cinza escuro ao preto
Odor	-Esgoto fresco: odor oleoso, relativamente desagradável -Esgoto séptico: odor fétido, devido ao H₂S e outros -Despejo industriais: odores característicos
Turbidez	-Causada por uma grande variedade de SST -Esgoto mais frescos ou mais concentrados

Fonte: Adaptado de Qasim (1985).

As águas residuárias continuam sendo um recurso “subvalorizado” e “inexplorado”, mesmo se mostrando como uma fonte econômica e confiável de água doce, principalmente para usos agrícolas (WWAP, 2017).

O reuso dessas águas pode trazer diversos benefícios econômicos, sociais e ambientais, além de ser uma opção para o problema de escassez de água (Lucena *et al.*, 2018).

Entretanto, para que a água possa ser reutilizada, existem critérios recomendados e padrões que tenham sido estabelecidos para um determinado uso, sendo assim é necessário estudar as características físicas, químicas e biológicas das águas residuárias. As distintas formas potenciais para o reuso dependem também das características, além das condições locais (Amaral, 2019).

3.3 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Os tratamentos de água resíduárias consistem em um conjunto de medidas necessárias para enquadrar as águas de reuso nos padrões estabelecidos para sua utilização (Souza, 2007).

Existem legislações específicas para os padrões de qualidade de lançamento de efluente em corpos receptores, os quais são definidos por cada país, baseando-

se em suas características (Von Sperling, 2005). No Brasil, a Resolução CONAMA 357/2005 é responsável pela qualidade dos corpos receptores e pelo lançamento de efluentes nos corpos d'água.

Existem indícios de que a água de esgoto já era reutilizada na irrigação na Grécia Antiga, entretanto, o aumento da demanda por água tem feito do reuso planejado da água um tema ainda atual e de grande importância (Lucena *et al.*, 2018).

Apesar de, muitas vezes, as águas de reuso serem impróprias para o consumo potável direto, com o tratamento adequado para cada forma de utilização da água, é possível reduzir a quantidade de poluentes nos corpos receptores (Lucena *et al.*, 2018). Isto conserva os recursos hídricos para usos mais exigentes quanto à qualidade, além de reduzir os custos associados à poluição e promover a preservação do meio ambiente (Lucena *et al.*, 2018).

Os sistemas de tratamento, geralmente, apresentam a separação de matéria orgânica ou outros materiais sólidos do meio líquido e a remoção de agentes patogênicos. Em alguns casos, utiliza-se também uma combinação de tratamentos físicos, químicos e biológicos (Lucena *et al.*, 2018).

Atualmente, existem inúmeras formas, níveis e qualidades de tratamento, determinados pela utilização prevista para este efluente tratado (Lucena *et al.*, 2018). Desta forma, é essencial que ao final do processo de tratamento, a qualidade da água atinja o nível adequado para sua utilização.

O tratamento de esgotos é classificado através de níveis, sendo eles: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário. As duas primeiras fases, tratamento preliminar e primário, possuem mecanismos físicos de remoção de poluentes, sendo responsáveis, respectivamente, pela remoção de sólidos grosseiros e pela remoção de sólidos sedimentáveis, juntamente com parte da matéria orgânica. O tratamento secundário visa remover a matéria orgânica, medida em termos da DBO e os nutrientes (nitrogênio e fósforo), predominando os mecanismos biológicos de remoção. O tratamento terciário, geralmente, tem como objetivo a remoção de poluentes específicos ou poluentes que não foram removidos no tratamento secundário (Von Sperling, 2005).

Apesar do exposto, devido à industrialização e ao crescimento acelerado da população, a poluição das águas residuárias segue sendo um desafio significativo para a sociedade, desse modo, novos métodos inovadores de tratamento e gestão

das águas residuárias são necessários para que seja possível reduzir os riscos à saúde da população e proteger o meio ambiente (Lu *et al.*, 2021).

3.3.1. Tratamentos de águas residuárias por lagoas de estabilização

Os sistemas de tratamento de efluentes por lagoas de estabilização consistem em umas das formas mais simples de tratamento (Von Sperling, 2002). No Brasil, segundo o Relatório de Esgotamento Sanitário Municipal elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA) (Brasil, 2020) no ano de 2020, existem mais de 3.600 ETEs, sendo 32% sistemas de tratamento que utilizam lagoas de estabilização.

Os sistemas de tratamento biológicos com lagoas de estabilização em série, são amplamente utilizados em locais com disponibilidade territorial, geralmente o arranjo construtivo é composto por lagoas: anaeróbia; facultativa; aerada; decantação e maturação (Uysal, 2013).

Existem diferentes sistemas formados por lagoas de estabilização, apresentando distintos níveis de operação e requisitos de área (Von Sperling, 2002). Os principais sistemas de lagoas de estabilização para remoção de DBO estão retratados na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma dos principais sistemas de lagoas de estabilização.



Fonte: Von Sperling (2002).

As lagoas de estabilização podem ser primárias, recebendo o efluente bruto, secundárias, caso recebam efluente de uma lagoa a montante ou terciárias, caso apresentem-se a jusante de uma série de lagoas (Von Sperling, 2002).

As lagoas anaeróbias possuem o processo de estabilização da matéria orgânica sem a presença do oxigênio dissolvido, diante disso, apresentam os fenômenos de digestão ácida e fermentação metânica (Jordão; Pessôa, 2006).

As lagoas de maturação são, geralmente, utilizadas ao fim de um sistema de lagoas de estabilização visando melhorar a qualidade do efluente tratado, reduzindo os organismos patogênicos e os coliformes fecais (Jordão; Pessôa, 2006).

Ainda de acordo com Jordão; Pessôa (2006), as lagoas estritamente aeróbias possuem um equilíbrio da fotossíntese e da oxidação afim de garantir condições aeróbias em toda a lagoa.

As lagoas facultativas são caracterizadas por possuírem três zonas de tratamento: uma aeróbia, onde ocorre o processo de estabilização da matéria orgânica por oxidação aeróbia e redução fotossintética, uma anaeróbia, localizada

na parte mais funda da lagoa, onde ocorrem os processos de fermentação anaeróbia e uma intermediária entre estas, chamada de zona facultativa, onde ocorrem os processos de oxigenação aeróbia e fotossintética (Jordão; Pessôa, 2006).

Além disso, as lagoas facultativas, uma das mais utilizadas, consistem na variante mais simples, seu processo baseia-se na retenção dos esgotos por tempo suficiente para que os processos naturais de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam. Esse tratamento apresenta satisfatória remoção de DBO, cerca de 75% a 85%, entretanto, razoável eficiência na remoção de patógenos, menos que 60% de nitrogênio e menos que 35% de fósforo (Von Sperling, 2002).

A fim de amenizar algumas desvantagens do sistema de tratamento com lagoas de estabilização, como a necessidade de áreas extensas, pode-se utilizar a recirculação de efluentes dentro das lagoas. Esse processo atua diretamente na oxigenação na parte interna da lagoa, além de aumentar sua eficiência com a quebra da estratificação térmica (Shelef; Kanarek, 1995).

Ademais, existem as lagoas de estabilização com macrófitas, geralmente utilizadas como polimento final de um tratamento por lagoas, tem como objetivo a redução dos nutrientes, sólidos em suspensão e a DBO remanescente do tratamento anterior, além da possível remoção de metais (Jordão; Pessôa, 2006). Ou seja, em efluentes com elevada concentração de nutrientes é viável que sejam empregadas algumas adaptações de polimento e como alternativa para estes sistemas de tratamento em nível terciário podem ser utilizadas lagoas com macrófitas flutuantes (Uysal, 2013).

A técnica que consiste na descontaminação de áreas poluídas a partir de plantas é chamada de fitorremediação (Madalão *et al.*, 2013).

3.4 MACRÓFITAS AQUÁTICAS

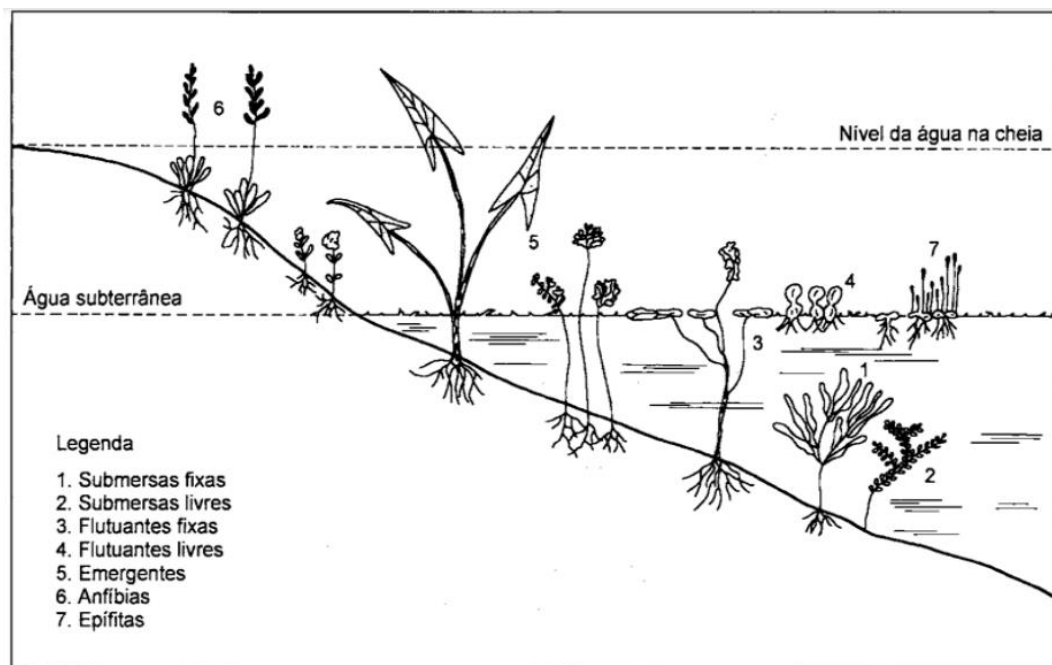
As macrófitas aquáticas são consideradas formas macroscópicas de vegetação aquática (Neckles *et al.*, 1993).

As partes fotossinteticamente ativas das macrófitas aquáticas ficam submersas em água ou flutuantes em sua superfície por alguns meses do ano ou permanentemente (Baker; Cook, 1974).

De acordo com Trindade *et al.* (2010) a classificação comumente aceita no Brasil consiste em:

- Macrófitas aquáticas submersas enraizadas ou fixas (Figura 3, nº1): são enraizadas e crescem totalmente submersas na água, normalmente emitem as estruturas reprodutivas acima do nível de água. Ex: *Potamogeton pectinatus* (potamogeto), *Cabomba australis* (cabomba).
- Macrófitas aquáticas submersas livres (Figura 3, nº2): permanecem flutuando submersas na água. Geralmente prendem-se a pecíolos e caules de outras macrófitas. Ex: *Utricularia gibba* (violeta-do-brejo, boca-de-leão do banhado).
- Macrófitas aquáticas com folhas flutuantes ou flutuantes fixas (Figura 3, nº3): são enraizadas e com folhas flutuando na superfície da água. Ex: *Nymphoides indica* (estrela-branca, soldanela-d'água).
- Macrófitas aquáticas flutuantes livres (Figura 3, nº4): permanecem flutuando com as raízes abaixo do nível da superfície da água. Ex: *Pistia stratiotes* (repolho-d'água), *Eichhornia crassipes* (aguapé).
- Macrófitas aquáticas emergentes ou emersas (Figura 3, nº5): enraizadas, porém com folhas podendo alcançar grande altura acima do nível d'água. Ex: *Typha domingensis* (taboa, paina).
- Anfíbias (Figura 3, nº6): encontradas na interface água-terra, tolerantes à seca. Ex: *Salix humboldtiana* (salgueiro).
- Epífitas (Figura 3, nº7): espécies se estabelecem e se desenvolvem sobre indivíduos de espécies flutuantes livres ou fixas. Ex: *Oxycaryum cubense*.

Figura 3 - Formas biológicas de macrófitas aquáticas.



Fonte: Pedralli (1990).

Ainda segundo Trindade *et al.* (2010), as macrófitas apresentam grande amplitude ecológica e se adapta facilmente ao ambiente, resultando em uma mesma espécie colonizando diferentes tipos de ambientes, facilitando a sua distribuição

geográfica. Essa globalidade pode ser explicada através da homogeneidade térmica que os ambientes aquáticos apresentam quando comparados aos ambientes terrestres (Mitchell, 1974).

Os biossistemas aquáticos continentais brasileiros, destacando-se as extensas regiões litorâneas, são favoráveis à ocorrência das macrófitas aquáticas, as quais desempenham importantes funções nesses locais (Trindade *et al.*, 2010).

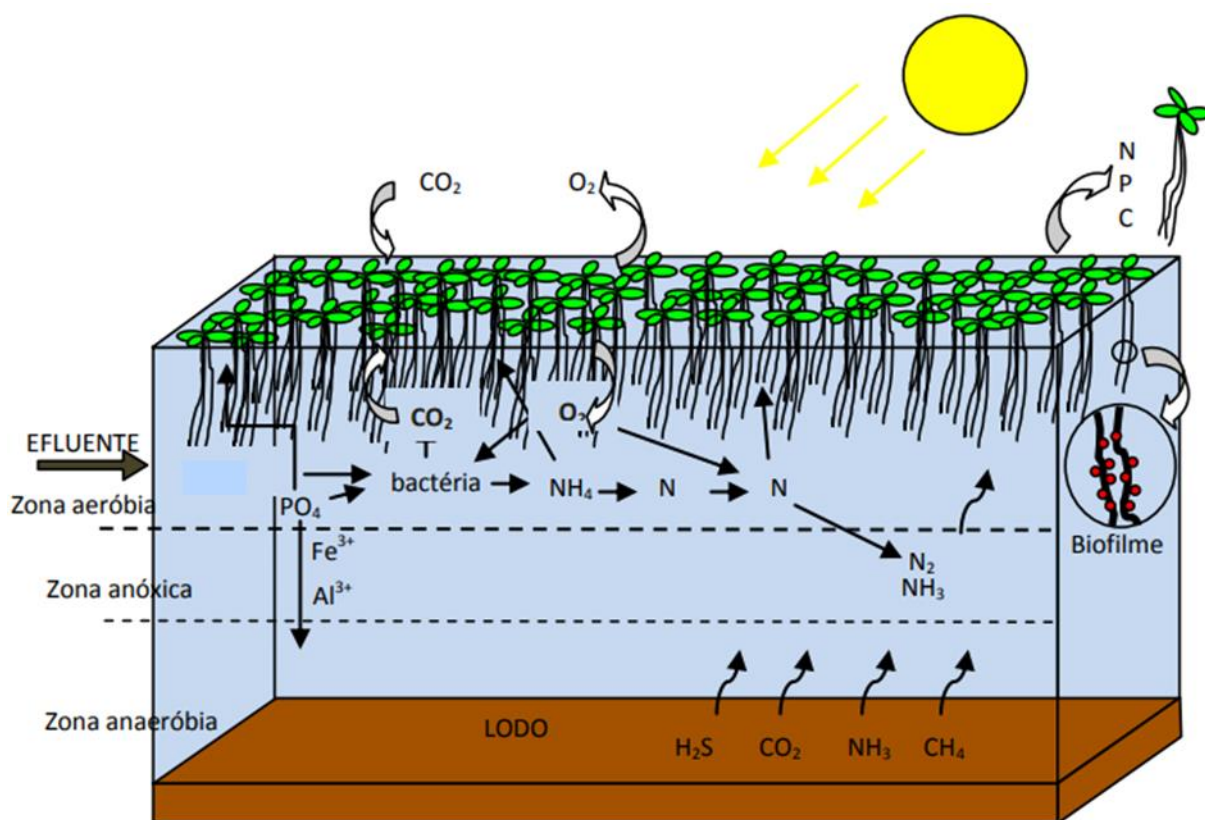
O crescimento e a produção da biomassa das macrófitas é influenciado, diretamente, por excesso de nutrientes provindos de fontes como erosão de terras agrícolas, resíduos industriais e esgoto doméstico (Mitchell, 1974). Diante disso, as macrófitas são consideradas “pragas” em ecossistemas aquáticos de diversas partes do planeta (Trindade *et al.*, 2010).

Nos últimos anos o interesse na utilização das plantas aquáticas como sistema de tratamento de esgotos aumentou, devido a sua capacidade de remover poluentes e absorver o excesso de nutrientes que poluem a água (Mitchell, 1974). Isso acontece porque as macrófitas costumam armazenar os nutrientes (Pagioro; Thomaz, 1999).

Utilizando as macrófitas para remoção de DQO obtém-se que, em sistemas de escala laboratorial, é possível que se atinja uma remoção de DQO de 74 até 93% (Körner *et al.*, 1998), e em escala piloto, utilizando lagoas com macrófitas flutuantes, obtém-se uma remoção de DQO de 84% (Kc; Polprasert, 2013).

As macrófitas utilizam a absorção direta como processo principal na remoção dos nutrientes presentes nas águas residuárias, com destaque o nitrogênio e o fósforo (Valentim, 2003), como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Representação de processos que ocorrem durante o tratamento de efluentes, em lagoas com lemnáceas.



Fonte: Mohedano (2010).

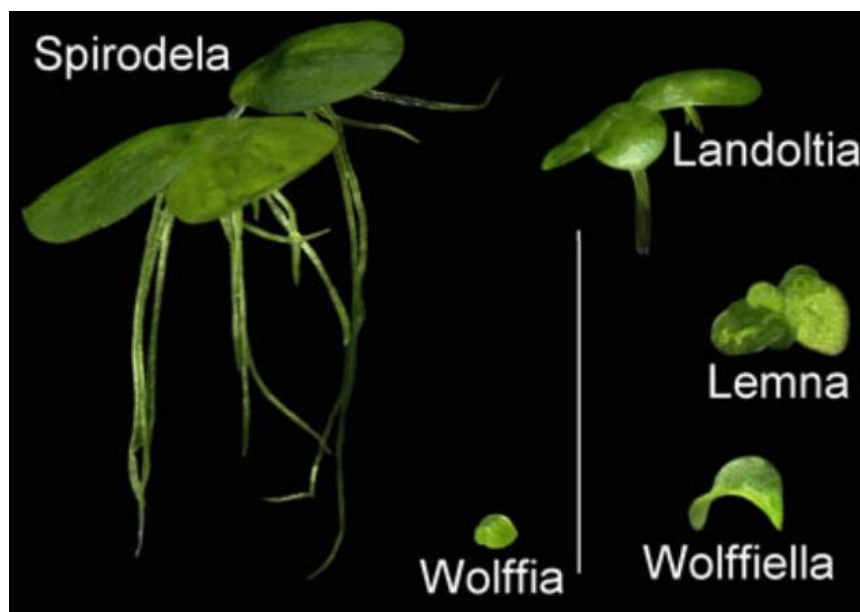
O tempo de detenção hidráulica (TDH) está associado com a remoção dos nutrientes nas lagoas de cultivo de macrófitas flutuantes, Teles (2016) e Tonon (2016) utilizaram um período de 17 dias, Benjawan; Koottatep (2007) adotaram 16 dias e Xu *et al.* (2012) um TDH de 5 a 10 dias. Em todos os casos realizou-se o tratamento de esgoto doméstico. Ademais, liberam oxigênio na água possibilitam o tratamento do efluente (Valentim, 2003).

As macrófitas aquáticas consistem em uma das principais comunidades de ecossistemas límnicos, uma vez que contribuírem diretamente para a diversidade biológica e apresentam elevada biomassa, desempenhando um papel importante no fluxo de energia do ciclo de nutrientes (Esteves, 1998). São importantes também por serem capazes de estabelecer uma forte ligação entre o sistema aquático e o ambiente terrestre que o circunda (UNEP, 1990).

3.4.1. Família Lemnaceae

Entre as diferentes espécies de macrófitas aquáticas flutuantes, destacam-se as menores angiospermas de todo o mundo, as plantas da família *Lemnaceae* (Landolt, 1986), deste modo, são frequentemente confundidas com algas (Skillicorn *et al.*, 1993). Esta família possui cinco gêneros conhecidos: *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia*, *Landoltia* e *Wolffiella* (Pott; Pott, 2000), como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Morfologia das *Lemnáceas*.



Fonte: Fourounjian *et al.* (2020).

As plantas *Lemnáceas* crescem em superfícies de águas doces, geralmente ricas em nutrientes e são popularmente conhecidas no Brasil como “lentilha d’água” (Landolt, 1986).

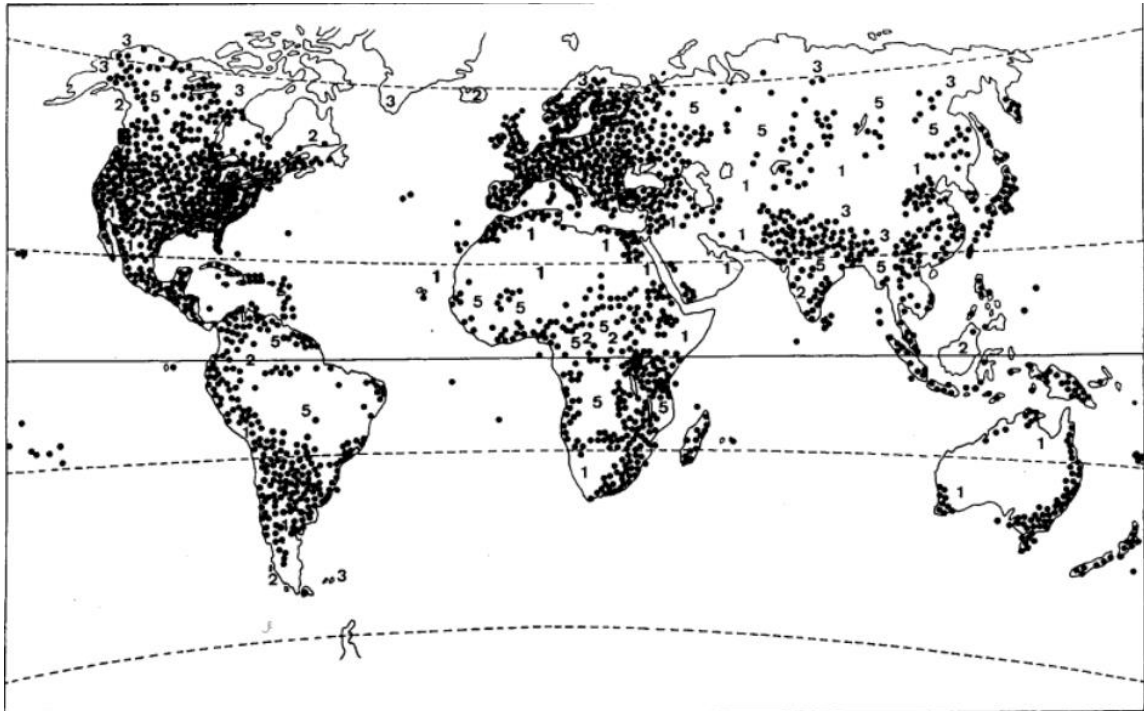
As macrófitas da família *Lemnaceae* possuem sistema vascular e são capazes de produzir flores e frutos, mesmo que com reprodução assexuada (Cross, 2006).

As *Lemnáceas* não possuem estruturas especializadas como folhas ou caules, elas são formadas apenas por uma fronde plana e ovoide (Skillicorn *et al.*, 1993), componente que consiste na fusão, em uma única estrutura, da folha e do caule (Mohedano, 2010).

Estas macrófitas encontram-se espalhadas por todo o mundo, com exceção apenas de regiões muito desérticas ou congeladas permanentemente (Mohedano,

2010), como mostra a Figura 6, disseminando-se em diferentes climas e tolerando temperaturas mais baixas, mesmo que se desenvolvam melhor em temperaturas maiores (Landolt, 1986).

Figura 6 - Distribuição geográfica da subfamília *Lemnoideae*.



Os números representam limitações no desenvolvimento das plantas devido: 1–Regiões desérticas; 2–Regiões de muita pluviosidade; 3–Regiões de frio intenso, 5–Regiões com poucas informações.

Fonte: Landolt (1986).

As macrófitas são, geralmente, exigentes em relação à presença de nutrientes na água e apresentam uma taxa de crescimento elevada se desenvolvida em suas condições, até mesmo quando comparada a vegetais maiores (Zanetoni Filho, 2019).

As *Lemnáceas* podem se reproduzir de 10 a 20 vezes durante um ciclo de vida (Baréa; Além Sobrinho, 2005). Durante o inverno, as taxas de crescimento são levemente diminuídas, mas continuam elevadas no verão, podendo atingir valores de até 0,30g/dia (Porath; Pollock, 1982).

Para a criação de *Lemnáceas* em uma superfície aquática é essencial que se mantenha uma densa cobertura de macrófitas, impedindo assim a entrada de luz e, conseqüentemente, o aparecimento de algas, o que evita a possível competição

entre as mesmas (Skillicorn *et al.*, 1993). A Figura 7 mostra uma lagoa com a superfície coberta por lemnáceas, como recomenda Skillicorn *et al.*, (1993).

Figura 7 – Lagoa coberta por lemnas.

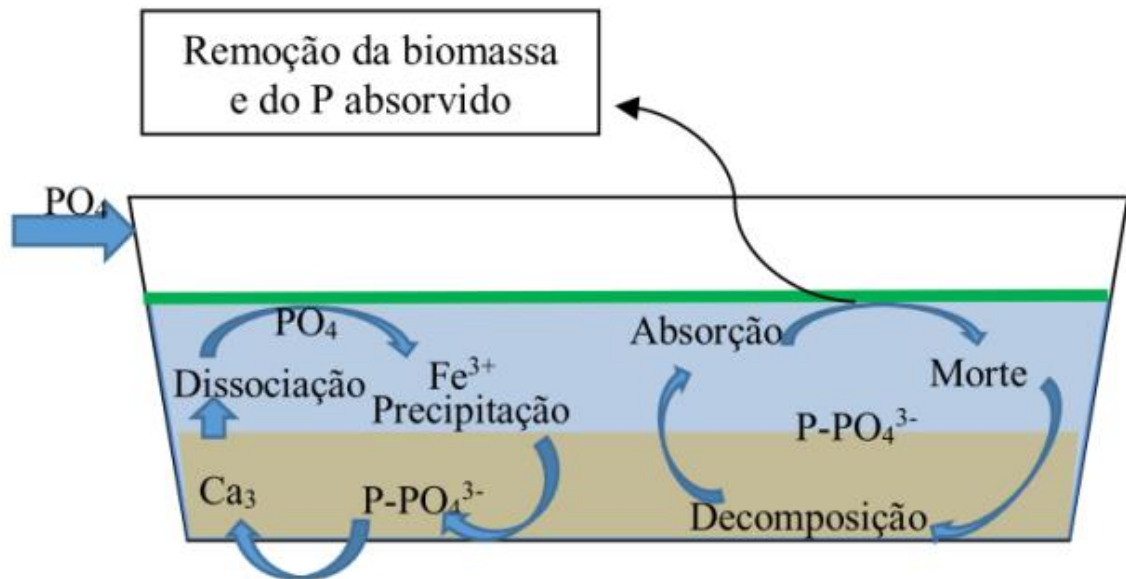


Fonte: Xu *et al.* (2012).

Uma das características principais das *Lemnáceas* é a resistência a elevadas cargas de matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e variações bruscas no pH (Mohedano, 2010).

As macrófitas da família *Lemnaceae* apresentam, em seu tecido vegetal, elevada quantidade de fósforo, o que auxilia diretamente na absorção do macronutriente pela planta (Farrell, 2012). A maior parte do fósforo é removido por meio do remanejamento das macrófitas flutuantes, tendo em vista que com a sedimentação da planta o nutriente tem potencial de retornar ao sistema pela composição da matéria orgânica (Barroso Junior, 2020), como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Comportamento do fósforo em lagoa com presença de *lemnas*.



Fonte: Farrel (2012).

Ademais, a biomassa destas macrófitas pode ser utilizada como matéria-prima principal na produção de fertilizantes ou ração animal, uma vez que possuem biomassa rica em proteína, com presença de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo (Cheng; Stomp, 2009).

3.5 WOLFFIA

As plantas do gênero *Wolffia* encontram-se de forma flutuante livre na superfície da água ou levemente submersas. São plantas que possuem frondes ovóides, globosas, cônicas, cilíndricas, com 1 ou 2 frondes unidas, não possuem raiz (Pott; Cervi, 1999), como mostram as Figuras 9 e 10.

Figura 9 - *Wolffia arrhiza*.



Fonte: Romano; Aronne (2021).

Figura 10 - *Wolffia brasiliensis*.



Fonte: Marques (2019).

A *Wolffia* foi citada e defendida, no ano de 1971, como sendo uma boa opção de fonte de proteína barata para alimentação humana e era consumida em alguns países do Sudeste Asiático (Bhanthumnavin; McGarry, 1971), uma vez que sua

biomassa seca pode apresentar um teor de proteína bruta de 6,8% a 45%, lipídio de 1,8% a 9,2% e fibra bruta de 5,7% a 16,2% (Landolt; Kandeler, 1987).

A *Wolffia* apresenta rápido crescimento, elevada reprodução e fornece alta nutrição, principalmente proteína. Diante disso, pode ser utilizada na produção de ração animal, sendo adequada, até mesmo, para o consumo humano (Suppadit *et al.*, 2008).

Ademais, sua utilização é viável na produção de energias renováveis a partir da sua fermentação com produção de bioetanol ou ainda geração de biometano a partir de sua digestão anaeróbica (Obasa, 2010).

Ainda não existem muitos estudos a respeito do tratamento de águas residuárias em lagoas de polimento com *Wolffia*, portanto não se sabe quais as características ideais, como o nível de fertilização do ambiente, que propiciem seu crescimento vegetal com produção de biomassa de qualidade, quando tratando-se do teor de carboidratos; proteínas, fibras e lipídios (Landolt; Kandeler, 1987).

Um sistema de cultivo de *Wolffia* é um sistema co-benéfico, uma vez que apresenta vantagens na purificação de água e produz recursos, como alimento (Barroso Junior, 2020).

Estudos analisaram a capacidade da *Wolffia* de remoção de nutrientes com mesocosmos de laboratório alimentados com águas residuárias providas do sistema secundário de tratamento, os resultados de remoção de nitrogênio e fósforo obtidos foram respectivamente de 0,03-0,18 mg N/m²·d e 0,023-0,079 mg P/m²·d (Soda *et al.*, 2013). Além disso, a *Wolffia* é uma planta fitorremediadora, capaz de extrair metais e outros poluentes de águas residuárias (Landesman *et al.*, 2005).

Para seu crescimento adequado, a *Wolffia* requer uma temperatura de 17,5°C a 30°C (Gaigher; Short, 1986) e luz solar, além de nitrogênio, fósforo e potássio agindo como nutrientes suplementares (Hasan; Chakrabarti, 2009). Ainda de acordo com Hasan; Chakrabarti (2009), raramente alguma espécie se desenvolve em temperatura igual ou superior a 35°C.

Para o desenvolvimento ideal da *Wolffia* em relação ao pH, a faixa ideal seria de 7,00 a 8,00, mesmo que estudos comprovem que a planta apresenta crescimento na faixa de 5 a 10 (Skillicorn *et al.*, 1993), como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo de alguns requisitos ambientais importantes para a criação da *Wolffia*.

Parâmetros Ambientais	Mínimo	Máximo	Ideal
Temperatura (°C)	>0	35	15-30
pH	3,0	10,0	6,5-8,0
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ¹	200	1.090	ns
Nitrogênio n (mg/L $\text{NH}_3\text{-N}$)	>0	375	7-12
Fósforo (mg/L $\text{PO}_4\text{-P}$)	0,017	154	4-8

Fonte: Adaptado de Hasan; Chakrabarti (2009).

Estudos comprovaram que o meio mais promissor de estimular o crescimento da *Wolffia* e, além disso, inibir o crescimento de microalgas, é com a utilização do fertilizante de nitrogênio, fósforo e potássio enriquecido com melaço e oligoelementos (Satya *et al.*, 2020).

A macrófita requer nitrogênio para seu desenvolvimento e crescimento, mas para a transferência e o armazenamento de energia, a planta necessita de fósforo e, por fim, para ativar as enzimas e possibilitar o metabolismo, a planta utiliza o potássio (Uchida, 2000).

De acordo com Landesman *et al.* (2005), o nitrogênio pode ser obtido na forma orgânica por meio de esterco de animais como peixes e aves ou na forma inorgânica. O desenvolvimento da *Wolffia* integrado com peixes, seja em uma lagoa ou em águas residuárias provenientes de indústria agrícola, acaba por reduzir o uso da forma inorgânica de nitrogênio (Landesman *et al.*, 2005).

Estudos desenvolvidos por Pereira *et al.* (2019) comprovaram que o ciclo de vida aproximado da *Wolffia* é de três meses, incluindo os períodos de estabelecimento, crescimento, reprodução e senescência.

De acordo com Alaerts *et al.* (1996), a produção da biomassa depende diretamente das estações do ano, uma vez que em períodos de estações secas a produção é de cerca de 550 a 650 kg de biomassa úmida/ha.d, e em períodos de estações úmidas tem-se cerca de 1000 a 1200 kg de biomassa úmida/ha.d (Alaerts *et al.*, 1996).

A respeito da redução de nitrogênio com a *Wolffia*, Alaerts *et al.* (1996) observou em uma lagoa com efluentes domésticos de 2.000 a 3.000 habitantes (0,6

ha) uma remoção de 60 a 80% de nitrogênio total no efluente em um período de 20 dias.

O gênero possui onze espécies, mas no Brasil, conhecidas até hoje, ocorrem apenas cinco espécies, sendo elas a *Wolffia arrhiza*, *Wolffia brasiliensis*, *Wolffia columbiana*, *Wolffia cylindracea* e *Wolffia globosa* (Pott; Lourenço, 2020).

A *Wolffia arrhiza* possui frondes flutuantes na superfície da água ou levemente submersas no lado mais espesso, apresentam formato esférico ou elipsoide, não possui papila no lado superior, possui lado dorsal da fronde de cor verde-clara. Geralmente, difference-se da *Wolffia brasiliensis* pela ausência de papila na face superior da fronde e pela cor clara (Pott; Lourenço, 2020), como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Vista da *Wolffia arrhiza*.



Fonte: Landolt (1986).

A *Wolffia brasiliensis* possui frondes flutuantes na superfície da água, possuem formato ovoide ou suborbicular, são planas no lado superior e possuem uma papila saliente ao centro. Possuem o lado superior da fronde com células pequenas e mais escuras, e muitos estômatos anomocíticos. Toda fronde coberta de pigmentos castanhos, geralmente mais notáveis em frondes adultas ou secas. Podem ser diferenciadas de todas as outras espécies pela presença da papila ao centro e pelas células enegrecidas (Pott; Lourenço, 2020), como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Vista da *Wolffia brasiliensis*.



Fonte: Pott; Lourenço (2020).

A *Wolffia columbiana* possui frondes flutuantes livres e ligeiramente submersas ou sob alguma forma de vegetação flutuante, apresentam simetria e formato elipsoide, quase esférico. Não possuem papilas e seus estigmas são côncavos e com ausência do pigmento castanho (Pott; Lourenço, 2020), como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Vista da *Wolffia columbiana*.



Fonte: Pott; Lourenço (2020).

A *Wolffia cylindracea* apresenta frondes hemisféricas, elipsoides ou subglobosas. Não possuem papilas e nem células pigmentadas (Pott; Lourenço, 2020), como mostra a Figura 14.

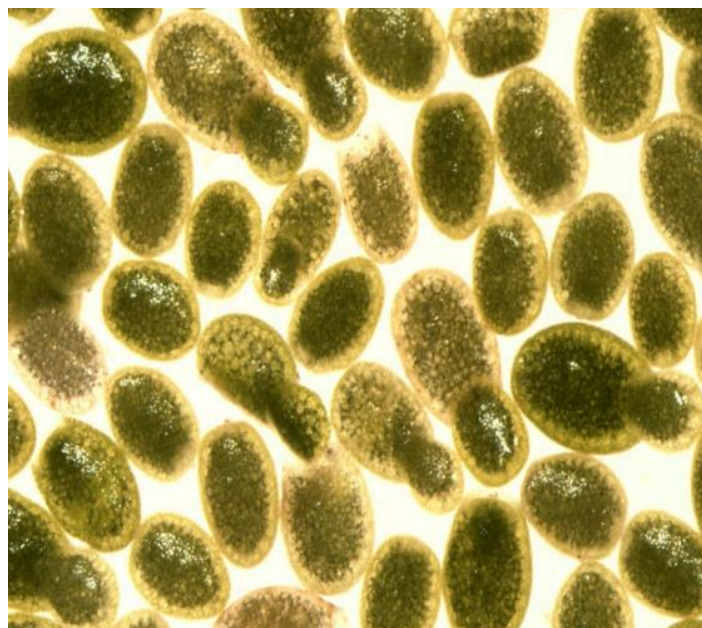
Figura 14 – Vista da *Wolffia cylindracea*.



Fonte: Pott; Lourenço (2020).

A *Wolffia globosa* apresenta frondes elipsoides, ovoides ou globosas. Não possuem papilas e nem células pigmentares, diferencia-se por apresentar margem denticulada (Pott; Lourenço, 2020), como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Vista da *Wolffia globosa*.



Fonte: Pott; Lourenço (2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Ilha Solteira – SP (FEIS/UNESP).

A espécie de macrófita utilizada no projeto foi coletada na lagoa facultativa secundária de tratamento do Centro de Detenção Provisória de São José do Rio Preto – SP, como mostra a Figura 16. A ETE em questão conta com uma lagoa anaeróbia primária, uma lagoa facultativa secundária e duas lagoas de maturação em série.

Figura 16 – Local de coleta da *Wolffia* no Centro de Detenção Provisória de São José do Rio Preto.



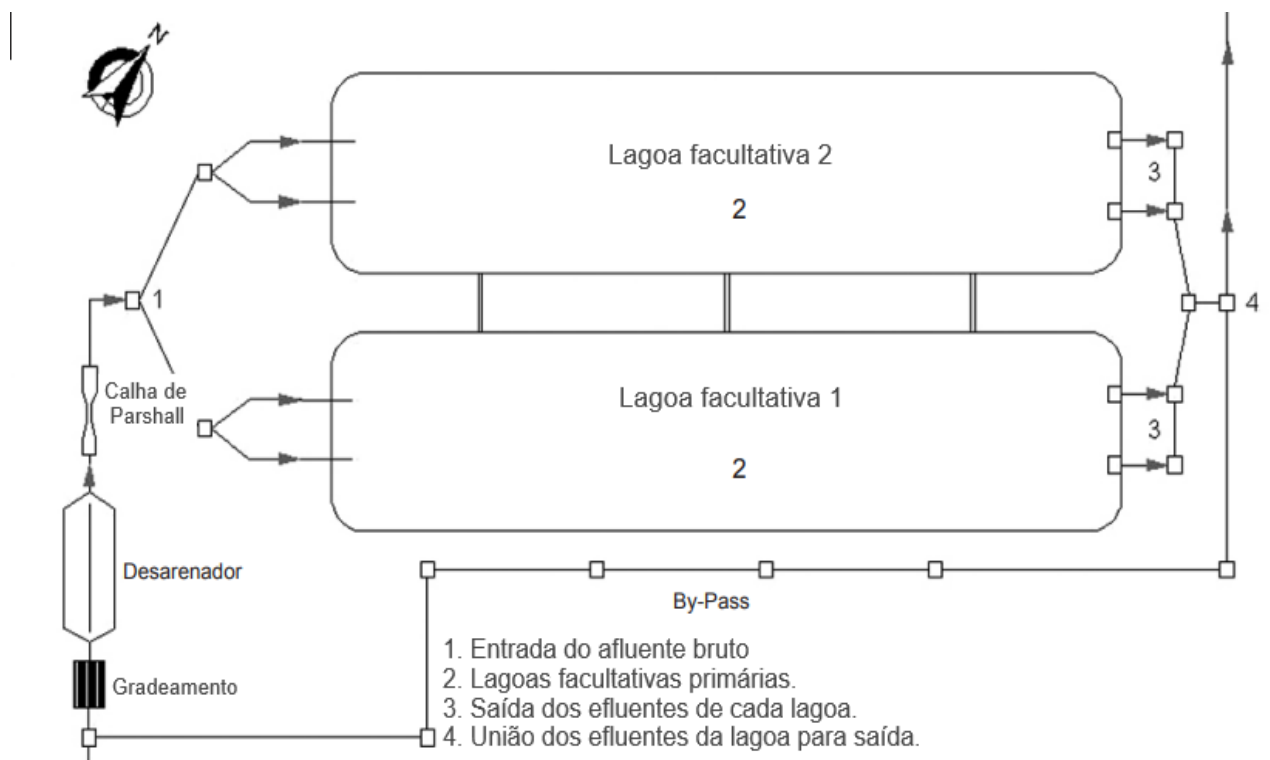
Fonte: Elaboração do próprio autor através do Google Earth.

Inicialmente, fez-se uma análise microscópica, utilizando o microscópio óptico binocular, da macrófita adotada para a pesquisa com a finalidade de determinar sua espécie dentro do gênero *Wolffia*. Nesta análise, foram observadas características específicas de cada espécie, como a presença de células enegrecidas ou a presença de papilas na parte superior da planta.

O efluente utilizado no desenvolvimento da pesquisa foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Ilha Solteira - SP, utilizou-se o efluente tratado, coletado na saída da lagoa de estabilização facultativa primária. A ETE em questão conta com um tratamento preliminar, abrangendo um sistema de gradeamento, para separação do material grosseiro e caixa de areia, para separação dos sólidos

menores. Na saída da caixa de areia, o afluente passa pelo canal de medição (Calha Parshall) e segue para uma caixa partidora, a qual realiza o direcionamento do esgoto para uma lagoa ou para ambas, como mostra a Figura 17. Ambas as lagoas facultativas possuem as mesmas dimensões, 458 metros de comprimento, 105m de largura e 1,5m de profundidade (Costa, 2015).

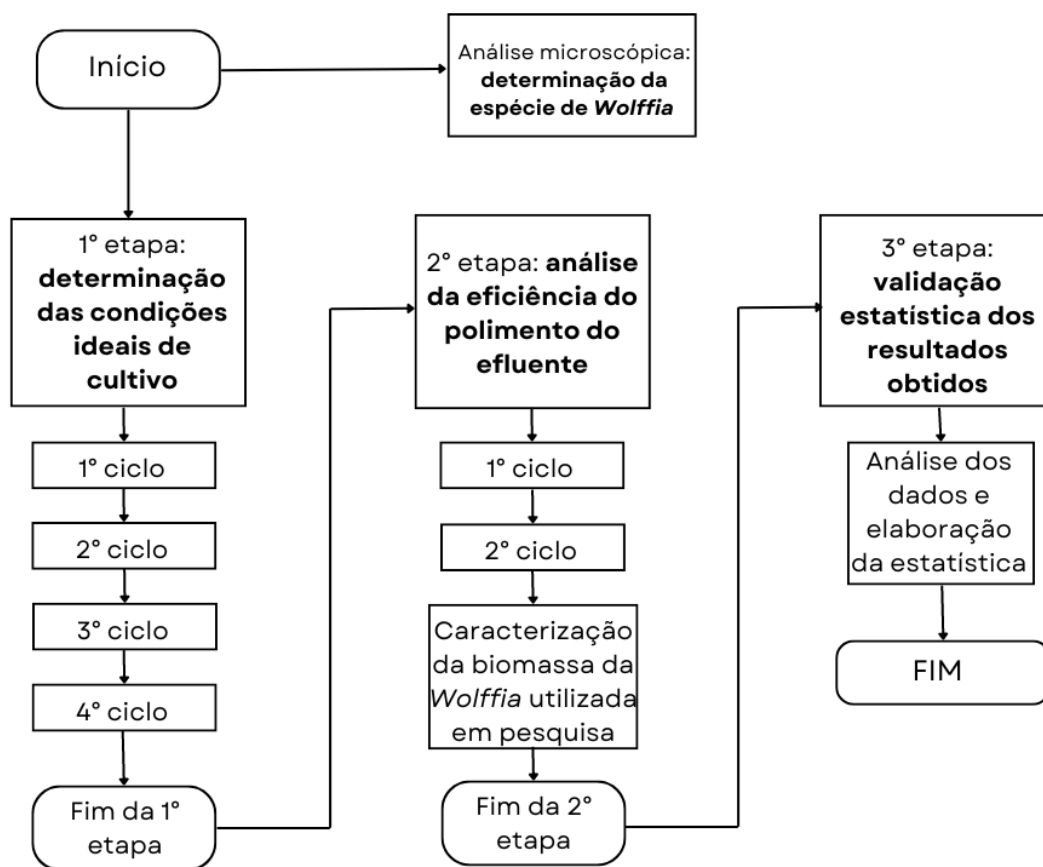
Figura 17 – Esquema da ETE de Ilha Solteira – SP.



Fonte: Adaptado de Ortiz; Matsumoto (2012).

A pesquisa foi dividida em três etapas, a Figura 18 apresenta um resumo dos principais objetivos de cada uma, assim como a sequência utilizada em projeto.

Figura 18 – Fluxograma das etapas realizadas em pesquisa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A primeira etapa consistiu em experimentos realizados inteiramente na parte interna do laboratório, desenvolvidos em quatro ciclos, visando verificar, principalmente, as condições ambientais ideais para o desenvolvimento da *Wolffia* e, além disso, confirmar a possível eficiência da planta e determinar o tempo de detenção (TDH) nos parâmetros: DBO, DQO e turbidez. Os detalhes dos experimentos de bancada estão descritos no item 4.1.

A etapa posterior, desenvolvida em dois ciclos e realizada na parte interna e externa do laboratório, visou a determinação das condições que proporcionam maior desenvolvimento e eficiência da planta no polimento das águas residuais nos parâmetros: DBO, DQO, NT, PT, ST, STS, SD, pH, Temperatura (°C) e Oxigênio Dissolvido (OD), assim como verificar qual o parâmetro em que a *Wolffia* apresenta maior influência. Os detalhes dos experimentos estão descritos no item 4.2.

Ademais, ao final da segunda etapa, realizou-se a caracterização da biomassa da *Wolffia* cultivada no experimento. Esse processo foi realizado no

Laboratório de Fisiologia do Metabolismo Vegetal (Departamento de Biologia e Zootecnia) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Ilha Solteira – SP (FEIS/UNESP), visando quantificar a biomassa das plantas em relação a Proteína Bruta, Amidos e Carboidratos Totais, e no Laboratório de Nutrição de Plantas (Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e dos Solos) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Ilha Solteira – SP (FEIS/UNESP), para quantificação da biomassa da planta em relação a Nitrogênio Total e Fósforo Total. Os detalhes dos experimentos estão descritos no item 4.2.1.

A terceira etapa, também realizada na parte interna e externa do laboratório, consistiu na confirmação dos resultados obtidos na segunda etapa, tal como a obtenção de novos, utilizando repetições das unidades de tratamento. Verificou-se a eficiência do polimento de águas residuárias com a *Wolffia* para os parâmetros de: DBO, DQO, NT, PT, ST, STS, SD, pH, Temperatura (°C) e OD. Os detalhes do experimento são descritos no item 4.3.

Os parâmetros foram analisados por adaptações do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). O Quadro 3 apresenta os parâmetros monitorados na pesquisa e os materiais e equipamentos utilizados para cada um.

Quadro 3 - Parâmetros, métodos e equipamentos utilizados nas análises.

Parâmetro	Método	Materiais e Equipamentos
DBO (mg/L)	Ensaio 5° dia (n° 5210)	Incubadora Aerador
DQO (mg/L)	Refluxo aberto (n° 5220)	Digestor digital: DRB 200 HACH Espectrofotômetro: DR2000 HACH
PT (mg/L P)	Digestão do persulfato (n° 4500-P)	Espectrofotômetro: DR2000 HACH
NT (mg/L N)	Oxidação alcalina (n° 4500-N)	Espectrofotômetro: DR2000 HACH
OD (mg/L)	Eletrométrico (n° 4500-O)	Medidor de Oxigênio Dissolvido Digital Portátil: MO-900 Instruterm
pH (-)	Eletrométrico	PHmetro portátil digital: DIGIMED, HANNA INSTRUMENTS
SD (mg/L)	Método Gravimétrico (n° 2540)	Bomba de Vácuo: Marconi Estufa: Marconi Banho-maria: Marconi Dessecador
SST (mg/L)	Método Gravimétrico (n° 2540)	Bomba de Vácuo: Marconi Estufa: Marconi Dessecador
ST (mg/L)	Método Gravimétrico (n° 2540)	Banho-maria: Marconi Estufa: Marconi Dessecador
T (°C)	Termoelétrico	Termo-higrômetro digital de máximo e mínimo
Turbidez (NTU)	Nefelométrico (n° 2130)	Turbidímetro - Modelo: 2100P - Marca: Hach

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Uma quantidade considerável de *Wolffia* era cultivada na parte externa do Laboratório de Saneamento, em caixas de 12 L que continham esgoto tratado da ETE de Ilha Solteira, com a finalidade de preservar a espécie e para o

desenvolvimento de plantas para futuros experimentos, além de garantir a espécie para qualquer imprevisto que ocorresse ao longo da pesquisa.

4.1 PRIMEIRA ETAPA

Durante todo o experimento inicial, coletou-se efluente tratado no mesmo ponto da lagoa facultativa da ETE de Ilha Solteira – SP, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – ETE de Ilha Solteira – SP.

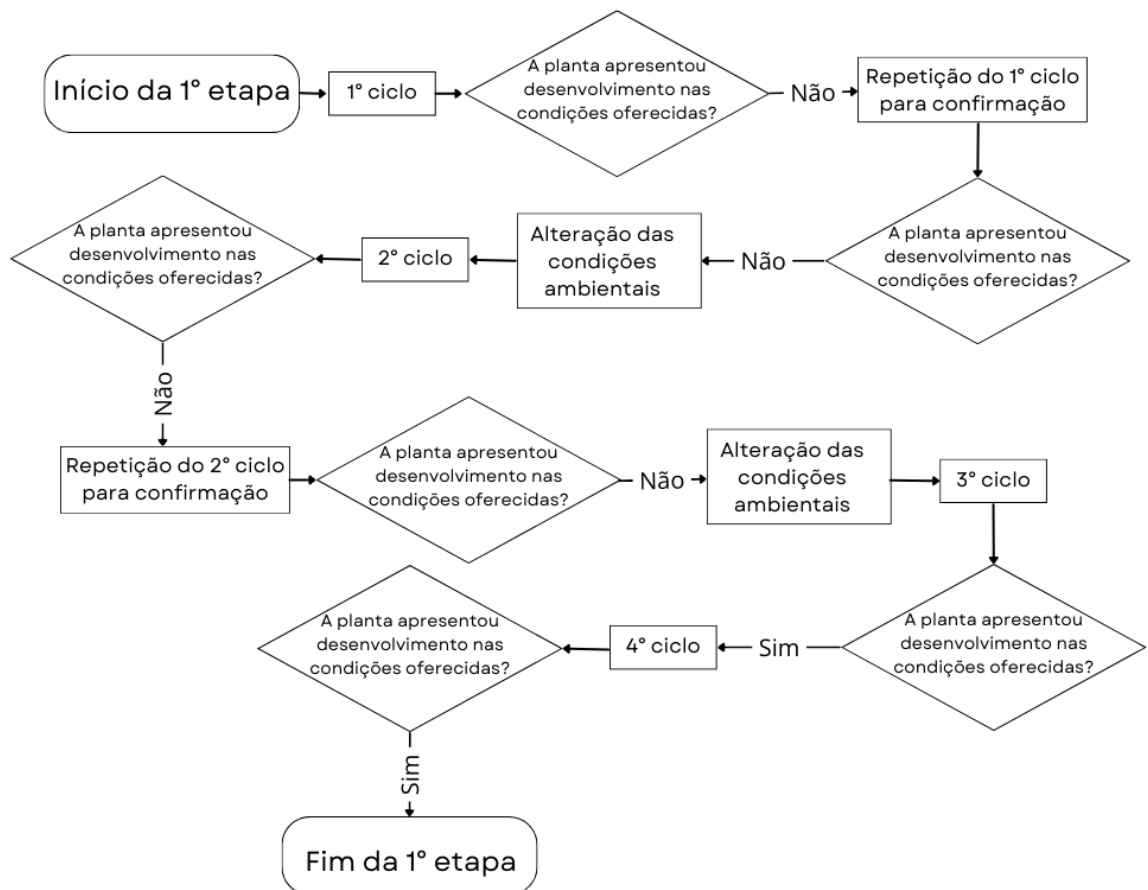


Fonte: Elaboração do próprio autor, através do Google Earth.

Em todos os experimentos iniciais verificaram-se quais os efeitos relacionados ao tempo de detenção, eficiência e o desenvolvimento na *Wolffia* para as condições propostas. A eficiência do sistema de polimento utilizado foi determinada a partir de parâmetros como DBO, DQO e turbidez. Os parâmetros analisados foram realizados por adaptação do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017) e foram realizados três vezes por semana, durante 35 dias por ciclo.

Realizou-se a primeira etapa em quatro ciclos, as principais características de cada um estão detalhadas, respectivamente, nos itens 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4. A Figura 20 apresenta a organização da etapa em questão, assim como a necessidade da realização de cada ciclo.

Figura 20 – Fluxograma da primeira etapa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.1. Primeiro ciclo

Durante o experimento inicial, utilizou-se caixas plásticas de aproximadamente 15 L, localizadas dentro de uma caixa de madeira. O sistema continha uma lâmpada fluorescente de 30 W e 6400 K, ligada a um timer analógico para controle do fotoperíodo, como mostra a Figura 21. O fotoperíodo adotado foi de 12 h/d, visando simular a luz do dia.

Figura 21 – Unidade experimental utilizada, contendo iluminação e caixas de cultivo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Foram utilizadas duas caixas de cultivo contendo esgoto doméstico tratado da ETE de Ilha Solteira – SP. Uma das caixas contendo *Wolffia* e a outra sem, somente efluente, sendo utilizada como controle. Deste modo, foi possível avaliar se a presença da macrófita influência no tratamento quando comparado ao processo de autodepuração na caixa controle.

A caixa de cultivo que continha a *Wolffia* possuía uma bomba submersa para recirculação contínua, em uma vazão de $6 \cdot 10^{-3}$ L/s, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Caixas de cultivo do experimento bancada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o primeiro ciclo do experimento inicial, utilizou-se um adensamento inicial de 450 g/m² de *Wolffia brasiliensis* na caixa de polimento.

4.1.2. Segundo ciclo

Posteriormente, para o segundo ciclo do experimento inicial, mantiveram-se as caixas de, aproximadamente, 15 L localizadas dentro de uma caixa de madeira, com lâmpada fluorescente de 30 W e 6400 K, ligada a um timer analógico para controle do fotoperíodo de 12 h/d.

Foram utilizadas duas caixas de cultivo contendo esgoto doméstico tratado da ETE de Ilha Solteira – SP diluído em 10%, uma das caixas servindo como controle e a outra contendo a *Wolffia* e uma bomba submersa para recirculação contínua, em uma vazão de 6.10⁻³ L/s.

Para o segundo ciclo do experimento inicial, utilizou-se um adensamento inicial de 450 g/m² de *Wolffia brasiliensis* na caixa de polimento.

4.1.3. Terceiro ciclo

Para o terceiro ciclo do experimento, mantiveram-se as duas caixas de 15 L com alteração da lâmpada do sistema. Utilizou-se uma lâmpada com emissão de luz amarela de 105 W e 2700K ligada a um timer analógico com fotoperíodo de 12 h/d, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Sistema de cultivo para experimento de bancada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Foram utilizadas duas caixas de cultivo contendo esgoto doméstico tratado da ETE de Ilha Solteira – SP, uma das caixas utilizando a *Wolffia* como polimento e a outra servindo como forma de controle. A caixa de cultivo que continha a *Wolffia* possuía também a bomba submersa de recirculação contínua com vazão de 6.10^{-3} L/s.

Para o terceiro ciclo do experimento inicial, utilizou-se um adensamento inicial de 450 g/m² de *Wolffia brasiliensis* na caixa de polimento.

4.1.4. Quarto ciclo

Por fim, para o último ciclo do experimento inicial, utilizou-se caixas de, aproximadamente, 15 L localizadas dentro de uma caixa de madeira. O sistema continha uma lâmpada de 105 W e 2700 K, ligada a um timer analógico para controle do fotoperíodo de 12 h/d.

Foram utilizadas duas caixas de cultivo contendo esgoto doméstico tratado da ETE de Ilha Solteira – SP, uma das caixas utilizando a *Wolffia* como polimento e a outra servindo como forma de controle. Ambas as caixas de cultivo que continham a bomba submersa de recirculação contínua com vazão de 6.10^{-3} L/s, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Caixas de cultivo do experimento de bancada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o quarto ciclo do experimento inicial, utilizou-se um adensamento inicial de 350 g/m² de *Wolffia brasiliensis* na caixa de polimento.

4.1.5. Resumo do experimento inicial

O Quadro 4 apresenta um resumo das principais características dos experimentos iniciais, destacando as alterações relevantes entre os materiais e processos utilizados em cada ciclo.

Quadro 4 - Resumo das características principais dos experimentos iniciais.

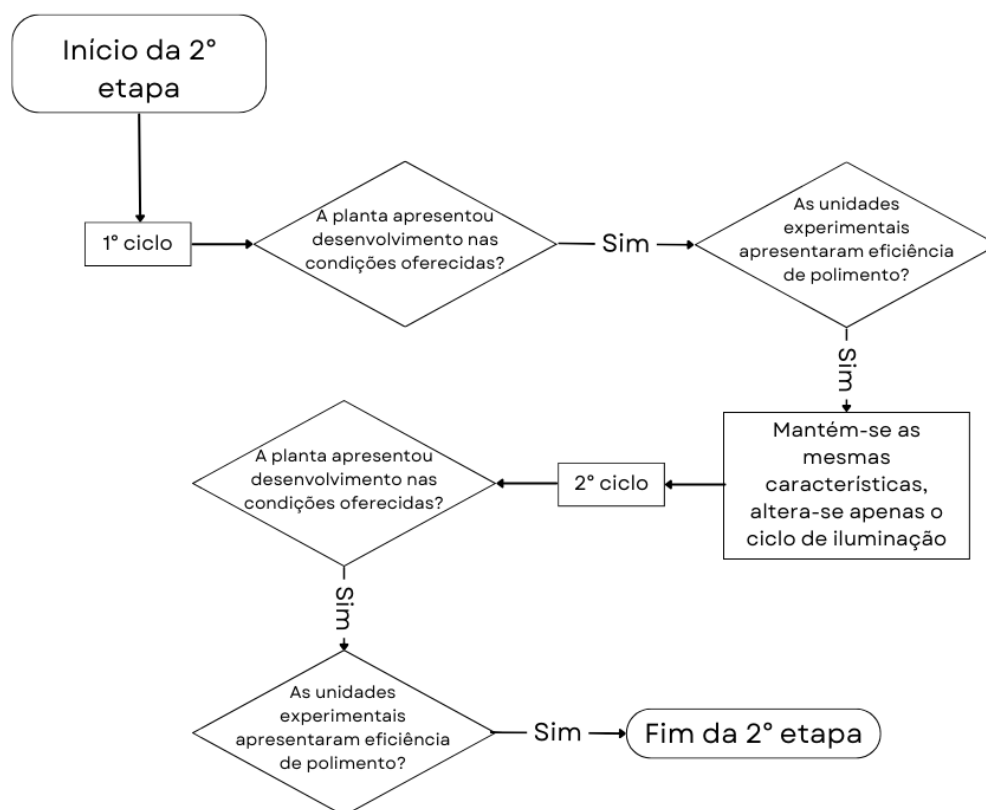
Ciclo	Bomba de recirculação contínua	Efluente	Iluminação
1	Apenas na caixa que contém a <i>Wolffia</i>	Concentrado	Lâmpada fluorescente de 30 W e 6400 K Timer analógico
2	Apenas na caixa que contém a <i>Wolffia</i>	Diluído em 10%	Lâmpada fluorescente de 30 W e 6400 K Timer analógico
3	Apenas na caixa que contém a <i>Wolffia</i>	Concentrado	Lâmpada com emissão de luz amarela de 105 W e 2700K Timer analógico
4	Em ambas as caixas (controle e na caixa que contém a <i>Wolffia</i>)	Concentrado	Lâmpada com emissão de luz amarela de 105 W e 2700K Timer analógico

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 SEGUNDA ETAPA

Desenvolveu-se a segunda etapa em dois ciclos, como mostra a Figura 25. Para ambos os ciclos, a densidade inicial de *Wolffia brasiliensis* utilizada foi de 200 g/m².

Figura 25 – Fluxograma da segunda etapa.

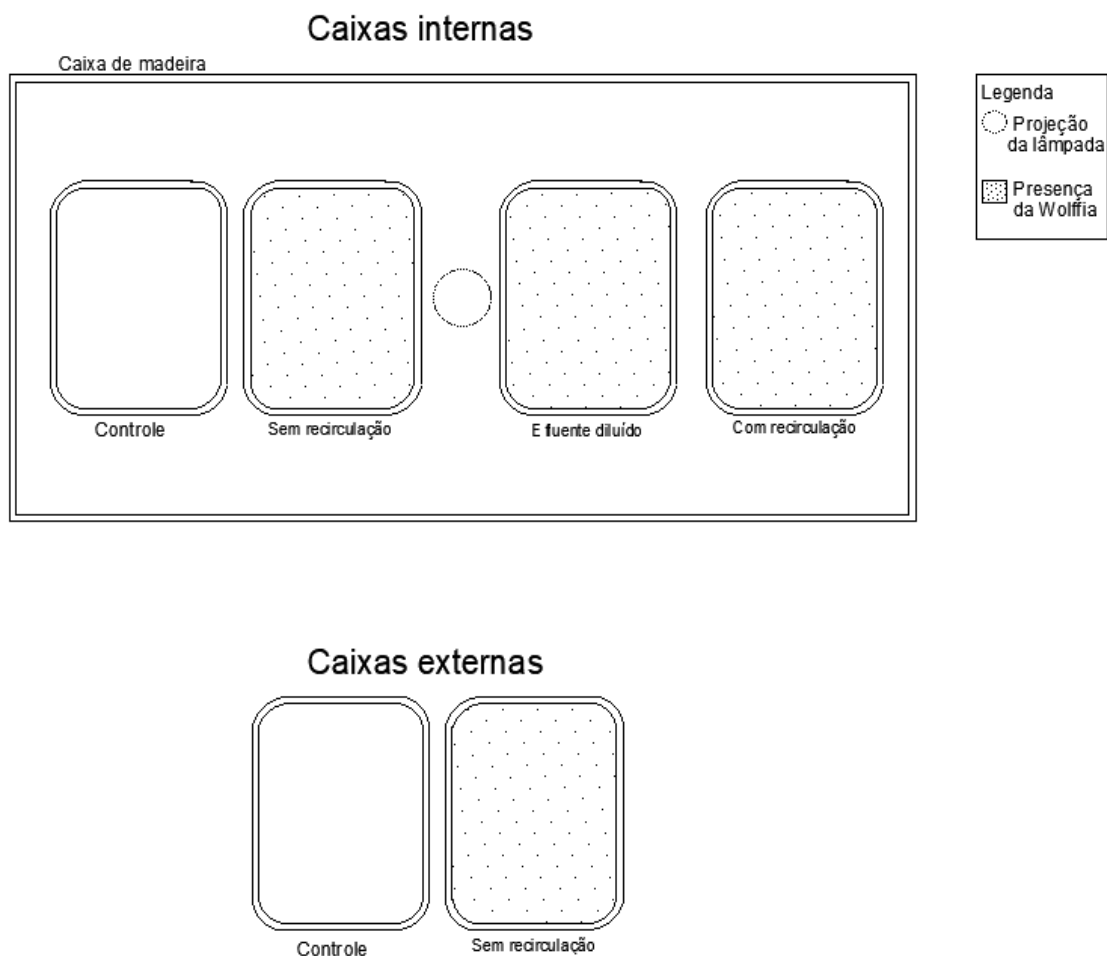


Fonte: Elaboração do próprio autor.

No decorrer dos dois ciclos da segunda etapa, utilizou-se caixas plásticas com aproximadamente 15 L cada, localizadas na parte interna e externa do Laboratório de Saneamento da UNESP de Ilha Solteira - SP.

Na parte interna do laboratório, utilizou-se quatro caixas com efluente tratado da ETE de Ilha Solteira – SP. Uma das caixas apresentava apenas o efluente, o qual serve como uma forma de controle sobre a autodepuração do efluente, outra caixa apresentava apenas o efluente e a *Wolffia* como forma de polimento, a terceira caixa continha efluente tratado diluído em 10% e a *Wolffia* e a última caixa apresentava efluente, *Wolffia* como forma de polimento e uma bomba submersa de recirculação contínua com vazão de 6.10^{-3} L/s. Na parte externa do laboratório, utilizou-se duas caixas com efluente tratado, de forma que uma delas servisse como controle, contendo apenas efluente e a outra contendo a *Wolffia* como forma de polimento, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Organização das caixas de cultivo para a segunda etapa da pesquisa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As caixas de cultivo internas no laboratório encontravam-se dentro de uma caixa de madeira. O sistema era composto por uma lâmpada que emite luz amarela de 105 W e 2700 K, ligada a um timer analógico para controle do fotoperíodo, como mostra a Figura 27. O fotoperíodo adotado foi de 12 h/d, visando simular a luz do dia.

Figura 27 – Sistema de cultivo dentro do laboratório.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Durante o primeiro ciclo, coletou-se efluente tratado no mesmo ponto da lagoa facultativa situada ao lado esquerdo da ETE de Ilha Solteira – SP e, durante o segundo ciclo, coletou-se efluente tratado no mesmo ponto da lagoa facultativa situada ao lado direito da ETE de Ilha Solteira – SP, como mostra a Figura 28. A alteração no local de coleta entre os ciclos ocorreu devido ao fechamento da lagoa localizada ao lado esquerdo da ETE de Ilha Solteira – SP para limpeza.

Figura 28 – ETE de Ilha Solteira - SP com pontos de coleta.



Fonte: Elaboração do próprio autor, através do Google Earth.

Em todo o primeiro ciclo, o timer analógico mantinha a lâmpada acesa durante o dia, por 12 h, e desligada durante a noite. No segundo ciclo, manteve-se a lâmpada acesa por 12 h durante a noite e apagada durante o dia, visando analisar a influência da alteração da temperatura interna nos resultados.

Em todos os experimentos da segunda etapa verificaram-se quais as condições que proporcionam maior desenvolvimento e eficiência da planta no polimento das águas residuais nos parâmetros: DBO, DQO, NT, PT, ST, STS, SD, pH, Temperatura (°C) e OD. Os parâmetros foram analisados por 35 dias para cada ciclo por adaptação do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017) e suas respectivas frequências encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros analisados e suas respectivas frequências.

Parâmetro Analisado	Frequência de Amostragem
DBO (mg/L)	Semanal
DQO (mg/L)	3x por semana
PT (mg/L P)	Semanal
NT (mg/L N)	Semanal
OD (mg/L)	Semanal
pH (-)	Semanal
SD (mg/L)	No início e no final
SST (mg/L)	No início e no final
ST (mg/L)	No início e no final
T (°C)	Semanal
Turbidez (NTU)	Semanal

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Durante toda a segunda etapa, realizou-se reposição semanal do efluente que evapora das caixas. O efluente de reposição foi coletado, semanalmente, nos mesmos pontos da coleta do efluente inicial para cada ciclo. Além disso, para todo efluente coletado, realizou-se a análise dos parâmetros: DBO, DQO, NT, PT, ST, STS, SD, pH e OD.

Após cada reposição de efluente, utilizou-se a Equação 1 para verificar qual o resultado esperado para a mistura, para as análises de DQO.

$$\text{Result mist} = \frac{\text{Vol da cx} \times \text{Result da cx} + \text{Vol do ef.} \times \text{Result do ef.}}{\text{Vol total}} \quad (1)$$

No qual:

Result mist = resultado esperado para a mistura do parâmetro em questão,

Vol da cx = volume da caixa no momento da reposição,

Result da cx = valor do parâmetro analisado anterior a reposição,

Vol do ef = quantidade de efluente de reposição,

Result do ef = valor do parâmetro analisado para o efluente que será repostado,

Vol total = o volume total da caixa.

4.2.1. Caracterização da biomassa

Após a finalização do segundo ciclo da segunda etapa, realizou-se a coleta de toda a biomassa da *Wolffia* contida nas caixas internas e externa para a caracterização da biomassa.

Para a caracterização do carboidrato total, amido e proteína total, realizada no Laboratório de Fisiologia do Metabolismo Vegetal (Departamento de Biologia e Zootecnia) da UNESP de Ilha Solteira – SP, utilizou-se amostra fresca com extração de compostos solúveis. As análises e suas respectivas metodologias estão no Quadro 6.

Quadro 6 - Análises da caracterização da biomassa

Variável Analisada	Método de análise	Referência
Proteínas Totais	Quantificação de proteínas solúveis totais	Bradford (1976)
Amido	Extração e quantificação de amido	Bieleski <i>et al.</i> (1966) Umbreit <i>et al.</i> (1957) Yemm <i>et al.</i> (1954)
Carboidrato Total	Quantificação de açúcares solúveis totais	Umbreit <i>et al.</i> (1957)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a caracterização do nitrogênio total e fósforo total, realizada no Laboratório de Nutrição de Plantas (Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e dos Solos) da UNESP de Ilha Solteira – SP, utilizou-se amostra seca na estufa a 65°C por 48 h. As análises e suas respectivas metodologias estão no Quadro 7.

Quadro 7 - Análises da caracterização da biomassa

Variável Analisada	Método de análise	Referência
Nitrogênio Total	Digestão Sulfúrica	Malavolta <i>et al.</i> (1997)
Fósforo Total	Digestão Nitro Perclórica	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 TERCEIRA ETAPA

Para a terceira etapa, utilizou-se caixas de cultivo de aproximadamente 1,5L, localizadas na parte interna e externa do Laboratório de Saneamento da UNESP de Ilha Solteira – SP.

Na parte interna do laboratório, foram utilizadas 12 caixas de cultivo dispostas dentro de uma caixa de madeira. O sistema contém duas lâmpadas led tubulares de 3000 K e 18 W, com 1,20m cada uma, ambas ligadas a um timer analógico para definição de fotoperíodo, como mostram as Figuras 29 e 30. O fotoperíodo adotado foi de 12 h/d, a fim de simular a luz do dia.

Figura 29 – Detalhamento das lâmpadas utilizadas na terceira etapa do experimento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 30 – Sistema completo utilizado para terceira etapa do experimento

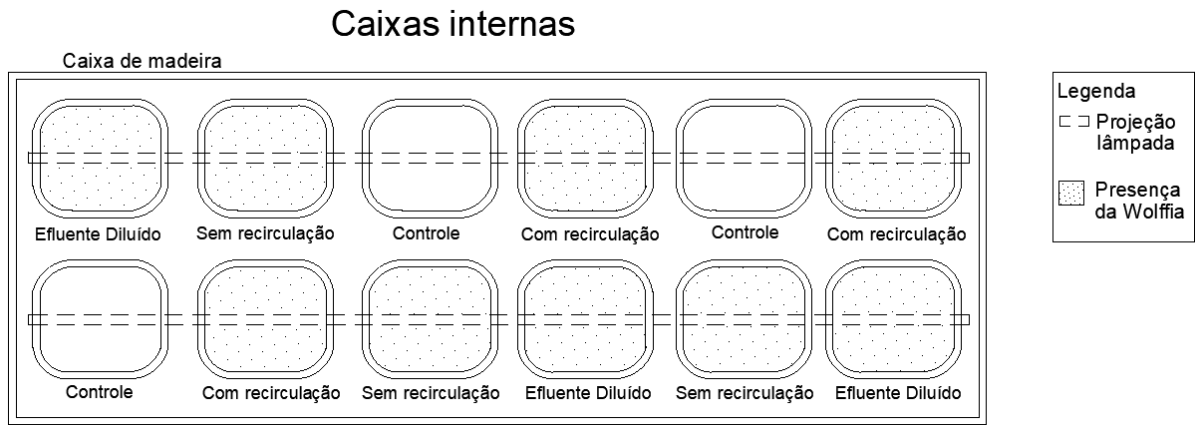


Fonte: Elaboração do próprio autor.

As caixas internas abrangem três tipos de cultivos com a *Wolffia*, sendo um deles em efluente concentrado e sem bomba de recirculação, outro contendo efluente diluído em 10% e sem bomba de recirculação e, por fim, o terceiro contendo efluente concentrado e bomba de recirculação contínua com vazão de $6 \cdot 10^{-3}$ L/s. Além disso, utilizam-se caixas contendo apenas o efluente concentrado, servindo como forma de controle e verificação da autodepuração do efluente.

Ademais, realizou-se três repetições de cada unidade experimental. As caixas de cultivo foram dispersas e organizadas de maneira randomizada, como mostra a Figura 31. Deste modo, verifica-se a igualdade das condições em todos os pontos da caixa de madeira, assim como a influência de alterações geradas por oscilação na luminosidade e temperatura.

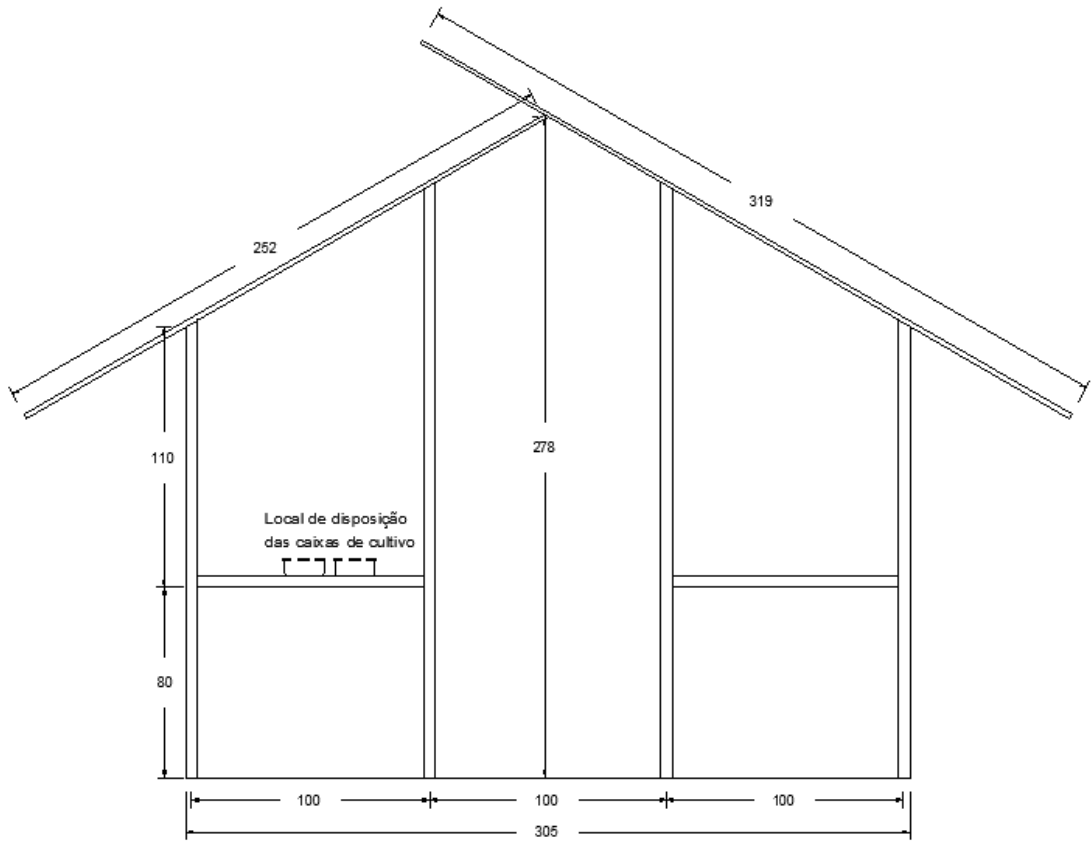
Figura 31 – Organização das caixas de cultivo internas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As caixas externas foram organizadas dentro de uma estufa de 3 metros de largura, 3 metros de comprimento e altura central de 2,78 metros, localizada na parte externa no Laboratório de Saneamento da UNESP de Ilha Solteira – SP, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Local de disposição das caixas de cultivo externas na estufa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Dentro da estufa, foram dispostas de 12 caixas contendo as mesmas três formas de cultivo da *Wolffia* que as caixas internas e as caixas controle, juntamente com três repetições de cada unidade experimental.

Além disso, realizou-se a organização e o arranjo dos recipientes, garantindo que as mesmas formas de cultivo não fiquem lado a lado, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Disposição das caixas externas para a terceira etapa do experimento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Realizou-se, para todas as unidades experimentais, a reposição do efluente que evapora das caixas plásticas.

Durante toda a terceira etapa, confirmam-se os resultados obtidos na segunda etapa, garantindo assim quais as condições mais viáveis ao desenvolvimento da planta, além da sua eficiência no polimento de águas residuárias nos parâmetros: DBO, DQO, NT, PT, ST, STS, SD, pH, Temperatura (°C) e OD. Os parâmetros foram analisados por 35 dias para cada ciclo por adaptação do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017) e suas respectivas frequências encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8 - Parâmetros analisados e suas respectivas frequências

Parâmetro Analisado	Frequência de Amostragem
DBO (mg/L)	Semanal
DQO (mg/L)	3x por semana
PT (mg/L P)	Semanal
NT (mg/L N)	Semanal
OD (mg/L)	Semanal
pH (-)	Semanal
SD (mg/L)	No início e no final
SST (mg/L)	No início e no final
ST (mg/L)	No início e no final
T (°C)	Diário
Turbidez (NTU)	Semanal

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS E ESTATÍSTICAS

Todos os dados brutos obtidos nas etapas foram armazenados no software Microsoft Excel® 2021. A geração de todos os gráficos utilizados neste trabalho foi realizada pelo software Origin® 2023.

A eficiência de remoção de DBO, DQO, NT, PT, ST, SST e SD foi verificada pela diferença da concentração destes parâmetros no início e no final de cada ciclo, para isso, utiliza-se a Equação 2.

$$E = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (2)$$

Em que:

E (%) = eficiência de remoção dos parâmetros de análise,

C_i = concentração no início do polimento,

C_f = concentração final, após o processo de polimento.

Para a terceira etapa, realizou-se a análise de acordo com delineamento inteiramente casualizado, sendo fator A tratamento, fator B ambiente e o tempo como parcela subdividida. Utilizou-se o *software Sisvar* para a execução do teste ANOVA e do teste complementar *Scott-Knott*, com nível de significância de 5%, para análise da significância das diferentes formas de tratamentos empregados nesse estudo, assim como a influência do ambiente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As discussões dos resultados são divididas de acordo com as etapas e seus respectivos ciclos.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DA ESPÉCIE DE *WOLFFIA*

De acordo com Pott e Lourenço (2020), a espécie de *Wolffia brasiliensis* difere-se de todas as outras pela presença de papila ao centro e por apresentar células enegrecidas, características identificadas na planta utilizada em pesquisa, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Vistas microscópicas da *Wolffia brasiliensis* adotada para pesquisa com ampliação de 50x



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ademais, segundo Pott e Lourenço (2020), as frondes da *Wolffia brasiliensis* possuem de 0,3 a 1,4 mm de comprimento, como mostra a Figura 35.

Figura 35 – Vista microscópica da *Wolffia brasiliensis* com medidas de comprimento com ampliação de 50x



Fonte: Elaboração do próprio autor.

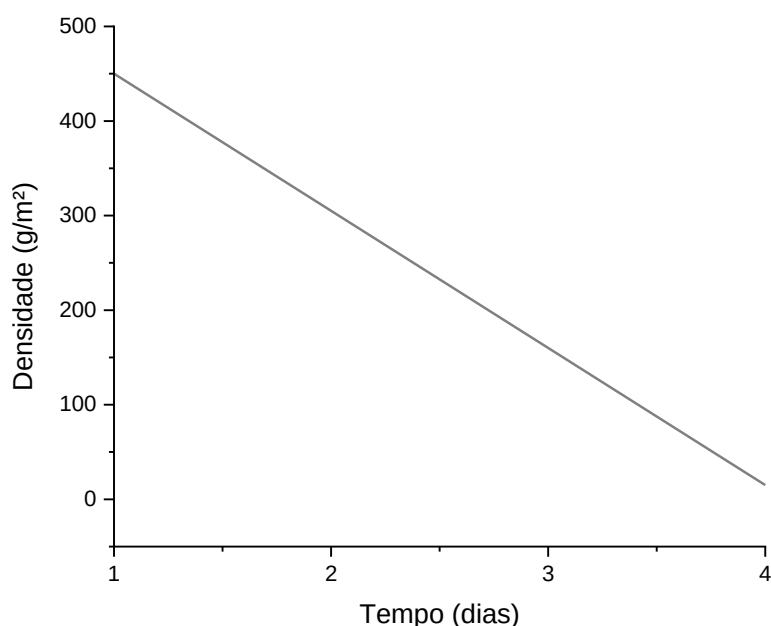
Diante disso, adotou-se a *Wolffia* utilizada em toda pesquisa como sendo da espécie *brasiliensis*.

5.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS INICIAIS

5.2.1. Resultados do primeiro ciclo dos experimentos iniciais

A Figura 36 apresenta os dados do resultado do adensamento da *Wolffia brasiliensis* para o primeiro ciclo dos experimentos iniciais. Observa-se que a planta não apresentou desenvolvimento as condições oferecidas, com queda considerável no número de indivíduos a partir do segundo dia de experimento.

Figura 36 – Monitoramento da densidade da *Wolffia* no primeiro ciclo dos experimentos iniciais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para a DQO, DBO e turbidez do primeiro ciclo dos experimentos iniciais encontram-se na Tabela 4, compreende os valores para a caixa controle e para a caixa de polimento com a *Wolffia brasiliensis*.

Tabela 4 – Valores obtidos para DQO, DBO e turbidez para o primeiro ciclo da primeira etapa.

Unidades	DQO (mg/L)		DBO (mg/L)		Turbidez (NTU)	
	1° dia	4° dia	1° dia	4° dia	1° dia	4° dia
Controle	179	166	99	178	158	187
Com <i>Wolffia</i>	179	151	99	157	158	181

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O primeiro ciclo do experimento inicial foi interrompido no quarto dia de pesquisa devido à redução considerável no adensamento da *Wolffia brasiliensis*, restando pouca quantidade da espécie (15 g/m²), possivelmente insuficiente para os resultados de polimento.

O declínio da quantidade de plantas pode ser gerado pelas condições as quais elas foram inseridas, como efluente concentrado, temperatura inadequada ou baixa iluminação, tal como iluminação incorreta.

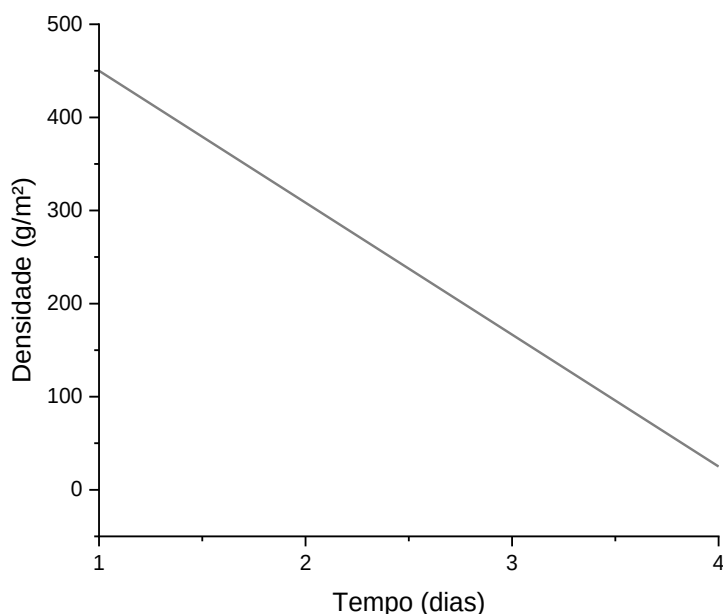
A temperatura da água durante esse experimento era de 30°C e o pH era de 7,83.

De acordo com Gaigher; Short (1986), para seu crescimento adequado, a *Wolffia* requer uma temperatura de 17,5°C a 30°C e, de acordo com Skillicorn *et al.*, (1993), para o desenvolvimento ideal da *Wolffia* a faixa ideal do pH seria de 7,00 a 8,00. Diante disso, estipula-se que a possível causa para a redução da espécie no experimento seja a concentração do efluente.

5.2.2. Resultados do segundo ciclo dos experimentos iniciais

A Figura 37 apresenta os resultados do adensamento da *Wolffia brasiliensis* para o segundo ciclo dos experimentos iniciais. Nota-se a falta de desenvolvimento da planta nas condições oferecidas, levando a perda de quase toda a espécie no terceiro dia de experimento.

Figura 37 – Monitoramento da densidade da *Wolffia* no segundo ciclo dos experimentos iniciais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para a DQO, DBO e turbidez do segundo ciclo dos experimentos iniciais encontram-se na Tabela 5, compreende os valores para a caixa controle e para a caixa de polimento com a *Wolffia brasiliensis*.

Tabela 5 – Valores obtidos para DQO, DBO e turbidez para o segundo ciclo da primeira etapa

Unidades	DQO (mg/L)		DBO (mg/L)		Turbidez (NTU)	
Experimentais	1° dia	6° dia	1° dia	6° dia	1° dia	6° dia
Controle	118	151	83	97	102	140
Com <i>Wolffia</i>	118	131	83	77	102	99

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O segundo ciclo dos experimentos iniciais foi interrompido no sétimo dia de experimento, uma vez que a macrófita apresentou queda considerável no seu adensamento (25 g/m²), valor possivelmente insuficiente para análise dos resultados de polimento.

A queda na quantidade de plantas pode ser gerada pelas condições as quais elas foram inseridas, como baixa ou inadequada iluminação. A concentração elevada do efluente foi descartada como possível causa do declínio da espécie, tendo em vista que o efluente utilizado neste segundo ciclo possuía diluição de 10%.

A temperatura da água durante esse experimento era de 25°C e o pH era de 8,03.

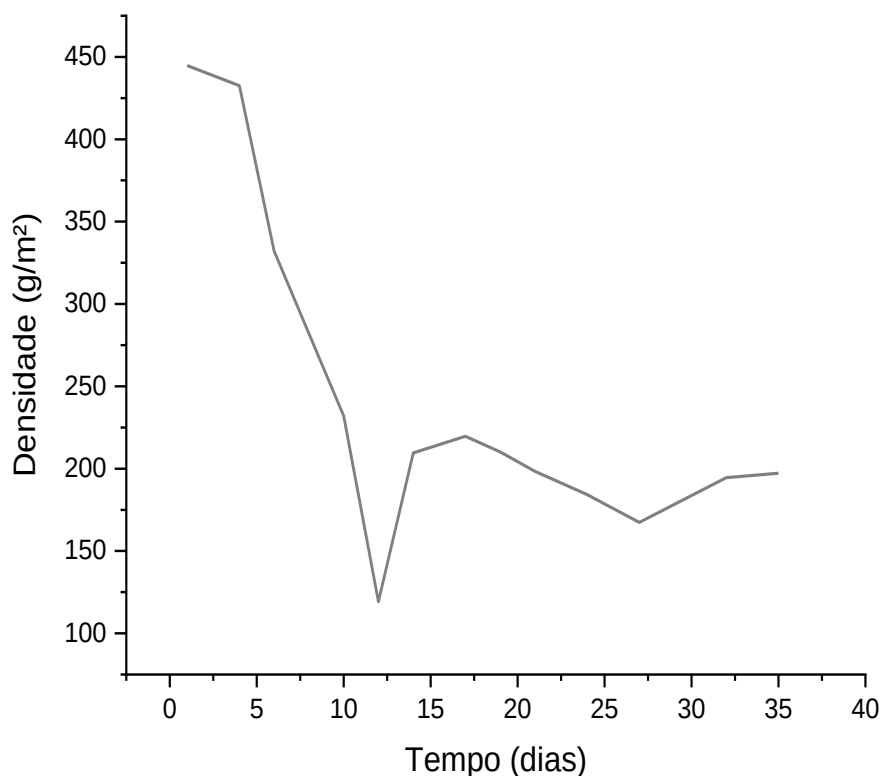
De acordo com Gaigher; Short (1986), para seu crescimento adequado, a *Wolffia* necessita de luz solar. Diante disso, presume-se que a possível causa para a redução da espécie nesse experimento seja a iluminação de forma incorreta.

5.2.3. Resultados do terceiro ciclo dos experimentos iniciais

5.2.3.1. Adensamento da *Wolffia brasiliensis*

A *Wolffia* apresentou desenvolvimento satisfatório nas condições oferecidas durante o terceiro ciclo do experimento inicial, como mostra a Figura 38. Com a análise dos dados de adensamento (Figura 38) é possível identificar uma redução da espécie no 12° dia e, posteriormente, uma possível estabilização da densidade.

Figura 38 – Monitoramento da densidade da *Wolffia* no terceiro ciclo dos experimentos iniciais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

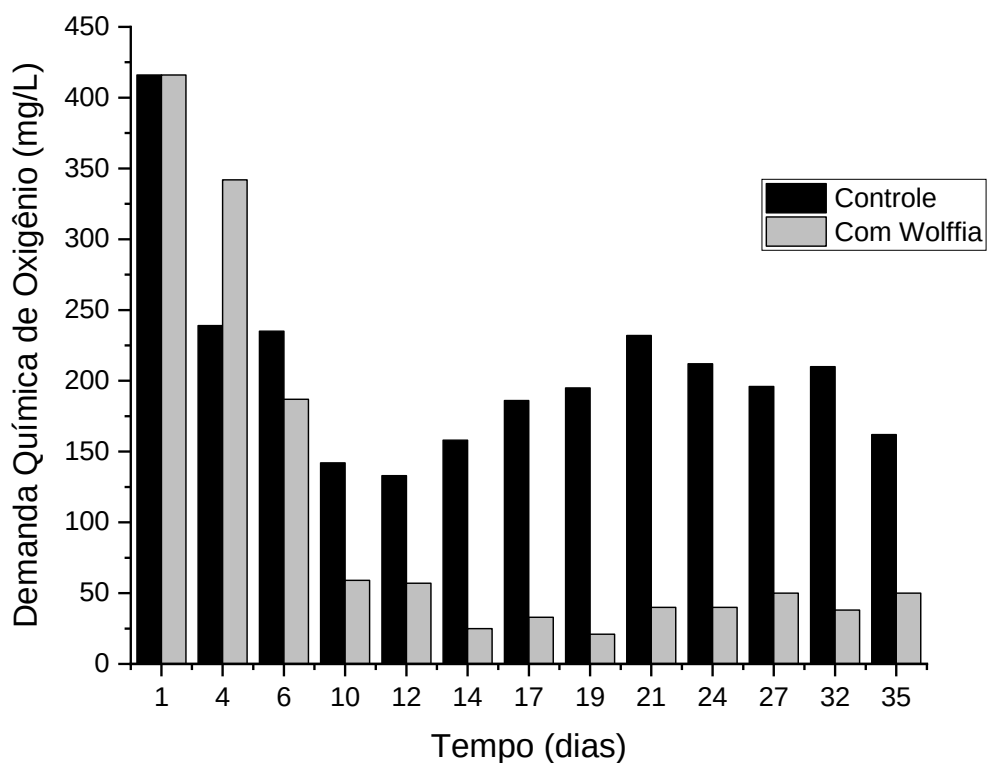
Constata-se que o possível adensamento mais adequado, para as dimensões da caixa de cultivo e condições ofertadas, seja de 200g/m².

As possíveis oscilações posteriores à estabilização, a partir do 12º dia, podem ser causadas por fatores externos, como a alteração da temperatura ambiente.

5.2.3.2. Resultado da remoção DQO para o terceiro ciclo do experimento inicial

Os resultados para a redução da demanda química de oxigênio (DQO) para os 35 dias do terceiro ciclo do experimento inicial estão da Figura 39, contendo os resultados para a caixa utilizada como controle e para a caixa de polimento com a *Wolffia*.

Figura 39 – Resultados da DQO para o terceiro ciclo do experimento inicial



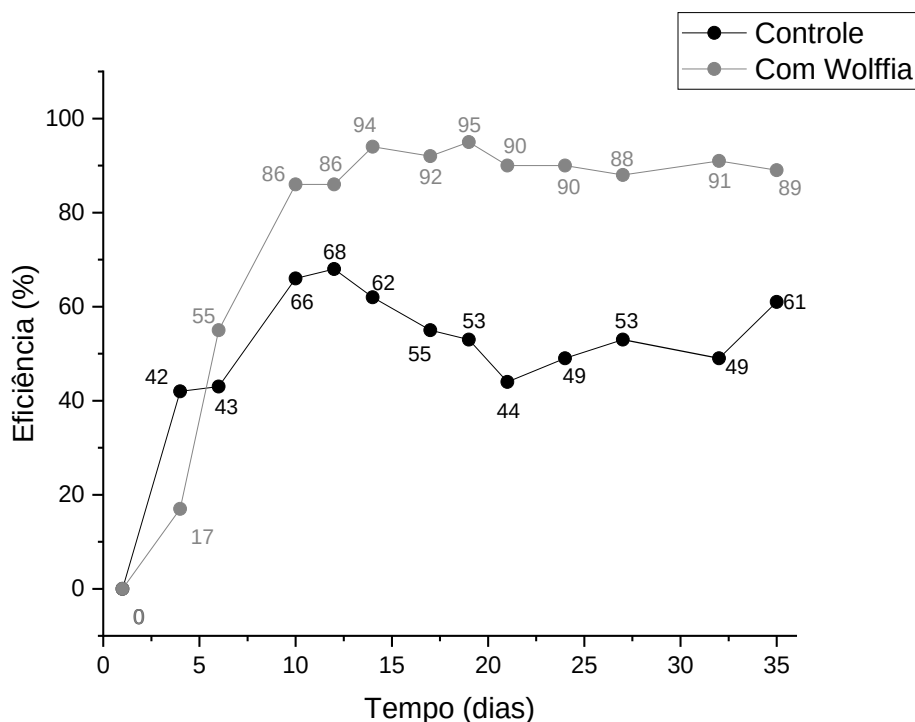
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por meio da análise dos dados contidos na Figura 39, nota-se que um valor considerável de eficiência de polimento com a *Wolffia*, cerca de 86% pela Equação 2, ocorre entre o 10º e 12º dia.

Posterior ao 12º dia, os valores de DQO apresentam-se estabilizados ou com mínimas oscilações. Estas alterações podem ser causadas geralmente por fatores externos, como a presença de insetos, a movimentação das caixas e a diferença da temperatura externa.

A Figura 40 apresenta os valores observados para a eficiência na remoção de DQO da caixa controle e da caixa cultivo com a *Wolffia* durante os 35 dias de experimento.

Figura 40 – Eficiência obtida na remoção da DQO durante o terceiro ciclo da primeira etapa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

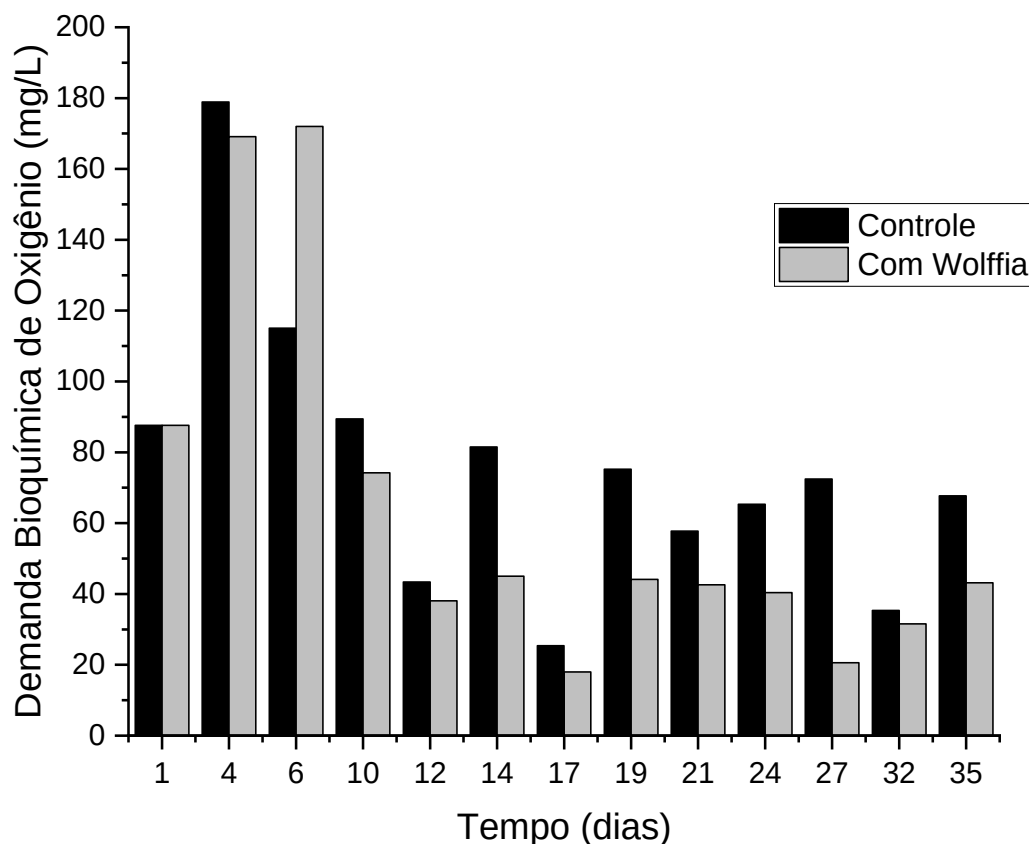
Ao final dos 35 dias de experimento, observa-se uma eficiência de redução do polimento com a *Wolffia brasiliensis* de, aproximadamente, 89%, enquanto a caixa controle apresenta uma redução de DQO por autodepuração de, aproximadamente, 61%.

De acordo com Cross (2006), mesmo que não sejam muito claros os mecanismos de degradação da matéria orgânica pelas macrófitas, a remoção de DQO está associada a microrganismos aeróbios e anaeróbios fixados nas plantas, assim como nos diversos sistemas de tratamentos biológicos de efluentes.

5.2.3.3. Resultado da remoção DBO para o terceiro ciclo do experimento inicial

Os resultados de redução da demanda química de oxigênio (DBO) da caixa controle e da caixa de polimento com a *Wolffia* para os 35 dias do terceiro ciclo do experimento inicial apresentam-se na Figura 41.

Figura 41 - Resultados da DBO para o terceiro ciclo do experimento inicial



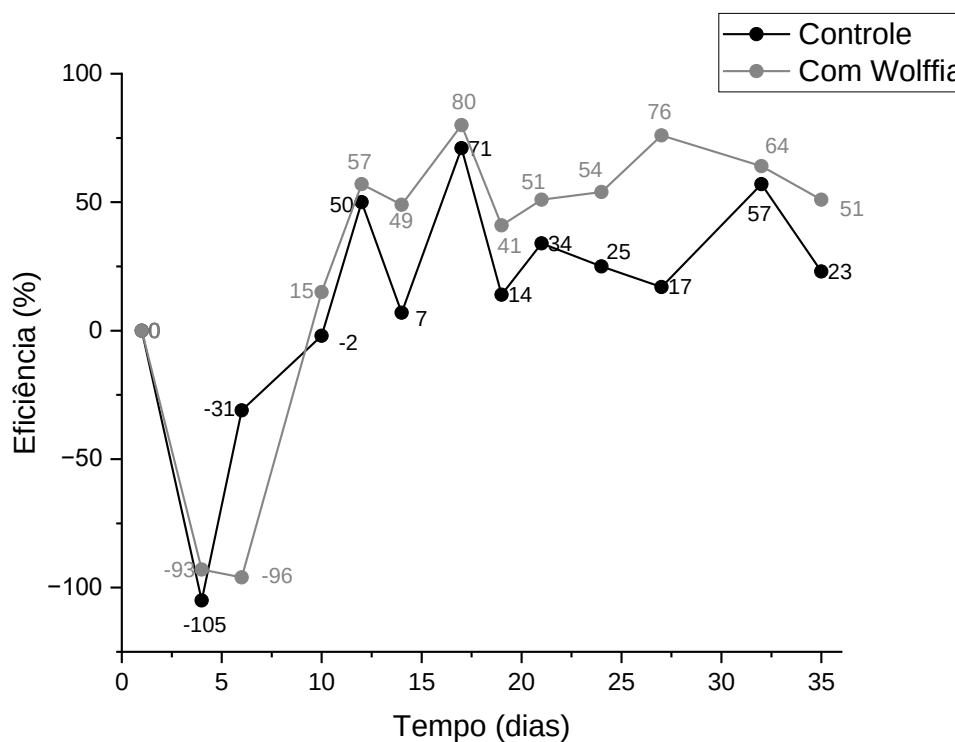
Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os dados contidos da Figura 41, observa-se uma redução considerável na DBO, cerca de 56% pela Equação 2, na caixa que contém a *Wolffia* a partir do 12º dia de experimento.

Mesmo com alterações nos valores de redução da DBO causadas por fatores externos como movimentação das caixas, diferença da temperatura externa e presença de pequenos insetos, nota-se uma possível estabilização dos valores de remoção da DBO após o 12º dia.

A Figura 42 apresenta os valores obtidos para a eficiência na remoção da DBO na caixa controle e na caixa de cultivo com a *Wolffia* para os 35 dias de experimento.

Figura 42 – Eficiência obtida na remoção da DBO durante o terceiro ciclo da primeira etapa



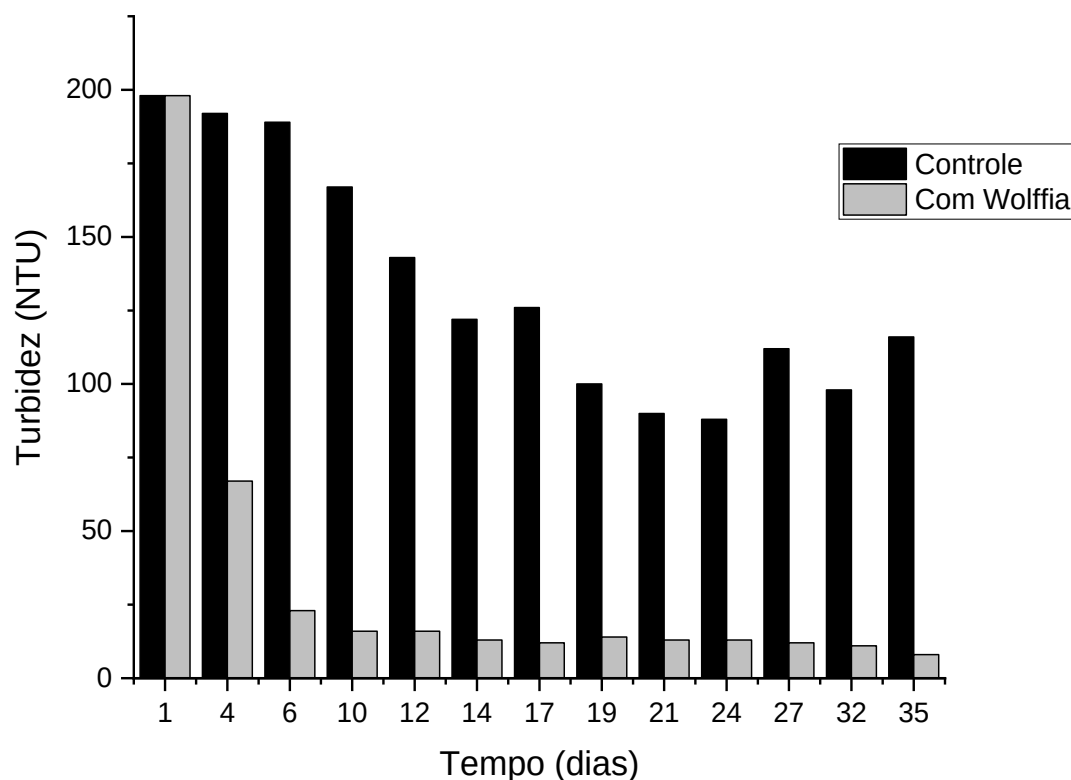
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após os 35 dias de experimento, a caixa que contém a *Wolffia* apresentou uma eficiência de polimento de cerca de 51%, enquanto a caixa controle apresenta, aproximadamente, 23% de remoção de DBO por autodepuração.

5.2.3.4. Resultado da turbidez para o terceiro ciclo do experimento inicial

A Figura 43 contém os resultados da diminuição da turbidez da caixa controle e da caixa de cultivo da *Wolffia* para o terceiro ciclo do experimento inicial.

Figura 43 – Resultado da turbidez para o terceiro ciclo do experimento inicial

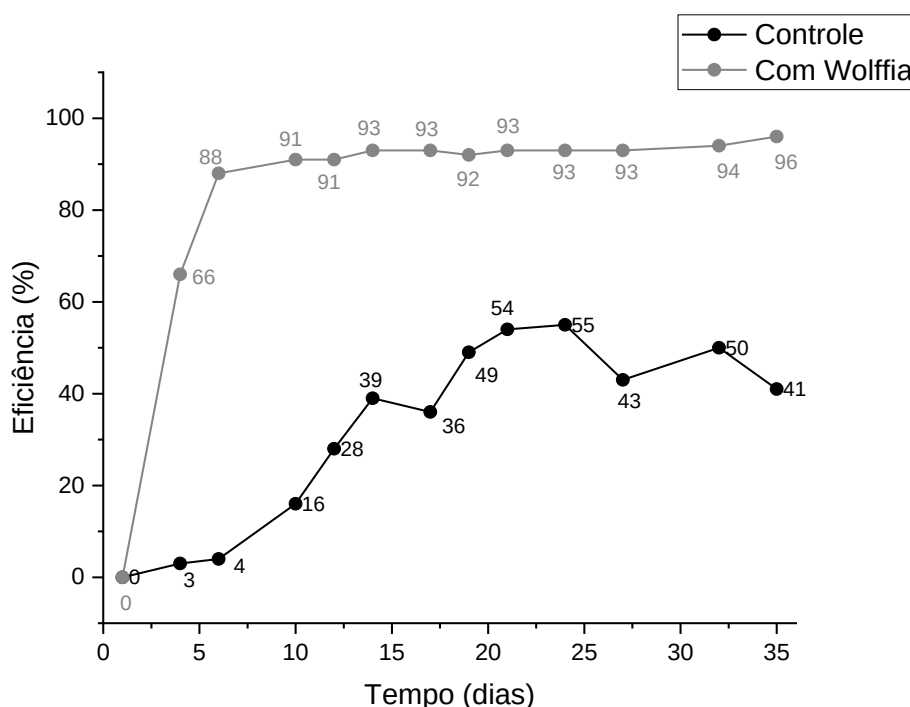


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por meio da Figura 43, na caixa que continha a macrófita, nota-se uma redução considerável, de 88% pela Equação 2, no valor da turbidez da caixa que contém a planta, a partir do sexto dia de experimento, após isso, os valores de remoção para a caixa de polimento com a planta encontram-se estáveis.

A Figura 44 apresenta, para ambas as unidades experimentais, os valores obtidos para a eficiência da remoção da turbidez durante os 35 dias de experimento.

Figura 44 – Eficiência obtida na remoção da turbidez durante o terceiro ciclo da primeira etapa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

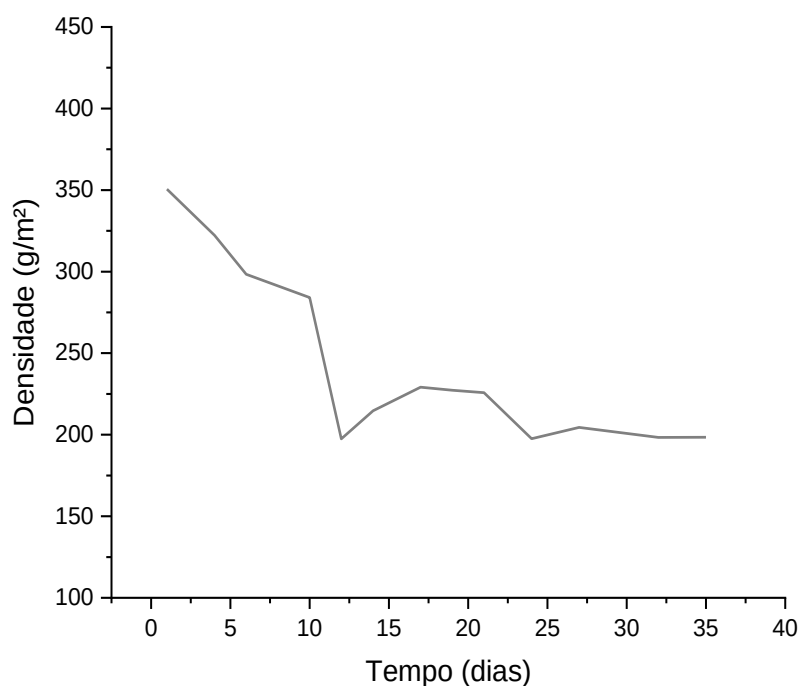
Ao final dos 35 dias do terceiro ciclo do experimento inicial, observa-se uma redução de, aproximadamente, 96% na caixa de cultivo com a *Wolffia brasiliensis* e de 41% na caixa de cultivo que contém apenas o efluente.

5.2.4. Resultados para o quarto ciclo do experimento inicial

5.2.4.1. Adensamento da *Wolffia brasiliensis*

As condições propostas para a *Wolffia* no quarto ciclo do experimental inicial foram semelhantes à do terceiro ciclo, em exceção pelas condições externas, como o clima. Diante disso, a planta apresentou desenvolvimento satisfatório, com características semelhantes a anterior, como mostra a Figura 45.

Figura 45 – Monitoramento da densidade da *Wolffia* no quarto ciclo dos experimentos iniciais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

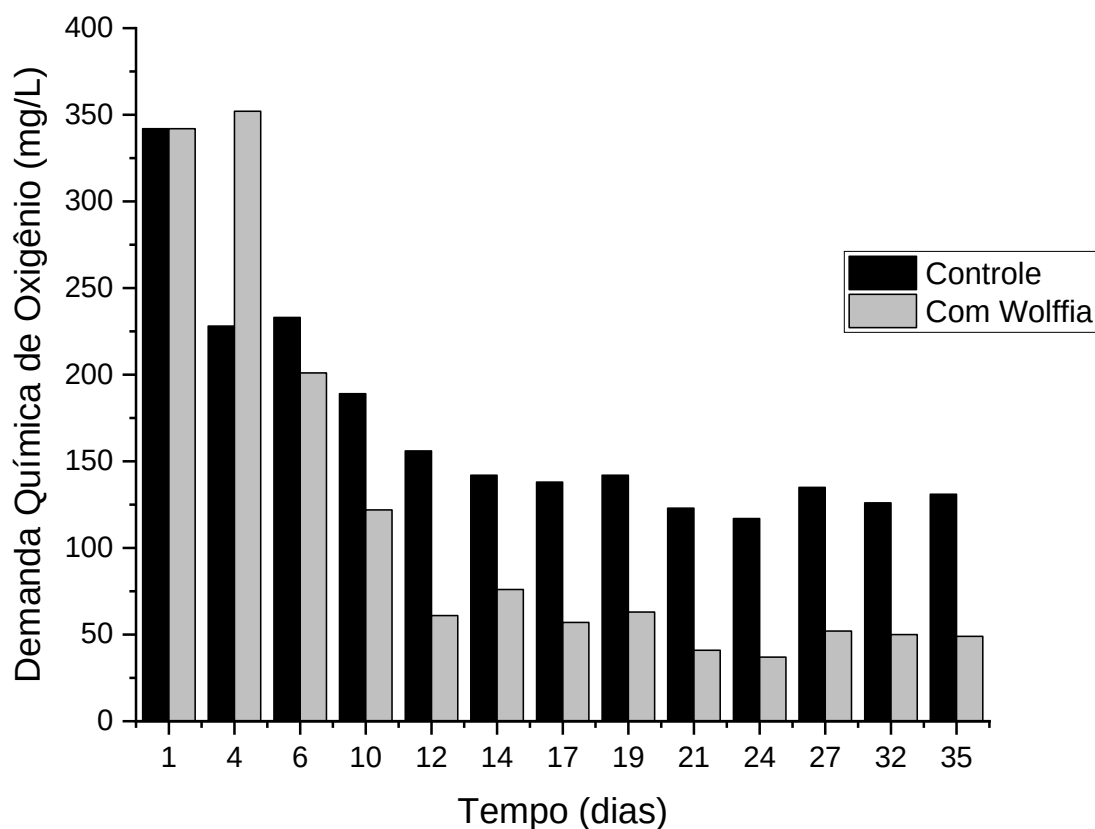
Com a análise dos dados de adensamento (Figura 45) é possível identificar uma redução da espécie no 12º dia e, posteriormente, uma possível estabilização do adensamento, mesmo com as oscilações causadas por fatores externos, tal como alteração da temperatura.

Além disso, nota-se uma estabilização da espécie no adensamento de 200g/m², confirmando os resultados apresentados no terceiro ciclo de que este seja o possivelmente o valor mais adequado para as condições e para as dimensões da caixa.

5.2.4.2. Resultados da remoção da DQO para o quarto ciclo do experimento inicial

A Figura 46 apresenta os resultados da redução de DQO para a caixa controle e para a caixa de cultivo da *Wolffia brasiliensis*.

Figura 46 – Resultados da redução da DQO para o quarto ciclo do experimento inicial.



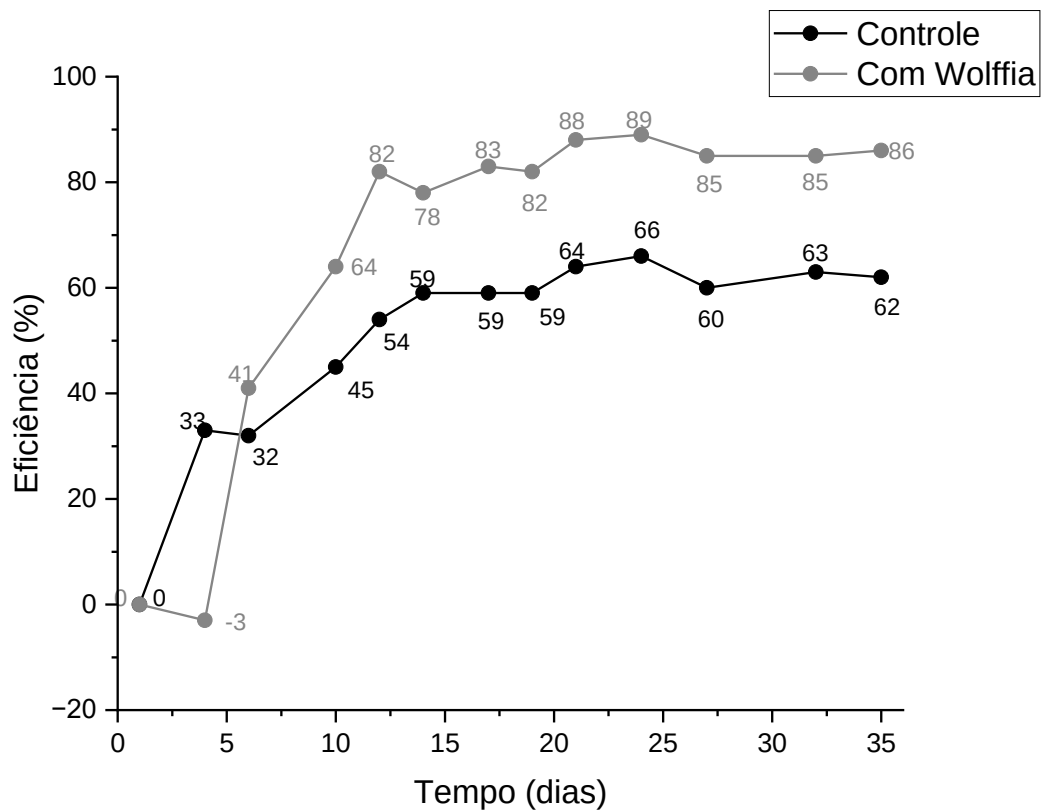
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com os dados fornecidos pela Figura 46, é possível perceber uma queda significativa na quantidade de DQO na caixa que contém a *Wolffia* a partir do 12º dia, sendo ela de 82%.

A partir do 14º dia, nota-se uma possível estabilização no valor da DQO, na caixa de polimento com a *Wolffia* e na caixa controle, com alterações causadas por fatores externos, tais como a temperatura externa e a movimentação das caixas.

A Figura 47 apresenta os valores obtidos para a eficiência da remoção de DQO para ambas as unidades experimentais utilizadas durante o quarto ciclo da primeira etapa.

Figura 47 – Eficiência obtida na remoção da DQO durante o quarto ciclo da primeira etapa



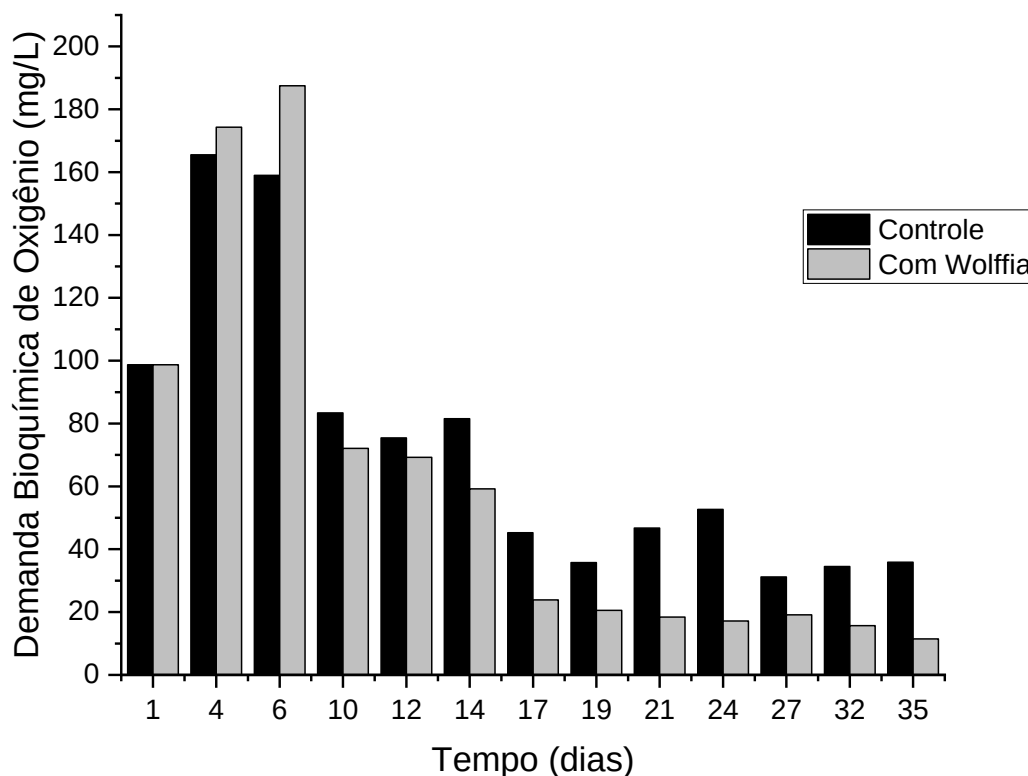
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao final do experimento, no 35º dia, observa-se uma eficiência de remoção de DQO na caixa que contém a *Wolffia* de 86%, enquanto a caixa controle apresenta 62% de redução de DQO pela autodepuração.

5.2.4.3. Resultados da remoção da DBO para o quarto ciclo do experimento inicial

A Figura 48 apresenta os valores de redução na DBO no quarto ciclo do experimento inicial, para a caixa controle e para a caixa de polimento com a *Wolffia*.

Figura 48 – Resultados da remoção de DBO no quarto ciclo do experimento inicial



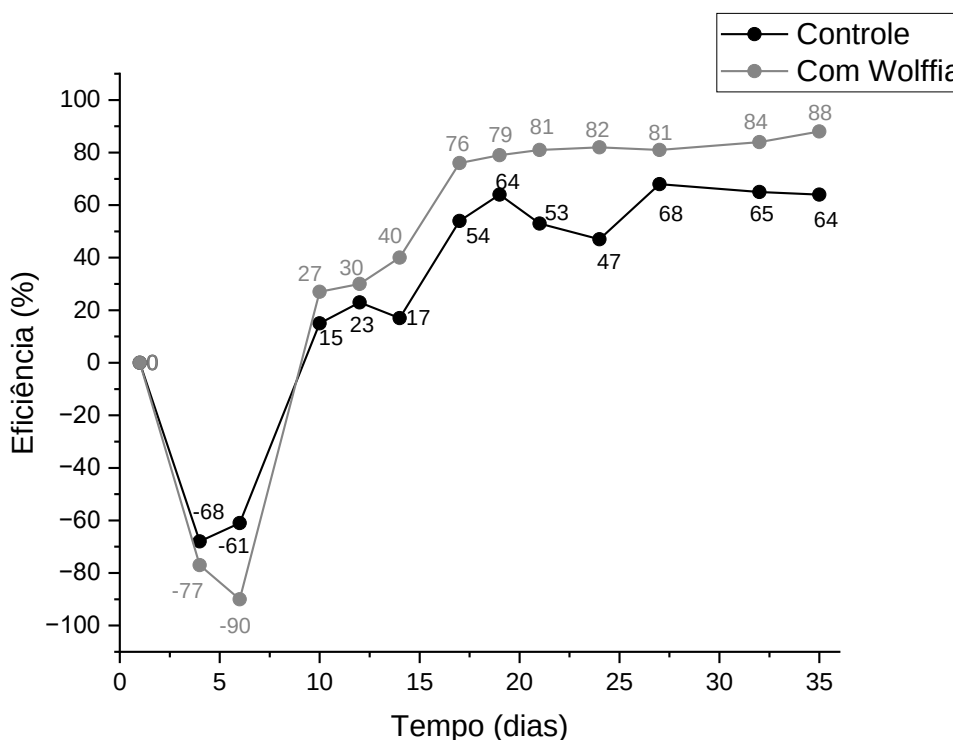
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como mostra a Figura 48, um declínio considerável na DBO da caixa que contém a *Wolffia* ocorre no 17º dia, sendo essa de, aproximadamente, 76% e, posteriormente, os valores apresentam-se estáveis.

As possíveis alterações nos valores da DBO após a estabilização podem ser causadas pela alteração da temperatura externa, pela movimentação das caixas ou pela presença de pequenos insetos.

Os valores obtidos para a eficiência da remoção da DBO durante os 35 dias do quarto ciclo da primeira etapa são apresentados na Figura 49.

Figura 49 – Eficiência obtida na remoção da DBO durante o quarto ciclo da primeira etapa



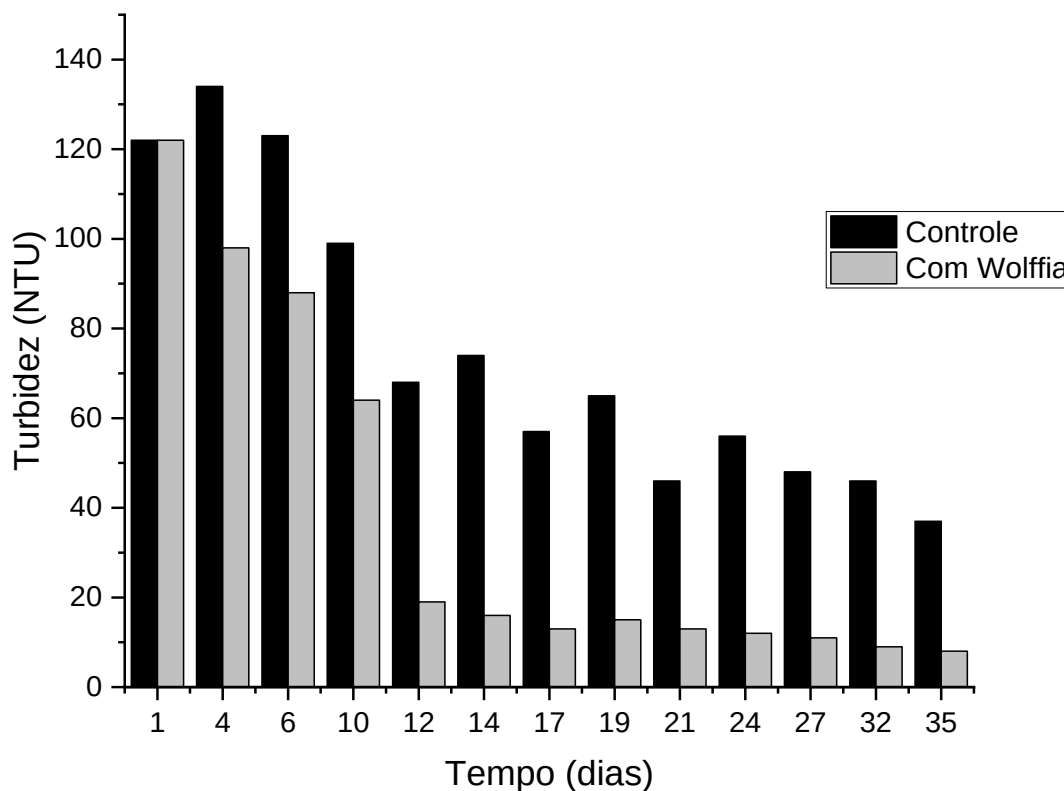
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao final do experimento, no 35º dia, nota-se uma redução de DBO de 88% na caixa de polimento com a macrófita e 64% na caixa controle, que contém apenas o efluente passando pelo processo de autodepuração.

5.2.4.4. Resultados da turbidez para o quarto ciclo dos experimentos iniciais

A Figura 50 apresenta os valores de resultados para a turbidez durante os 35 dias do quarto ciclo dos experimentos iniciais. Os valores referem-se a caixa controle, apenas com o efluente e a caixa de polimento com a *Wolffia brasiliensis*.

Figura 50 – Resultados da turbidez para o quarto ciclo dos experimentos iniciais



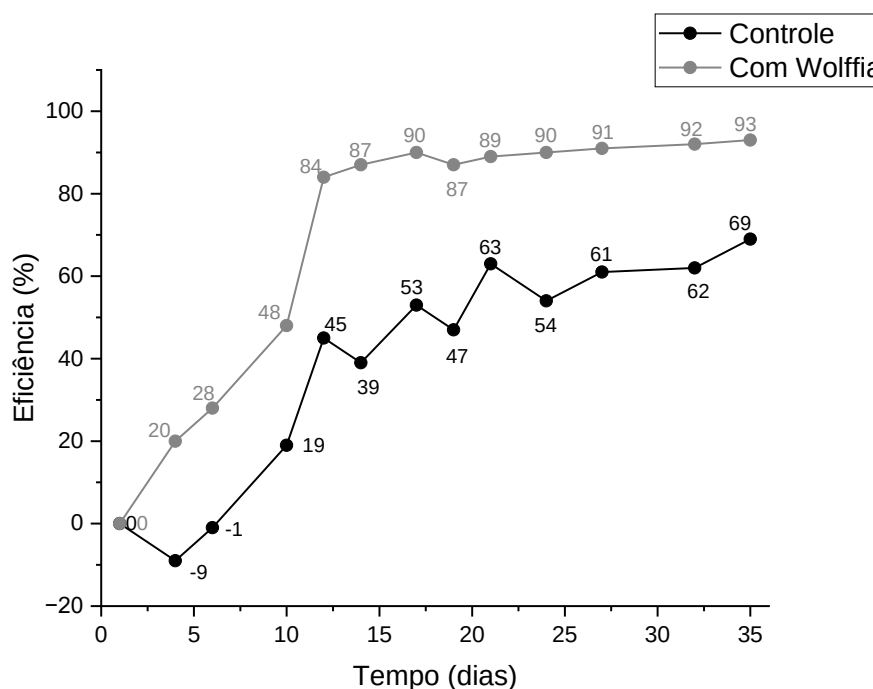
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir dos dados fornecidos pela Figura 50, nota-se uma redução notável do valor da turbidez da caixa que contém a *Wolffia brasiliensis* como forma de polimento no 12º dia do experimento, sendo ela de, aproximadamente, 84%.

Ademais, observa-se uma estabilização dos valores de redução da turbidez na caixa que contém a macrófita a partir do 12º.

Os valores observados para a eficiência de remoção de turbidez durante o quarto ciclo da primeira etapa são apresentados na Figura 51.

Figura 51 – Eficiência obtida na remoção da turbidez durante o quarto ciclo da primeira etapa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao final dos 35 dias de experimento, confirma-se uma eficiência de redução da turbidez de 93% na caixa que contém a *Wolffia* e 69% na caixa que contém apenas o efluente em processo de autodepuração.

5.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Os resultados para a segunda etapa da pesquisa apresentam-se de forma estratificada para o parâmetro de DQO em cada reposição semanal de efluente, de forma que seja possível analisar a interferência e a influência do efluente novo.

A discussão da segunda etapa compreende os resultados para:

- CI: a caixa para controle da autodepuração interna;
- CW: a caixa interna que contém a *Wolffia*, o efluente concentrado e não possui bomba de recirculação;
- ED: a caixa interna que contém a *Wolffia* utilizando efluente diluído e não possui bomba de recirculação;
- CR: a caixa interna que contém a *Wolffia*, a bomba de recirculação e o efluente concentrado;

- CE: a caixa controle localizada na parte externa ao laboratório;
- PE: a caixa externa que possui a *Wolffia*, efluente concentrado e não possui bomba de recirculação.

5.3.1. Temperatura ambiente

Os valores observados para as temperaturas internas e externas de ambos os ciclos da segunda etapa, assim como suas respectivas médias e desvios padrões, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Temperatura interna e externa para ambos os ciclos da segunda etapa.

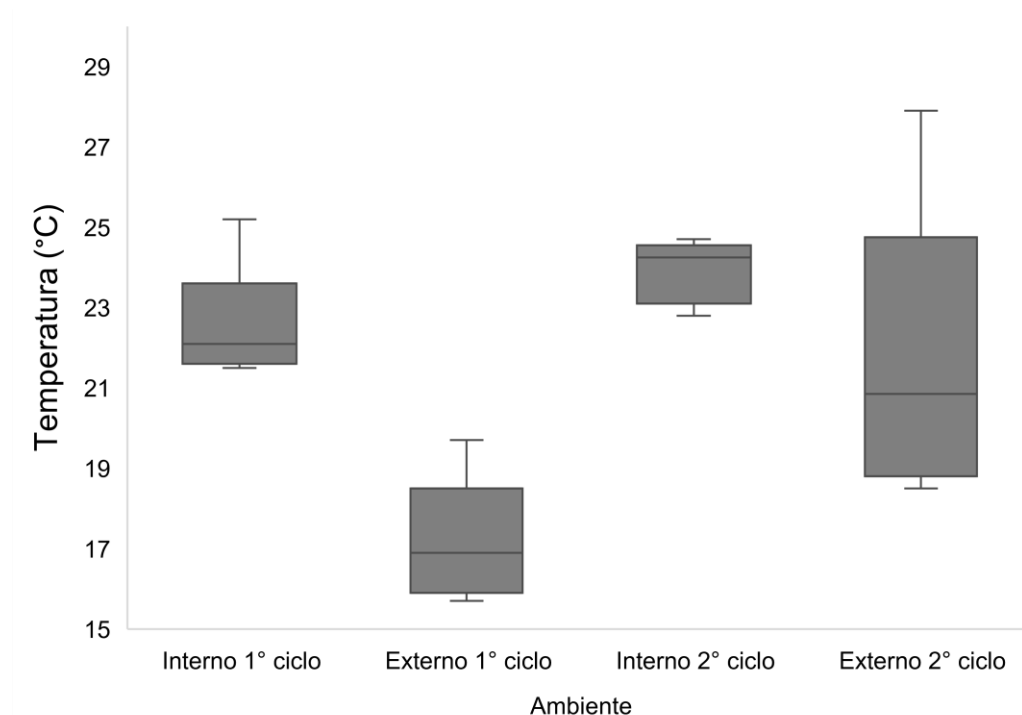
Ambiente		Temperatura (°C)					
		Máxima	Média	Desv. P.	Mínima	Média	Desv. P.
1º ciclo	Interno	30,5	28,9	±0,71	14,0	14,21	±0,57
	Externo	26,7	24,6	±1,57	10,8	12,7	±1,78
2º ciclo	Interno	30,7	30,0	±1,08	14,0	15,0	±0,77
	Externo	34,8	31,0	±4,24	11,7	14,6	±1,87

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em ambos os ciclos, nota-se uma temperatura menor na parte externa ao laboratório.

A Figura 52 apresenta, em resumo, os resultados das temperaturas médias obtidas internamente e externamente, para os dois ciclos da segunda etapa. Todas as temperaturas médias foram aferidas em horários iguais, sendo ele, por volta das 9:00 a.m.

Figura 52 – Resultado das temperaturas médias internas e externas para os dois ciclos da segunda etapa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

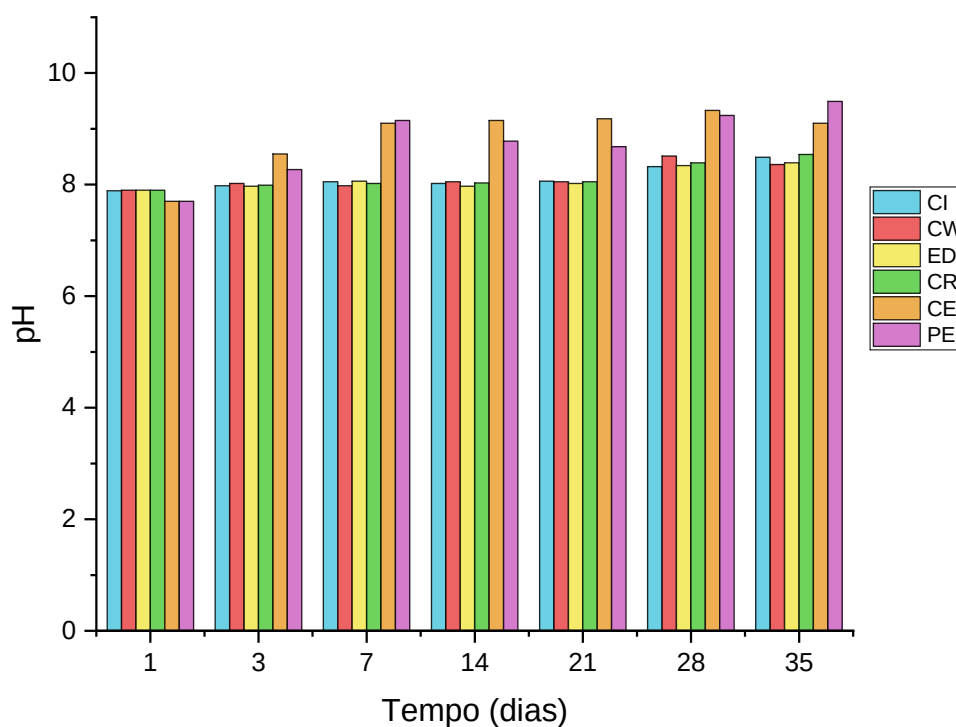
Durante o primeiro ciclo, as caixas internas ao laboratório apresentam uma média de aproximadamente 23°C durante os 35 dias e as caixas localizadas na parte externa apresentam média de aproximadamente 17°C. No decorrer do segundo ciclo, a temperatura interna apresenta média de 24°C durante os 35 dias de experimento e a temperatura externa apresenta média de 22°C.

Além disso, conclui-se que o primeiro ciclo apresentou temperaturas externas consideravelmente mais baixas que o segundo ciclo. Entretanto, a temperatura interna mostrou comportamento semelhante em ambos os ciclos, mesmo com oscilações.

5.3.2. PH

As Figuras 53 mostra o resultado do pH para as quatro caixas internas do laboratório e para as duas caixas externas ao laboratório, para o primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 53 – Resultado do pH para o primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

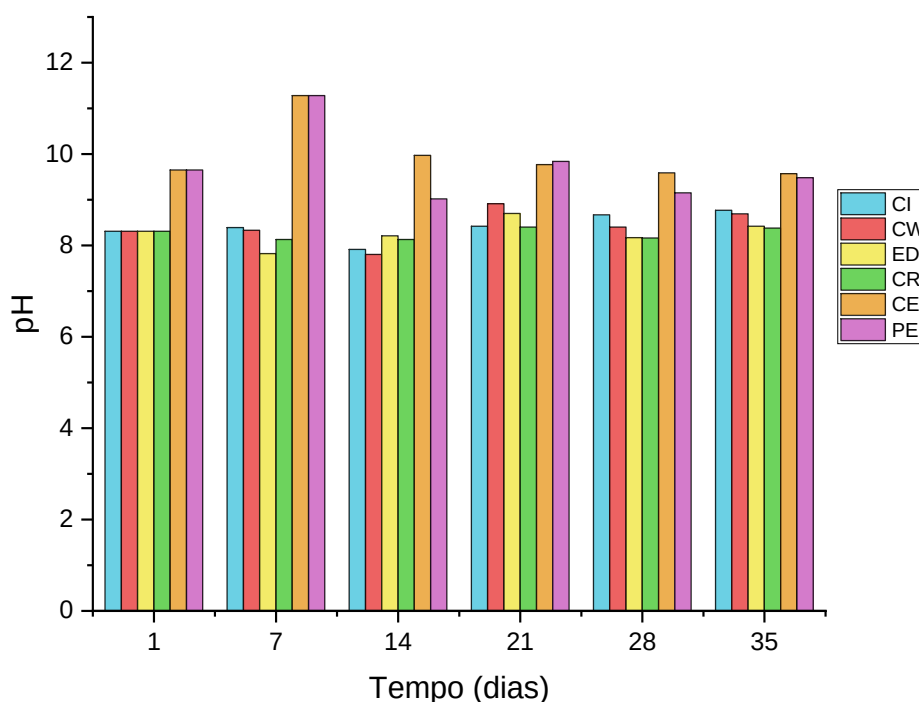
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 54 apresenta os resultados do pH para todas as unidades experimentais do segundo ciclo da segunda etapa durante os 35 dias de experimento.

Figura 54 - Resultado do pH para o segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a análise das Figura 53 e 54, observam-se valores semelhantes de pH entre as caixas internas, diferindo-se dos valores obtidos para as caixas externas, que se apresentam semelhantes entre si, para ambos os ciclos da segunda etapa.

Além disso, nota-se uma elevação considerável do pH nas caixas externas, comportamento semelhante em ambos os ciclos, o que pode ser causado pelo aumento da quantidade de algas.

Nota-se um pH maior em todas as caixas internas durante o segundo ciclo da segunda etapa, quando em comparação com o primeiro. De acordo com Von Sperling (2002), na incidência da luz, as algas realizam a fotossíntese, elevando o pH e, na ausência da luz, realizam a respiração, diminuindo o pH. Diante disso, tendo em vista que o pH era aferido nas primeiras horas da manhã, acredita-se que essa elevação no segundo ciclo ocorra devido a maior incidência de luz, uma vez que, durante o segundo ciclo, a lâmpada contida no sistema ficava ligada durante o período noturno, enquanto, no primeiro ciclo, a lâmpada permanecia acesa durante o dia.

Observa-se também um valor elevado do pH nas caixas externas para o segundo ciclo, quando em comparação ao primeiro ciclo, possivelmente causado pela temperatura maior registrada no decorrer do segundo ciclo, como mostra a Figura 52.

Ademais, os resultados registrados apresentaram oscilações causadas pela reposição semanal de efluente. A quantidade necessária para cada unidade experimental apresenta-se na Tabela 7, para o primeiro ciclo e na Tabela 8 para o segundo ciclo. Além disso, os respectivos valores de pH para cada reposição do primeiro ciclo são mostrados na Tabela 9 e, para o segundo ciclo, na Tabela 10.

Tabela 7 – Quantidades de reposição de efluente semanal para o primeiro ciclo

Caixas de cultivo	Quantidade de efluente (mL)			
	7° dia	14° dia	21° dia	28° dia
CI	750	500	500	500
CW	550	600	600	600
ED	800	600	500	700
CR	700	600	700	600
CE	1200	1000	1200	1600
PE	1000	1000	1000	1600

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8 – Quantidades de reposição de efluente semanal para o segundo ciclo

Caixas de cultivo	Quantidade de efluente (mL)			
	7° dia	14° dia	21° dia	28° dia
CI	800	900	600	1000
CW	1000	900	500	800
ED	1400	800	650	700
CR	1000	1200	800	700
CE	1400	1400	1500	2000
PE	1400	1900	1400	1900

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9 – Resultados do pH para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	pH
Primeira reposição (7° dia)	7,69
Segunda reposição (14° dia)	7,90
Terceira reposição (21° dia)	7,62
Quarta reposição (28° dia)	7,72

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10 – Resultados do pH para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo

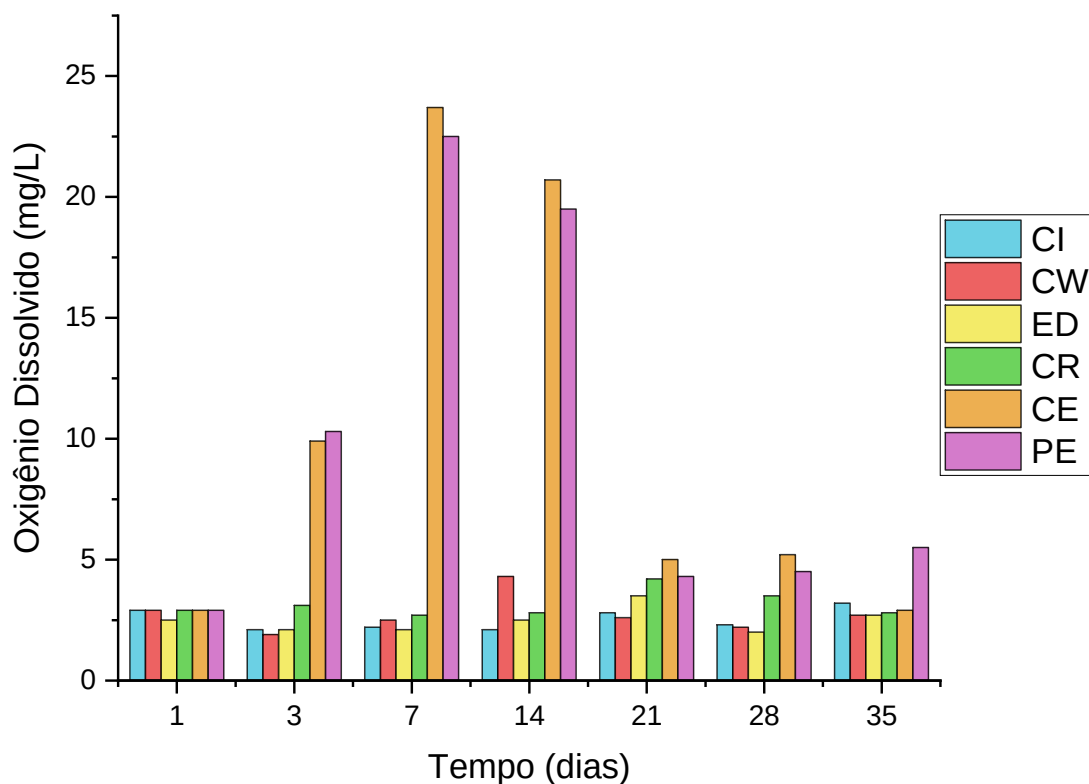
Reposições	pH
Primeira reposição (7° dia)	7,62
Segunda reposição (14° dia)	7,65
Terceira reposição (21° dia)	7,35
Quarta reposição (28° dia)	7,22

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.3. Oxigênio Dissolvido

A Figura 55 apresenta os valores de OD para as seis caixas utilizadas como pesquisa no primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 55 – Resultados de OD para o primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

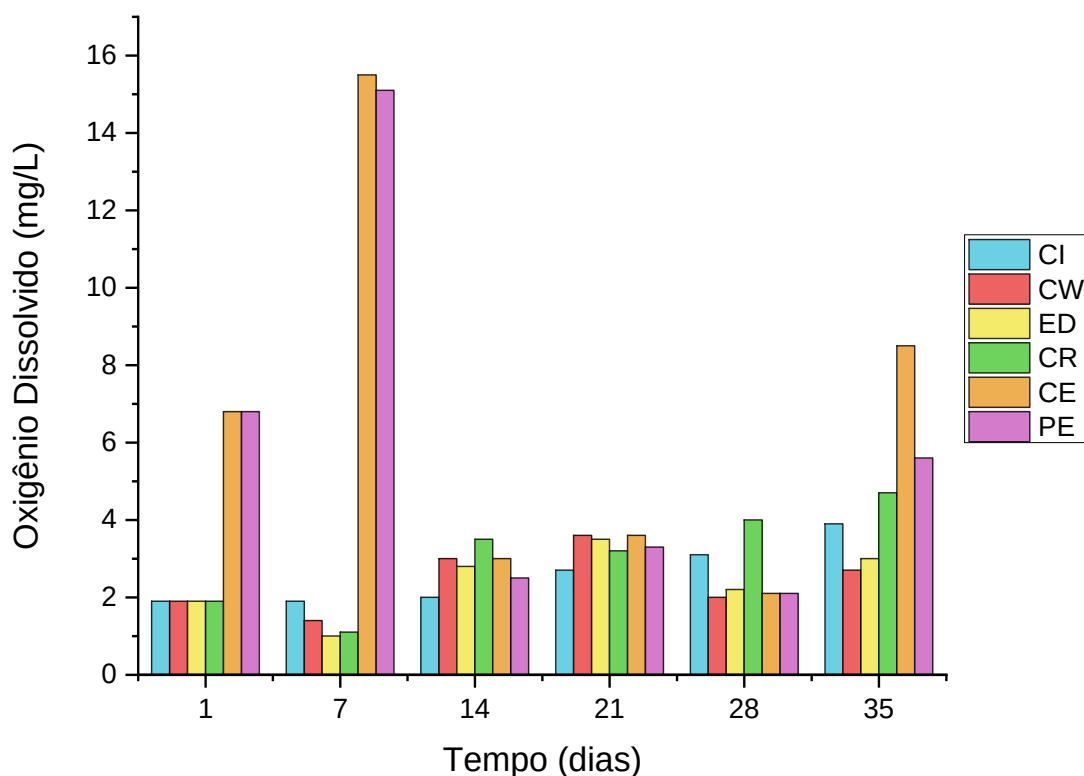
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 56 apresenta os resultados do OD para as seis unidades experimentais do segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 56 - Resultados de OD para o segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;	CR: caixa interna com recirculação;
CW: caixa interna contendo apenas <i>Wolffia</i> ;	CE: controle externo;
ED: caixa interna com efluente diluído;	PE: caixa externa com a <i>Wolffia</i> .

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em ambos os ciclos, observa-se um elevado valor de OD nas caixas externas, possivelmente causado pela presença maior de algas nestas caixas, uma vez que foram sujeitas diretamente a luz do sol, contribuindo para a proliferação das mesmas. De acordo Abdel-Razik (1991), as algas podem produzir cerca de 15 vezes mais oxigênio do que consomem.

Além disso, os valores são diretamente influenciados pela reposição semanal de efluente, em ambos os ciclos. Os valores analisados para o OD dos efluentes de reposição para o primeiro ciclo apresentam-se na Tabela 11 e, para o segundo ciclo, na Tabela 12. As quantidades utilizadas para as reposições estão nas Tabelas 7 e 8 respectivamente para o ciclo um e ciclo dois.

Tabela 11 – Resultados do Oxigênio Dissolvido para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	OD (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	2,9
Segunda reposição (14° dia)	3,0
Terceira reposição (21° dia)	2,4
Quarta reposição (28° dia)	1,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 12 – Resultados do Oxigênio Dissolvido para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.

Reposições	OD (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	1,9
Segunda reposição (14° dia)	1,2
Terceira reposição (21° dia)	1,5
Quarta reposição (28° dia)	2,2

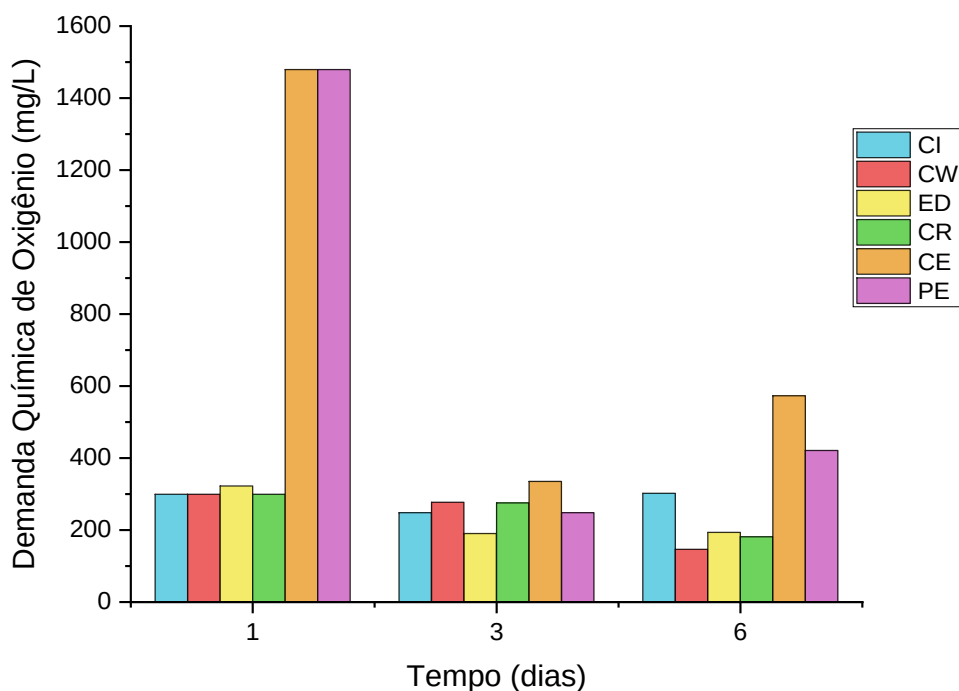
Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.4. DQO

5.3.4.1. *Resultados da DQO para o primeiro ciclo*

A Figura 57 apresenta os resultados da demanda química de oxigênio para os seis primeiros dias de experimento do primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 57 – Resultados da DQO para os seis primeiros dias do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No sétimo dia de experimento, fez-se a reposição do efluente que evaporou das caixas de pesquisa. O efluente de reposição possui DQO de 351 mg/L, as quantidades de reposição e os respectivos valores esperados de DQO utilizando a Equação 1 e a DQO analisada para as caixas apresentam-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.

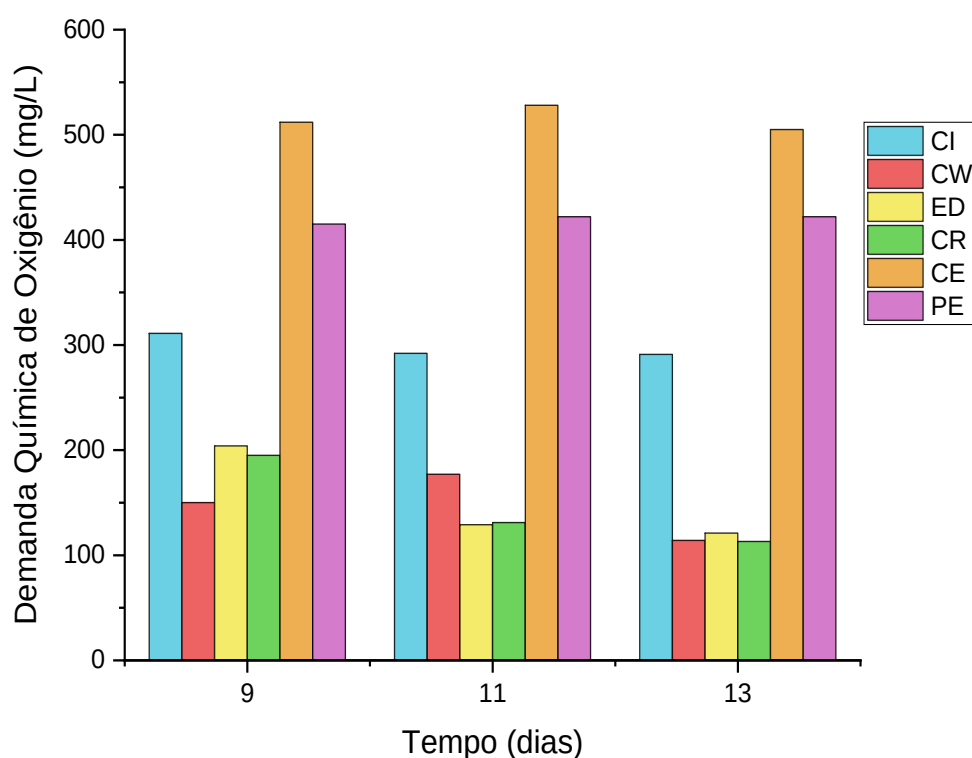
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	750	306	311
CW	550	157	150
ED	800	205	204
CR	700	193	195
CE	1200	546	512
PE	1000	414	415

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se uma diferença entre os valores de DQO esperadas e analisadas, o que pode ser causado pela alteração no clima, horário de coleta da amostra, movimentação das caixas no momento de reposição e, até mesmo, presença de insetos.

A Figura 58 apresenta os valores da demanda química de oxigênio do 9º dia de experimento até o 13º dia, de forma que constem os valores posteriores a primeira reposição de efluente e anteriores a segunda.

Figura 58 - Resultados da DQO do 9º ao 13º dia do primeiro ciclo da segunda etapa.



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No 14º dia de experimento, fez-se a reposição do efluente evaporado, a DQO do efluente novo é de 348 mg/L. A Tabela 14 contém as quantidades necessárias de reposição para cada caixa, a DQO esperada, calculada com a Equação 1, e a DQO analisada após a reposição.

Tabela 14 - Quantidade de efluente reposto, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

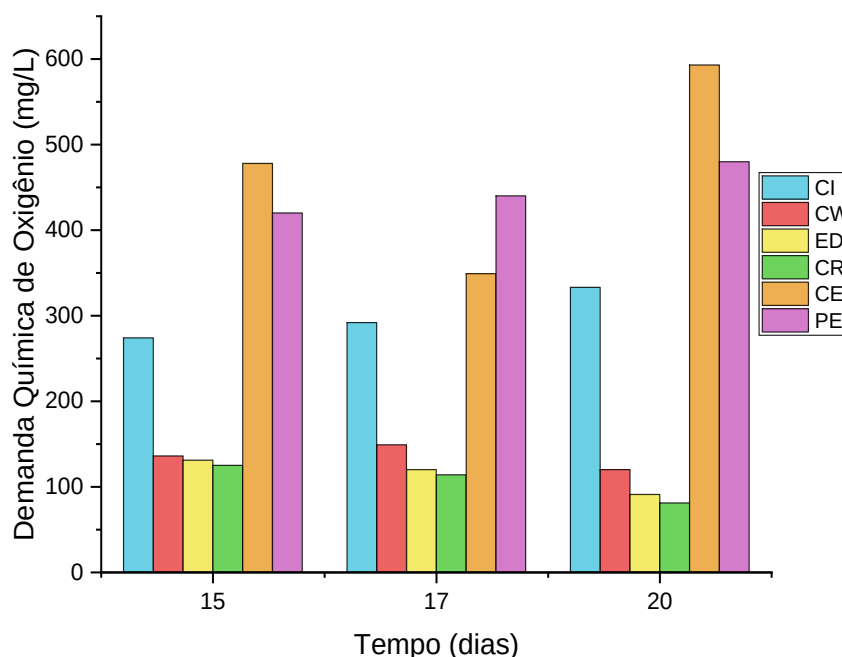
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	500	293	274
CW	600	128	136
ED	600	134	131
CR	600	127	125
CE	1000	489	478
PE	1000	415	420

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Tabela 14, observa-se uma disparidade maior entre os valores da DQO esperada e analisada, o que pode ser causado pelo horário da coleta da amostra, tendo em vista que a análise foi realizada no dia posterior à reposição. Diante disso, a DQO analisada pode ter sido influenciada pela temperatura, pelo processo de polimento e autodepuração.

A Figura 59 mostra os resultados da remoção de DQO do 15º ao 20º dia, abrangendo os valores de DQO posteriores a segunda reposição de efluente e anteriores a terceira.

Figura 59 - Resultados da DQO do 15° ao 20° dia do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno; CR: caixa interna com recirculação;
 CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*; CE: controle externo;
 ED: caixa interna com efluente diluído; PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No 21° dia, fez-se a terceira reposição de efluente do primeiro ciclo. O efluente de reposição apresenta DQO de 214mg/L.

A Tabela 15 apresenta, respectivamente, as quantidades de reposição para cada caixa, os valores de DQO esperados pela Equação 1 e os valores de DQO analisados.

Tabela 15 - Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada.

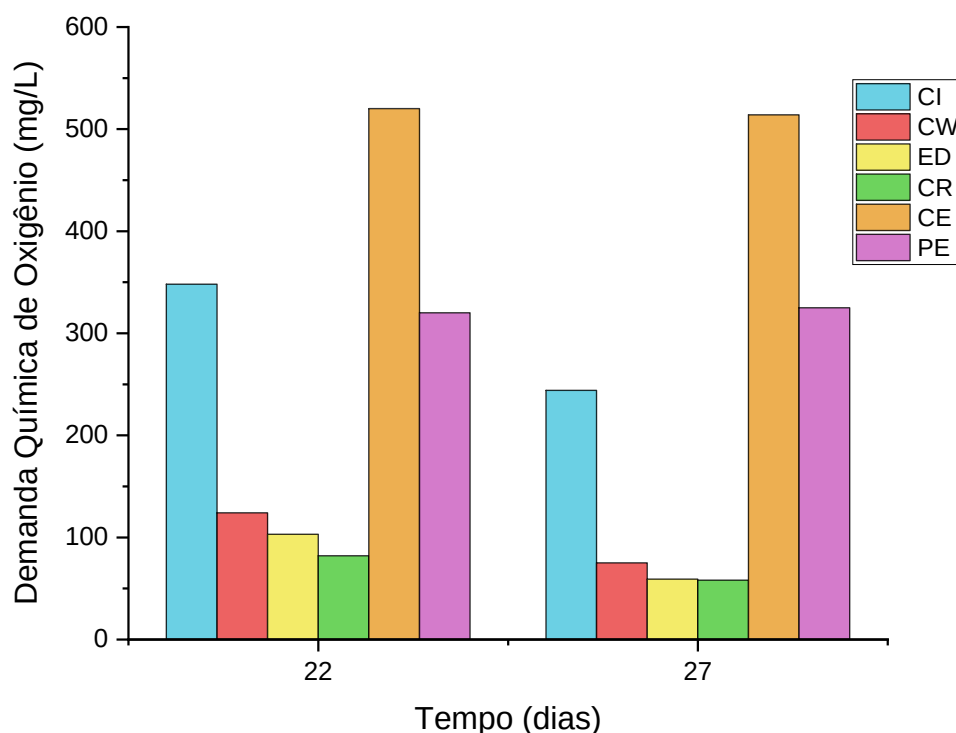
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	500	327	348
CW	600	125	124
ED	500	97	103
CR	700	90	82
CE	1200	547	520
PE	1000	336	320

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante da análise da Tabela 15, nota-se um comportamento semelhante as reposições anteriores, pequenas alterações entre os valores de DQO esperada e analisada, possivelmente influenciada pelos mesmos fatores.

A Figura 60 apresenta os resultados posteriores a terceira reposição de efluente e anteriores a última, abrangendo as análises do 22º ao 27º do primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 60 - Resultados da DQO do 22º ao 27º dia do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No 28º dia de experimento, realiza-se a última reposição do efluente para o primeiro ciclo. O efluente de reposição possui DQO de 354mg/L.

A Tabela 16 apresenta os resultados para as quantidades necessárias de reposição por caixa, a DQO esperada pela Equação 1 e a DQO analisada no 29º dia de experimento, dia posterior a reposição.

Tabela 16 - Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

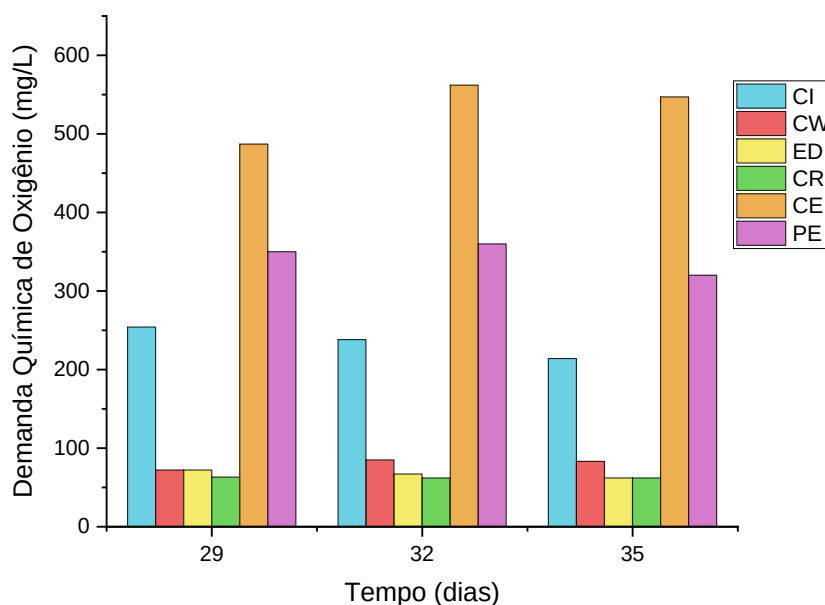
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	500	249	254
CW	600	91	72
ED	700	79	72
CR	600	75	63
CE	1600	488	487
PE	1600	330	350

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode-se observar com os dados fornecidos pela Tabela 16, que as alterações entre os valores da DQO esperada e analisada se mantém, uma vez que a coleta de amostras foi realizada um dia após a reposição, além da coleta das amostras em diferentes horários e da possível influência da temperatura.

A Figura 61 apresenta os resultados do 29° ao 35° dia de experimento, últimos dias de análise para o primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 61 - Resultados da DQO do 29° ao 35° dia do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

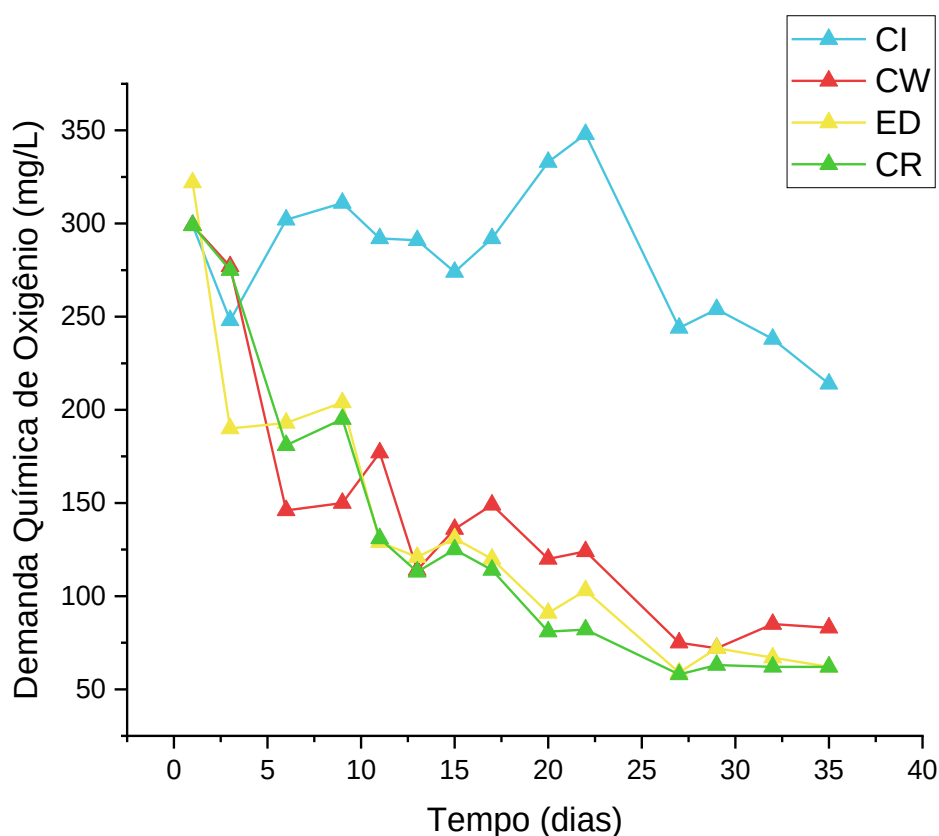
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 62 apresenta os resultados de remoção de DQO das caixas internas ao laboratório durante os 35 dias de experimento do primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 62 – Comportamento das caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

CR: caixa interna com recirculação.

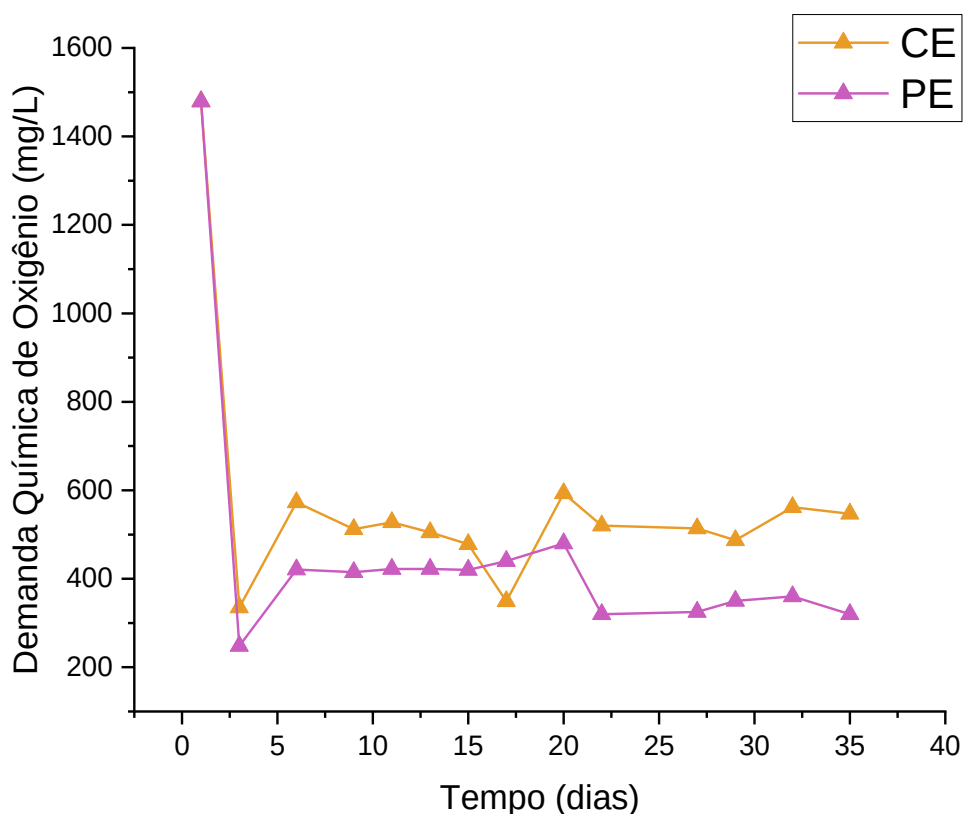
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como mostra a Figura 62, é possível perceber um comportamento semelhante entre as três caixas internas que contém a *Wolffia*, com maior eficiência de remoção da DQO que a caixa controle. Além disso, nota-se uma eficiência ainda maior nas caixas que contém efluente diluído (ED) e bomba de recirculação (CR), quando em comparação com a caixa sem recirculação e com efluente concentrado (CW).

A Figura 63 apresenta os resultados de remoção de DQO das caixas externas ao laboratório durante os 35 dias de experimento do primeiro ciclo da segunda etapa. Observa-se uma maior eficiência, também, na caixa que contém o polimento

com a *Wolffia* quando em comparação com a caixa controle, entretanto, apresenta maior capacidade de autodepuração do efluente.

Figura 63 - Comportamento das caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO

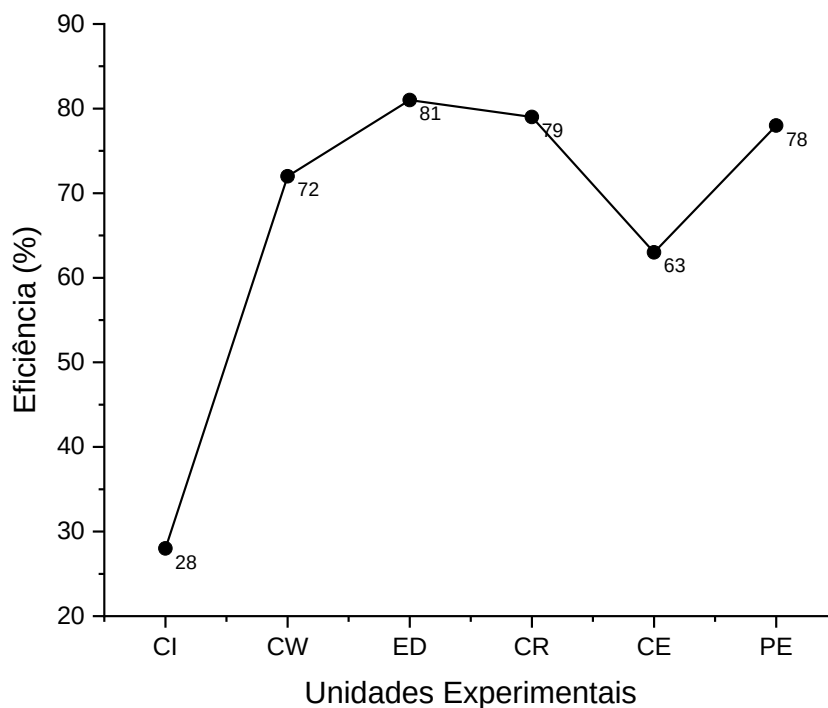


CE: controle externo;
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As eficiências de remoção para a DQO observadas após os 35 dias de experimento, para o primeiro ciclo da segunda etapa, são apresentadas na Figura 64. Nota-se um maior valor da redução da DQO em todas as caixas que contém a *Wolffia brasiliensis* quando em comparação com as caixas controles, em ambos os ambientes.

Figura 64 – Eficiências obtidas para remoção da DQO no primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

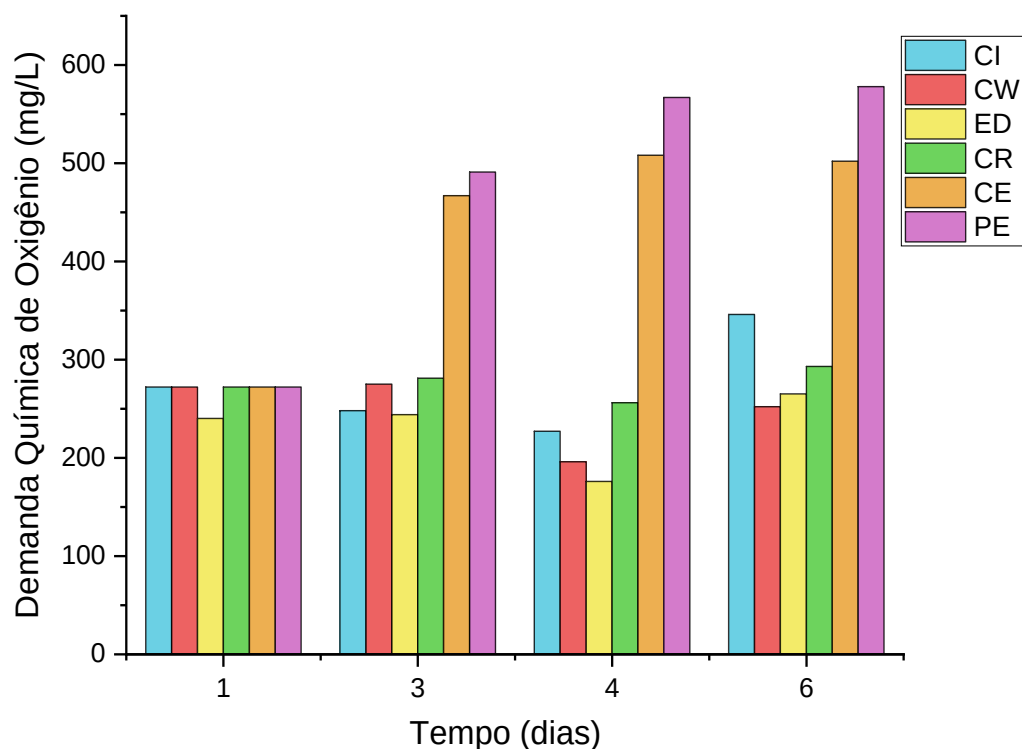
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.4.2. Resultados da DQO para o segundo ciclo

A Figura 65 apresenta os resultados da DQO dos seis dias iniciais do segundo ciclo da segunda etapa, para todas as unidades experimentais.

Figura 65 – Resultados DQO para os seis dias iniciais do segundo ciclo



CI: controle interno; CR: caixa interna com recirculação;
 CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*; CE: controle externo;
 ED: caixa interna com efluente diluído; PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No sétimo dia de experimento, realizou-se a reposição semanal do efluente. O efluente utilizado para a reposição possui DQO de 324 mg/L, as quantidades de reposição e os respectivos valores esperados de DQO utilizando a Equação 1 e a DQO analisada para as caixas apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

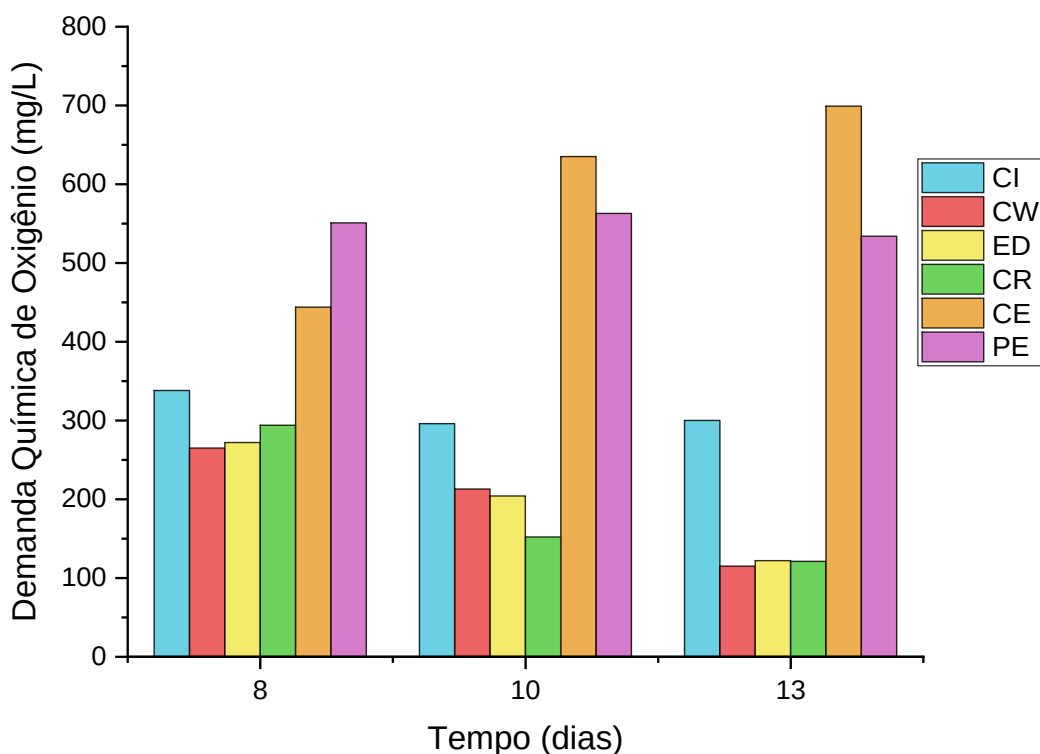
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	800	344	338
CW	1000	260	265
ED	1400	273	272
CR	1000	296	294
CE	1400	477	444
PE	1400	542	551

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante disso, notam-se alterações entre os valores esperados pelo cálculo e os valores analisados, possivelmente causadas pela movimentação das caixas no momento da reposição.

A Figura 66 apresenta os resultados para a DQO do oitavo ao 13° dia de experimento.

Figura 66 – Resultados para da DQO do 8° ao 13° dia do segundo ciclo



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No 14° dia de experimento, realizou-se a reposição do efluente que havia evaporado das unidades experimentais. A DQO do efluente utilizado na reposição é de 492 mg/L, as quantidades necessárias, a DQO esperada pela Equação 1 e a DQO analisada no 15° dia encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

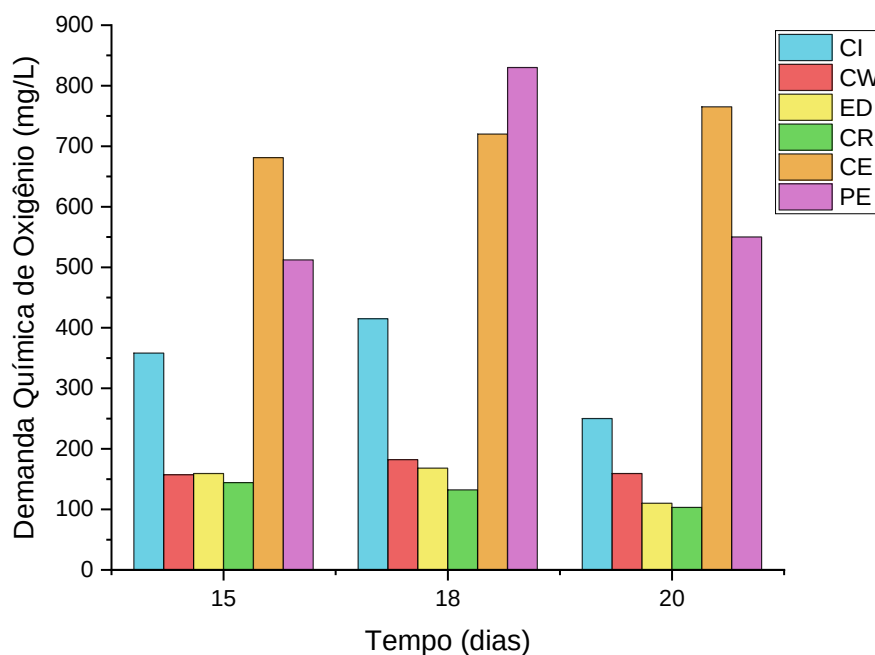
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	900	317	358
CW	900	149	157
ED	800	152	159
CR	1200	165	144
CE	1400	670	681
PE	1900	526	512

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao fim da reposição, nota-se uma alteração entre o valor esperado da DQO e o valor analisado, possivelmente causado por fatores externos, como elevação de sólidos no momento da reposição, presença de insetos e movimentação da caixa.

A Figura 67 apresenta os valores de DQO analisados para todas as unidades experimentais do segundo ciclo, do 15° ao 20° dia.

Figura 67 - Resultados para da DQO do 15° ao 20° dia do segundo ciclo.



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Posteriormente, no 21º dia de experimento, realizou novamente a reposição do efluente que evapora das unidades experimentais. A DQO analisada para o efluente utilizado na reposição é de 370 mg/L. As quantidades necessárias para cada caixa, a DQO calculada pela Equação 1 e a DQO analisada no 22º dia apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19 – Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

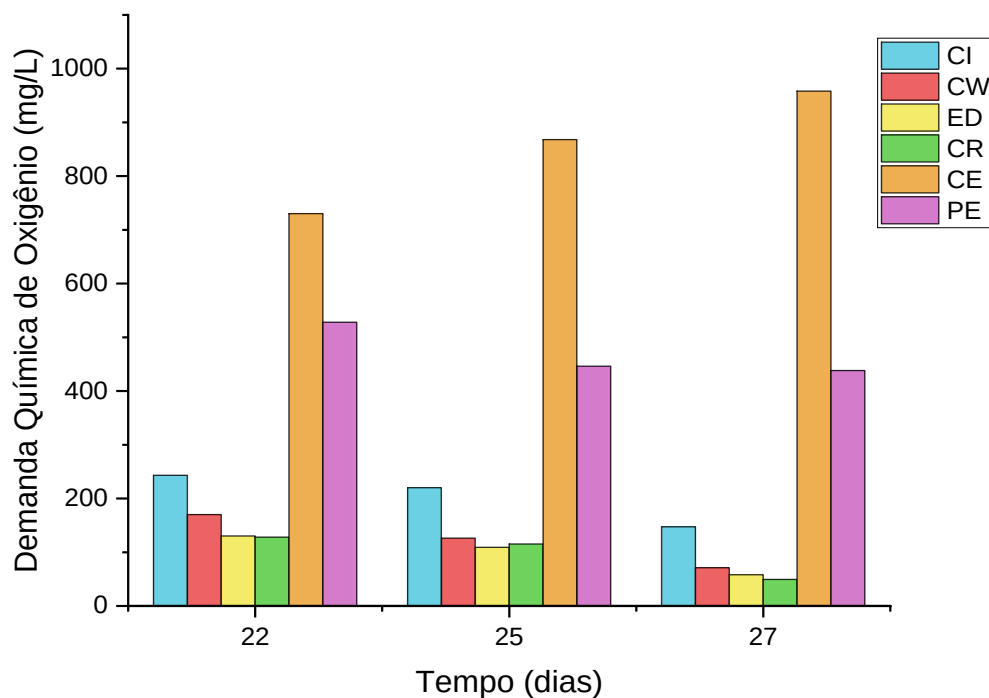
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	600	257	243
CW	500	170	170
ED	650	127	130
CR	800	125	128
CE	1500	706	730
PE	1400	525	528

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observam-se alterações entre os valores de DQO esperados e analisados, causados, possivelmente, pela análise no dia posterior a reposição, pela movimentação do efluente no momento de reposição e pela presença de fatores externos, como presença de insetos nas unidades experimentais.

A Figura 68 apresenta os valores de DQO analisados do 22º dia ao 27º dia.

Figura 68 - Resultados para da DQO do 22° ao 27° dia do segundo ciclo



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No 28° dia de experimento, realizou a última reposição de efluente do segundo ciclo. As quantidades necessárias para cada unidade experimental, a DQO calculada pela Equação 1 e a DQO analisada no 29° estão representadas na Tabela 20. O efluente utilizado na reposição possui DQO de 302 mg/L.

Tabela 20 – Quantidade de efluente repostado, DQO esperada nas caixas após reposição e DQO analisada

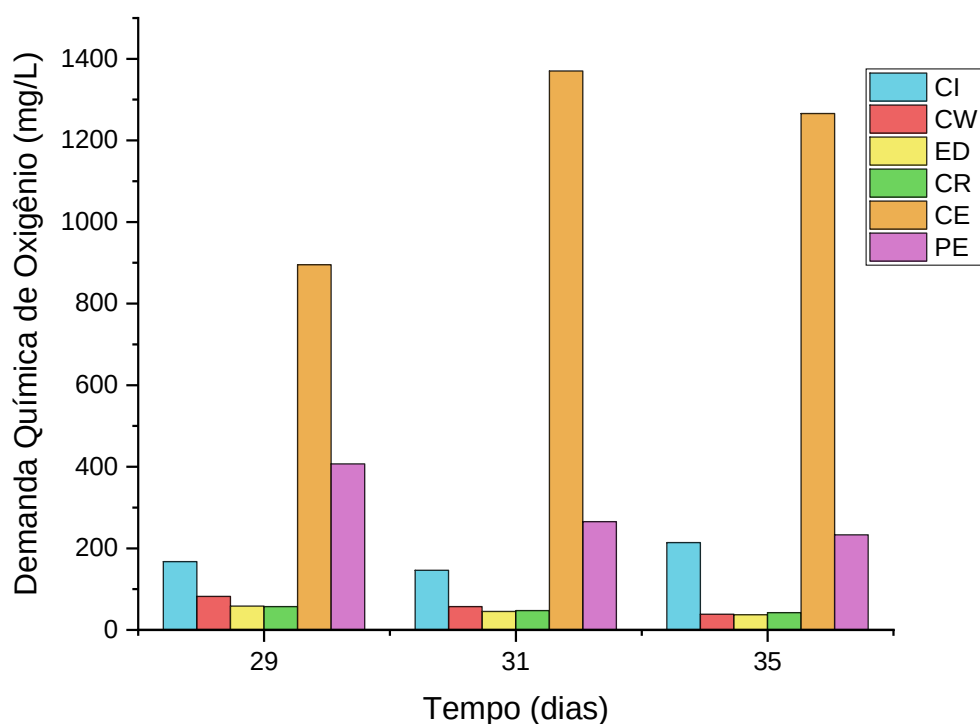
Caixas	Quantidade de reposição (mL)	DQO esperada (mg/L)	DQO analisada (mg/L)
CI	1000	162	167
CW	800	89	82
ED	700	67	58
CR	700	66	57
CE	2000	826	895
PE	1900	412	407

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como nas reposições anteriores, notam-se alterações entre os valores calculados e os valores analisados. Esta situação pode ser causada pelos fatores citados anteriormente, como movimentação das caixas, análise no dia anterior a reposição e presença de fatores de influência externos.

A Figura 69 apresenta os resultados da demanda química de oxigênio do 29° ao 35° dia de experimento.

Figura 69 - Resultados para da DQO do 29° ao 35° dia do segundo ciclo



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

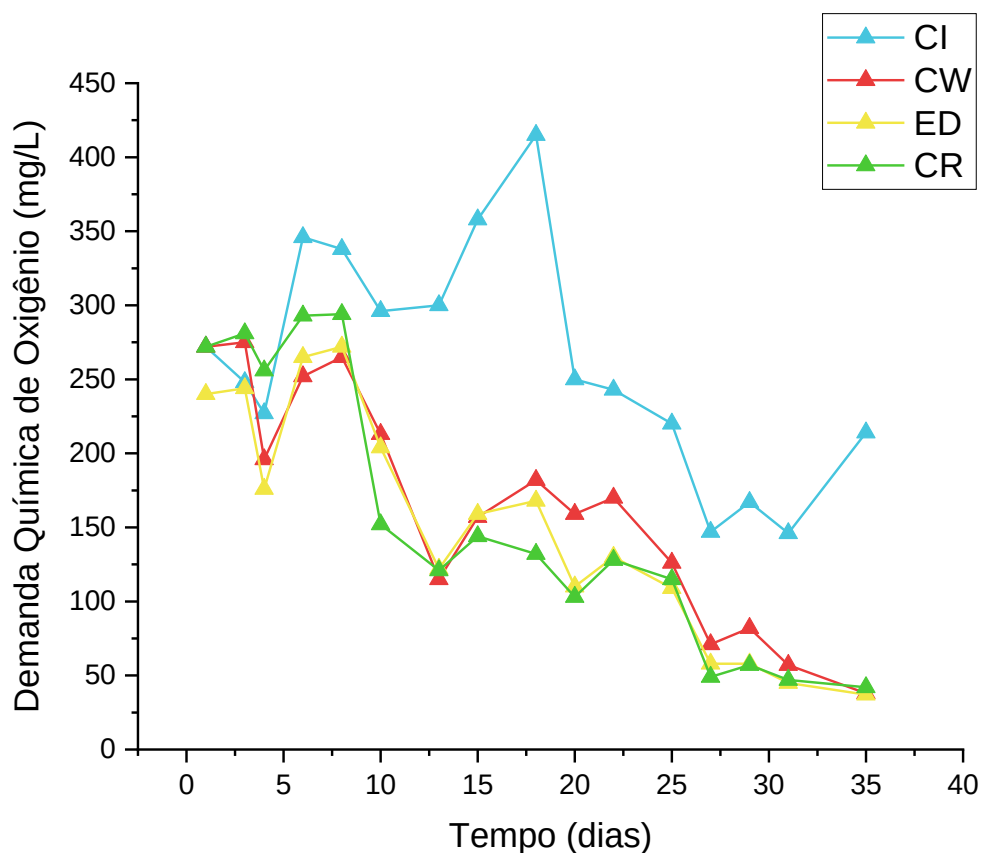
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 70 apresenta os resultados para os 35 dias de experimento do segundo ciclo da segunda etapa, abrangendo os resultados das quatro unidades experimentais internas ao laboratório.

Figura 70 - Comportamento das caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

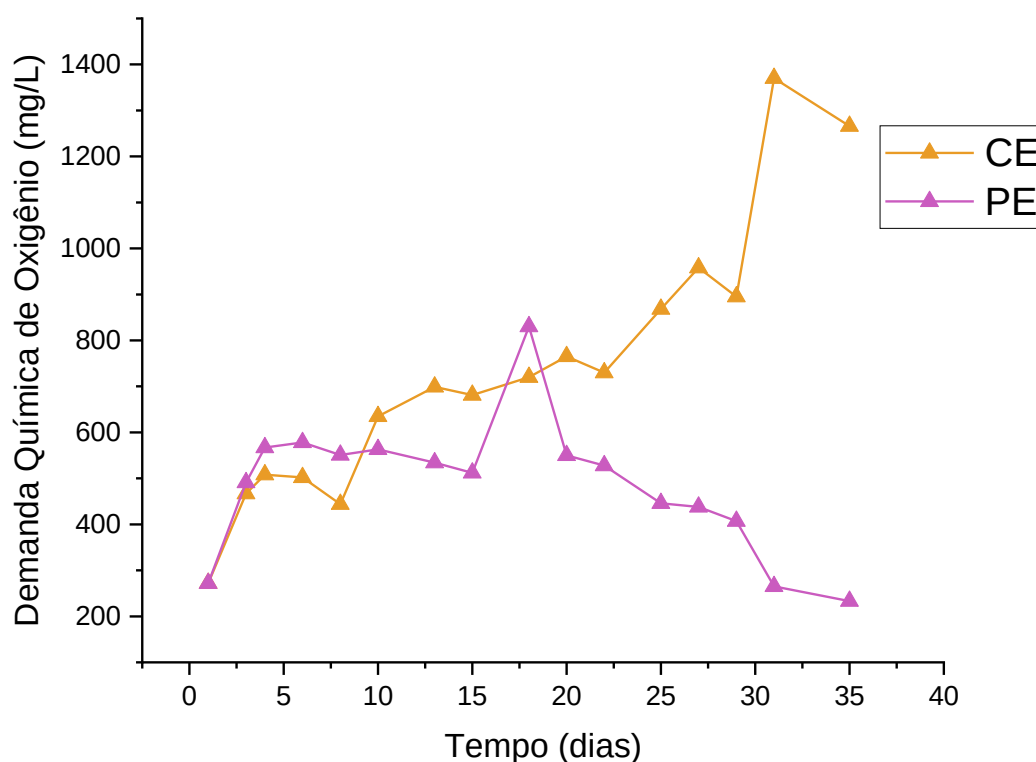
CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao fim dos 35 dias de experimento, nota-se um comportamento semelhante entre todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, que apresentam eficiência na remoção da DQO consideravelmente maior que a capacidade de autodepuração do efluente.

A Figura 71 contém os resultados das caixas externas para os 35 dias de experimento do segundo ciclo.

Figura 71 - Comportamento das caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa para o parâmetro de DQO



CE: controle externo;

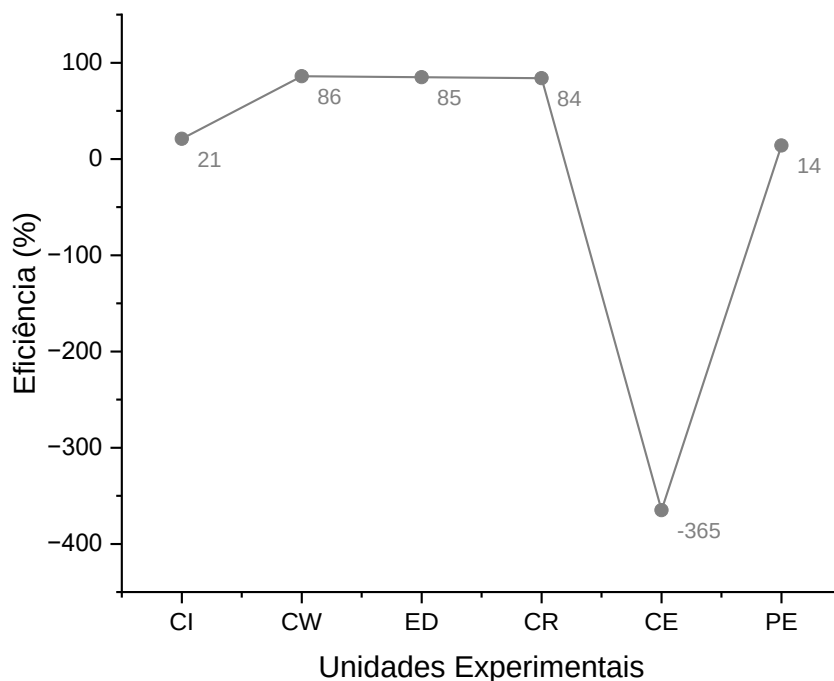
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 71, nota-se uma elevada capacidade de remoção da DQO na caixa externa que contém a *Wolffia*, enquanto a caixa controle apresentou maior concentração de DQO do que o analisado no início do experimento.

Ao final do experimento, as eficiências observadas para todas as unidades experimentais do segundo ciclo da segunda etapa apresentam-se na Figura 72.

Figura 72 – Eficiências obtidas para remoção da DQO no segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

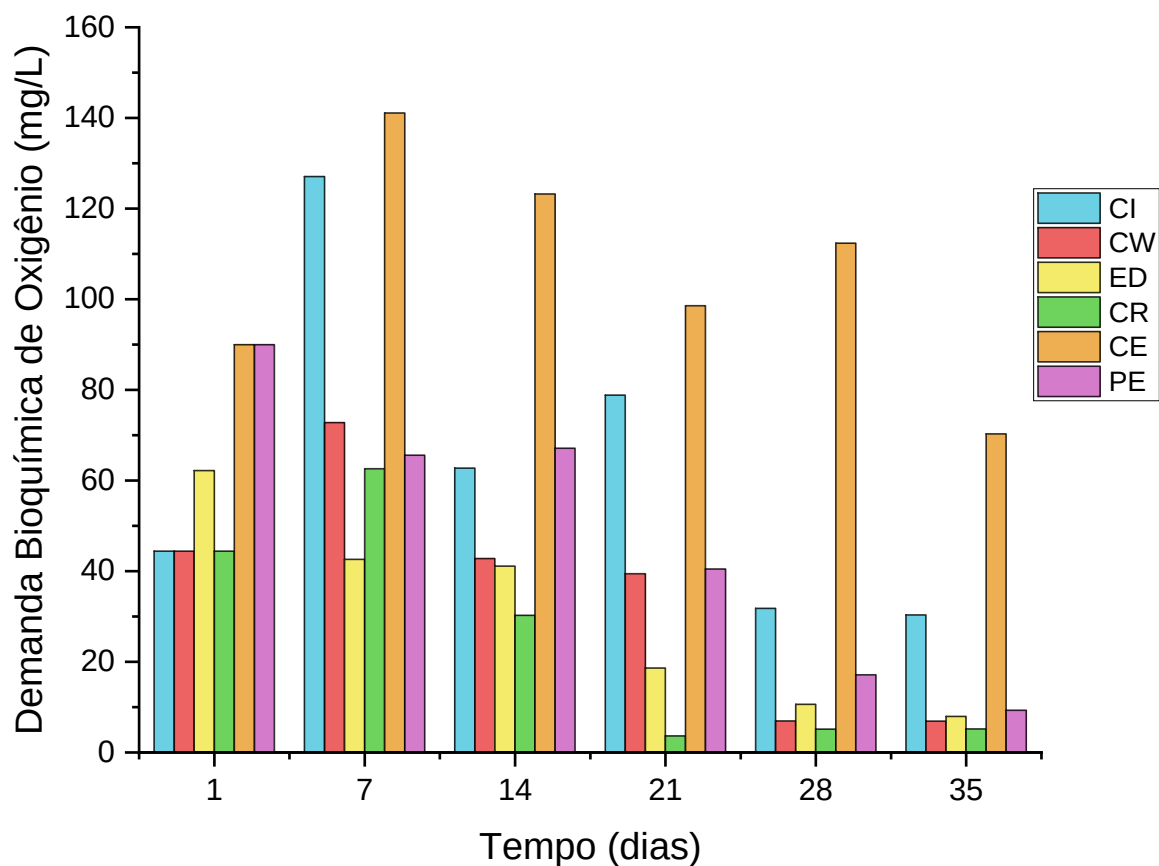
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ademais, em comparação com o primeiro ciclo, observa-se uma menor eficiência em ambas as unidades experimentais externas, enquanto as caixas internas apresentam comportamento semelhante. Diante disso, acredita-se que as oscilações nas caixas externas ocorram devido a fatores externos, como luminosidade e temperatura.

5.3.5. DBO

A Figura 73 apresenta os resultados da DBO para as caixas internas e externas ao laboratório durante os 35 dias de experimentos do primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 73 – Resultados da DBO para as caixas internas e externas do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

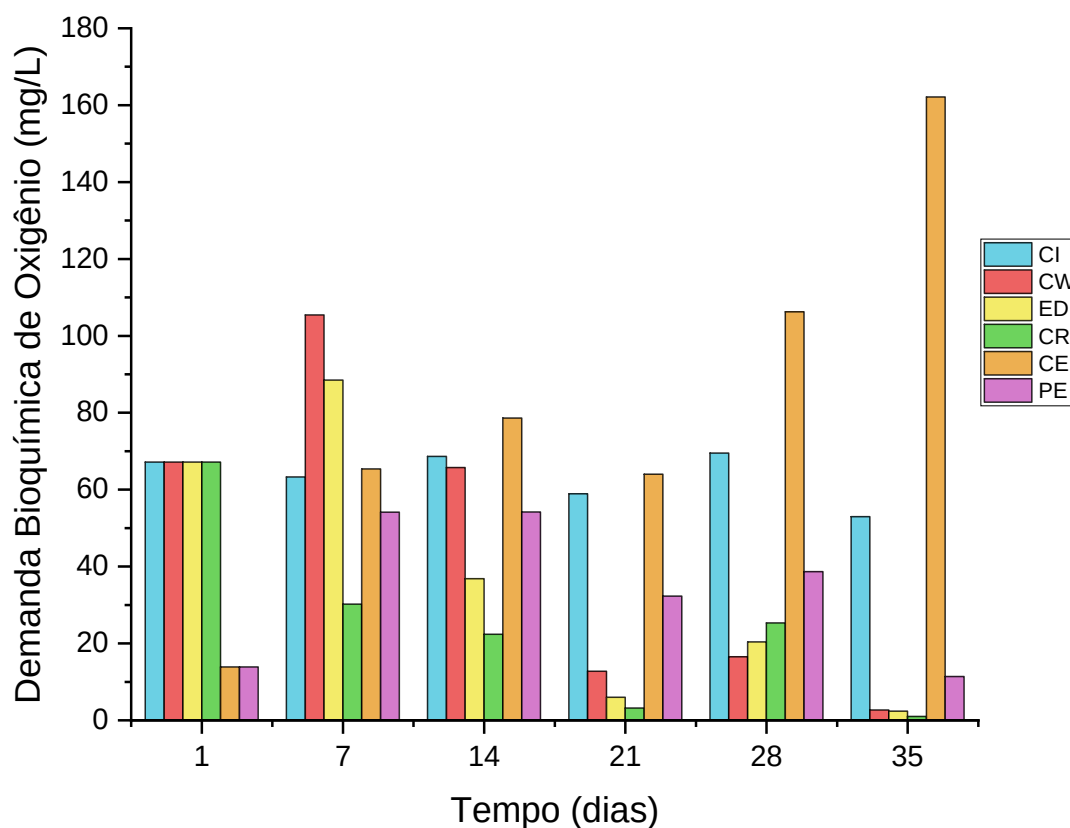
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante do exposto na Figura 73, nota-se uma maior eficiência em todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, tanto internamente quanto externamente, quando em comparação com as caixas controle.

A Figura 74 apresenta os valores das análises de DBO para os 35 dias do segundo ciclo da segunda etapa, abrangendo os resultados de todas as unidades experimentais.

Figura 74 - Resultados da DBO para as caixas internas e externas do segundo ciclo da segunda etapa



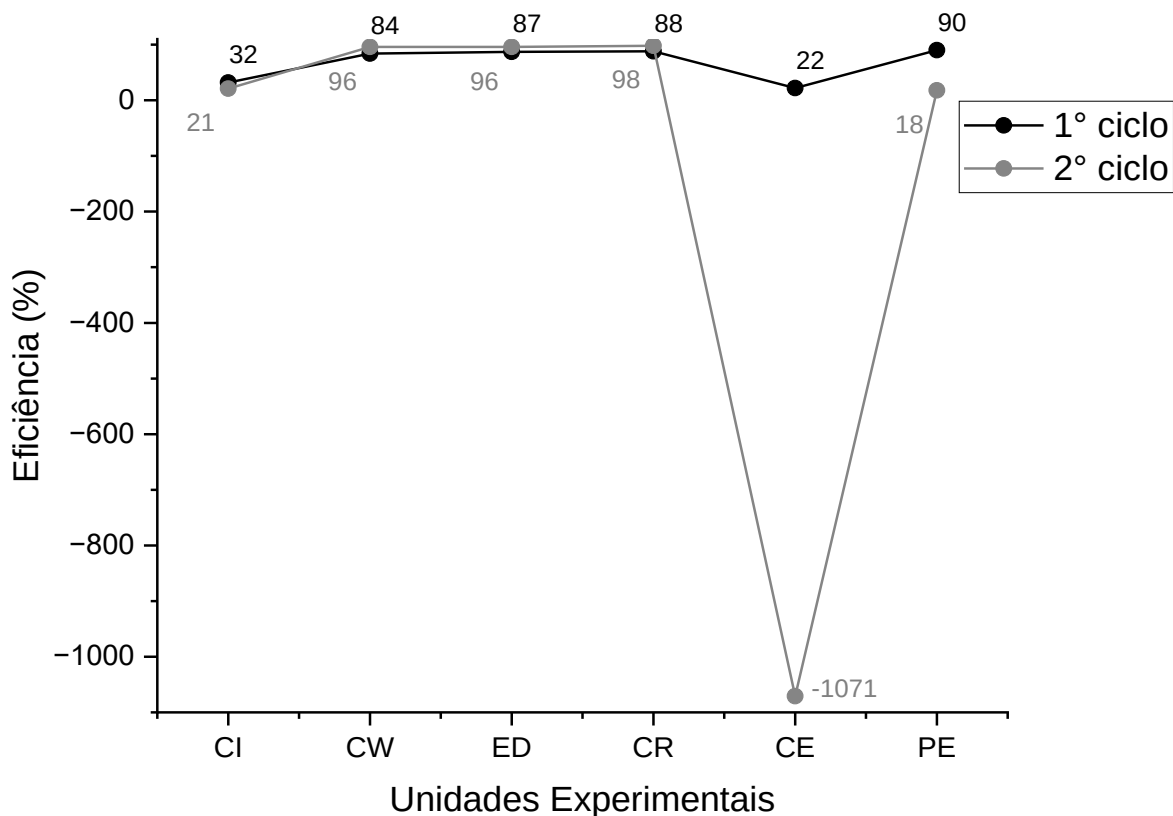
CI: controle interno;	CR: caixa interna com recirculação;
CW: caixa interna contendo apenas <i>Wolffia</i> ;	CE: controle externo;
ED: caixa interna com efluente diluído;	PE: caixa externa com a <i>Wolffia</i> .

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a análise da Figura 74, observa-se uma eficiência consideravelmente maior em todas as caixas de cultivo de *Wolffia* quando em comparação com as caixas controle.

As eficiências apresentadas para todas as unidades experimentais do primeiro e segundo ciclo são retratadas na Figura 75.

Figura 75 – Eficiências observadas para a remoção da DBO em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como para o parâmetro da DQO, as caixas externas apresentaram menor desempenho no segundo ciclo quando em comparação ao primeiro.

Observam-se oscilações nos valores de DBO das Figuras 82 e 83, possivelmente causadas pela reposição de efluente nos 7º, 14º, 21º e 28º dias de experimento. Os valores de DBO analisados para os efluentes de reposição do primeiro ciclo apresentam-se na Tabela 21 e, do segundo ciclo, na Tabela 22. As quantidades necessárias para reposição encontram-se nas Tabelas 7 e 8, respectivamente para o ciclo 1 e 2.

Tabela 21 – Resultados da DBO para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	DBO do efluente (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	74,40
Segunda reposição (14° dia)	58,40
Terceira reposição (21° dia)	38,58
Quarta reposição (28° dia)	32,80

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 22 – Resultados da DBO para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.

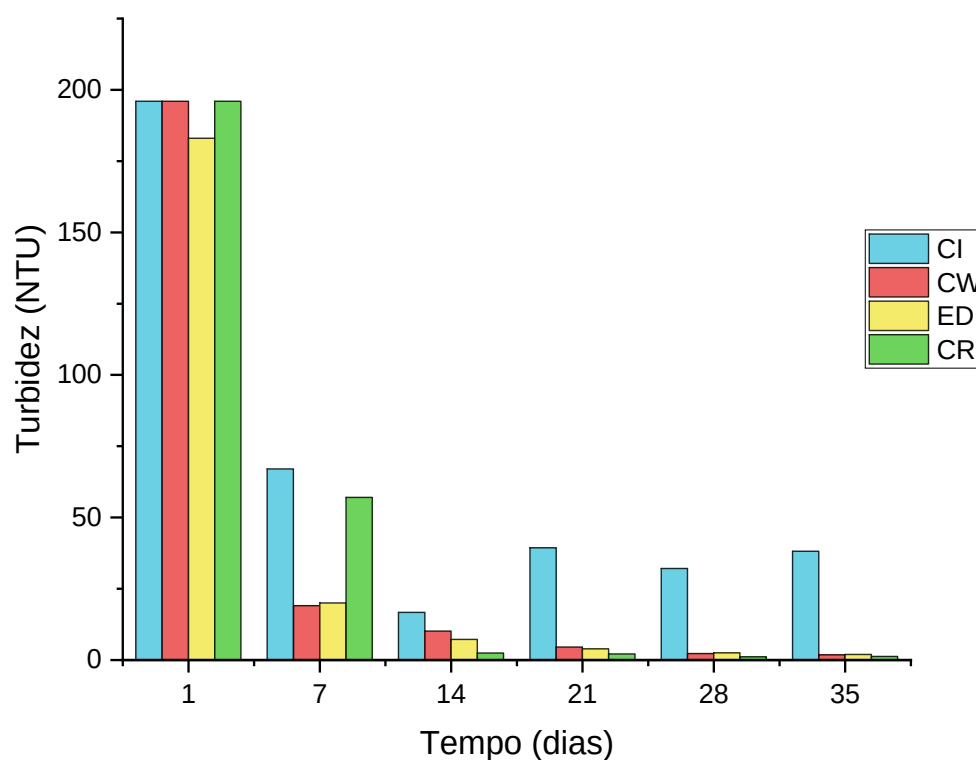
Reposições	DBO do efluente (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	45,99
Segunda reposição (14° dia)	34,26
Terceira reposição (21° dia)	58,00
Quarta reposição (28° dia)	65,40

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.6. Turbidez

A Figura 76 apresenta os resultados para a turbidez das caixas internas utilizadas na pesquisa do primeiro ciclo da segunda etapa do experimento, para os 35 dias de análise.

Figura 76 – Resultados da Turbidez para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

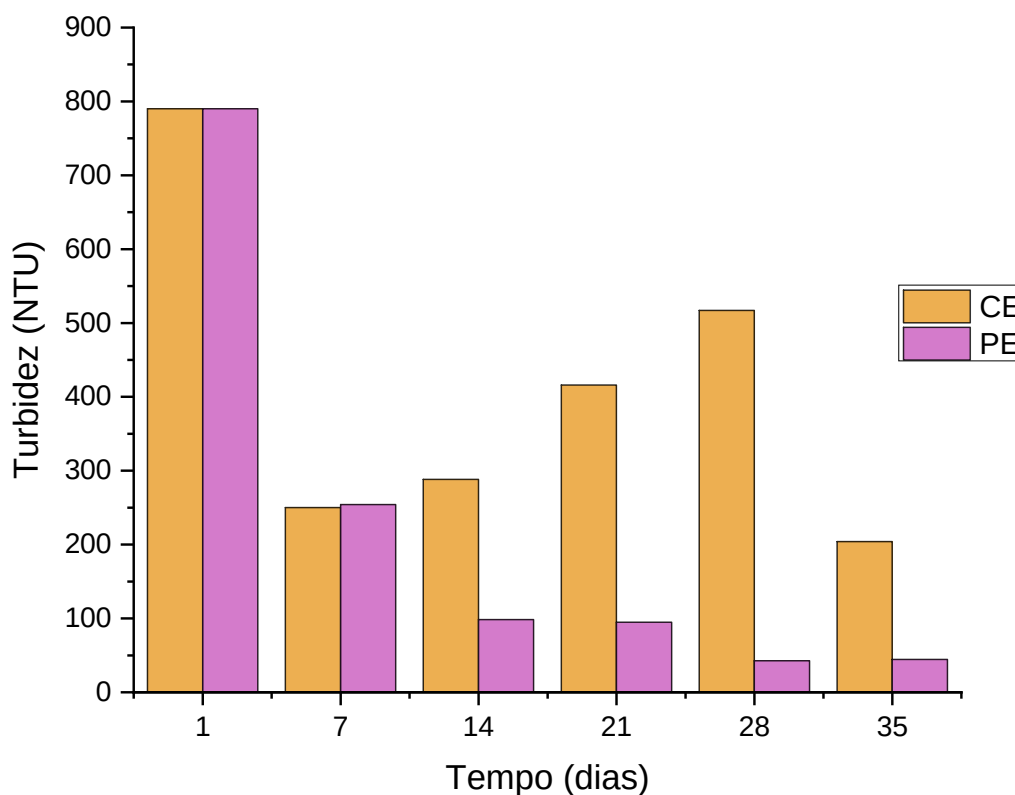
CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 77 apresenta os resultados de turbidez para as caixas externas ao laboratório durante os 35 dias de experimento, para o primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 77 - Resultados da Turbidez para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa



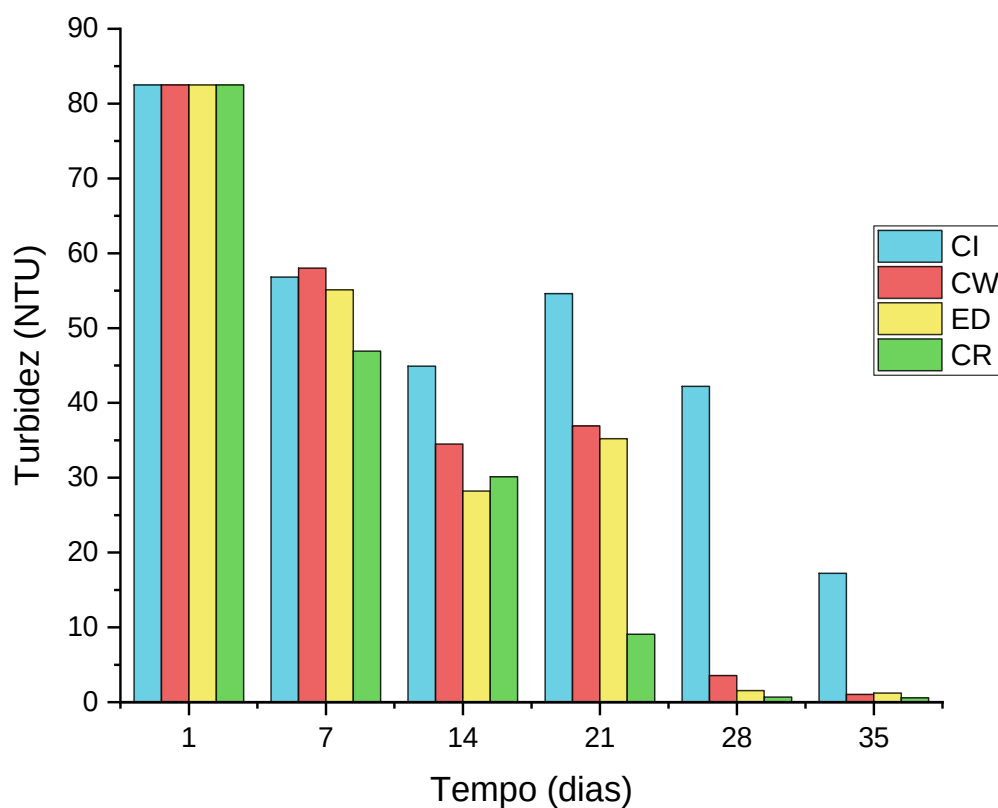
CE: controle externo;
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante disso, durante o primeiro ciclo, nota-se uma maior redução da turbidez em todas as caixas que contém a *Wolffia* como forma de polimento.

A Figura 78 apresenta os resultados para a redução da turbidez das caixas internas para o segundo ciclo da segunda etapa, durante os 35 dias de experimento.

Figura 78 - Resultados da Turbidez para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

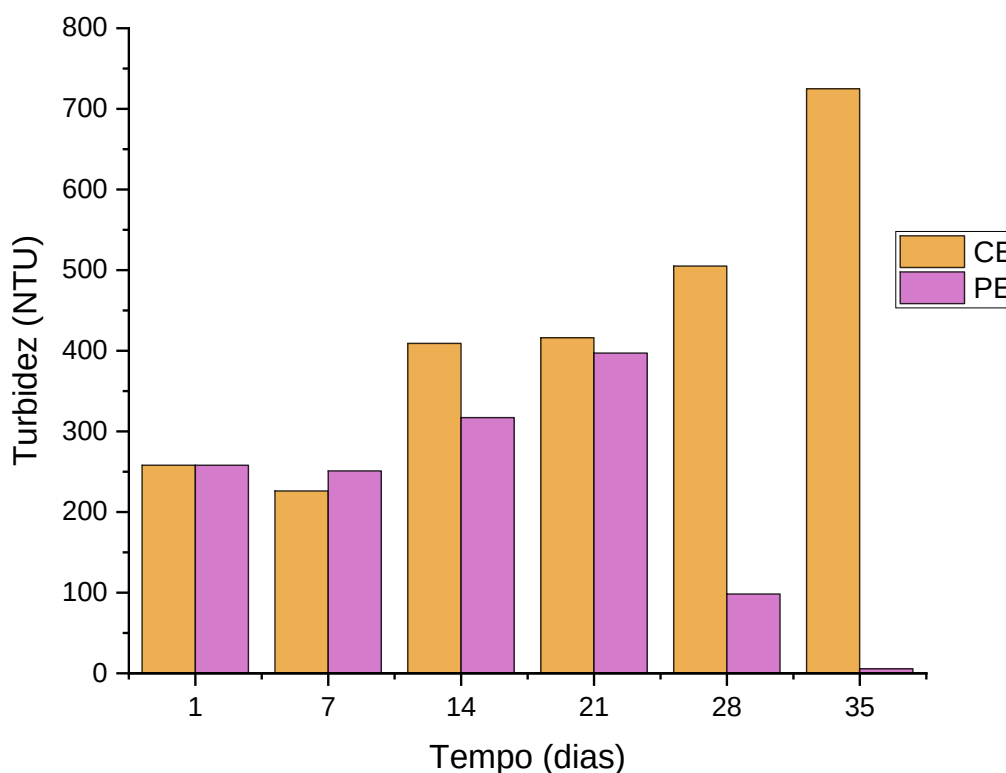
CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 79 mostra os resultados para a redução da turbidez das caixas externas, durante o segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 79 - Resultados da Turbidez para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa



CE: controle externo;

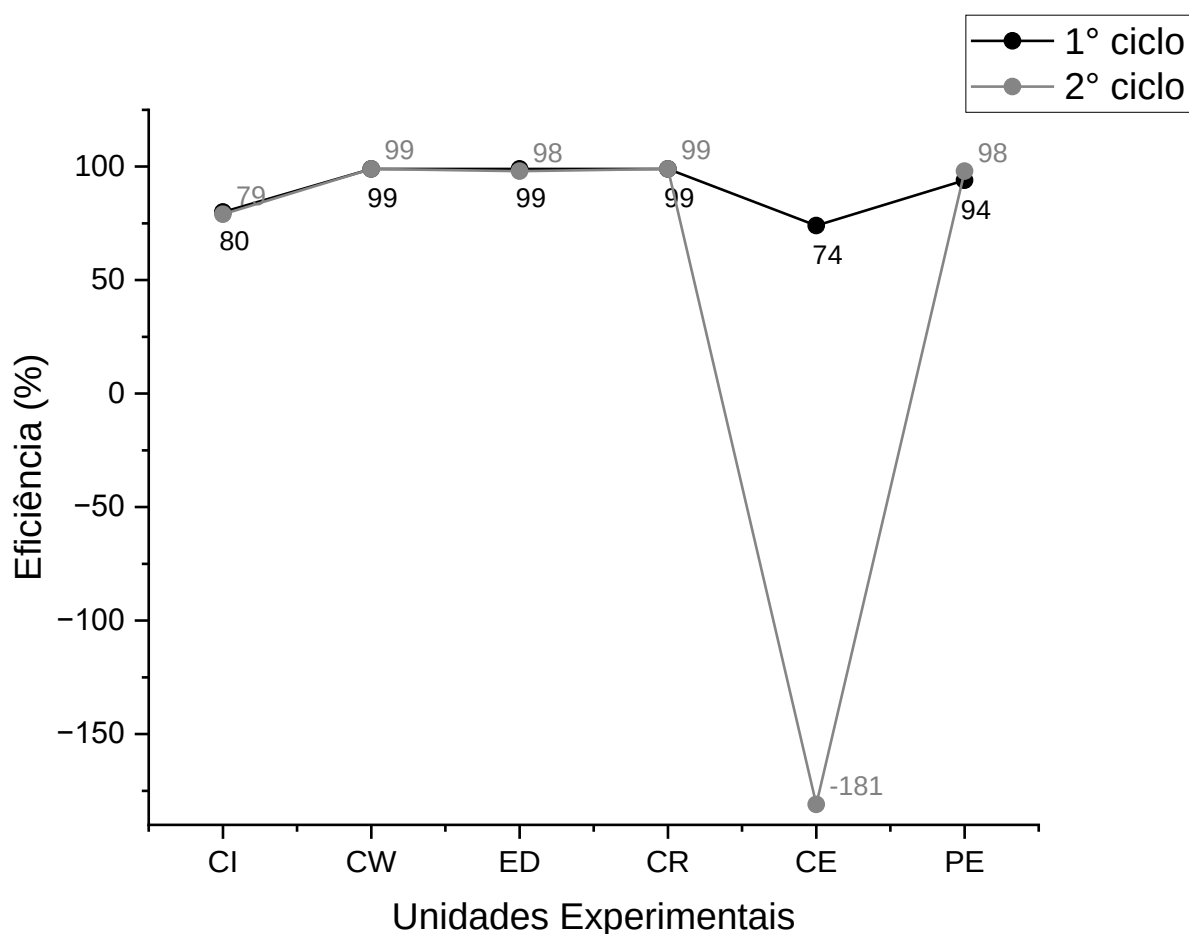
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a análise das figuras 78 e 79, assim como no primeiro ciclo, nota-se uma redução notável da turbidez nas caixas que contêm a *Wolffia* quando em comparação com as caixas utilizadas como forma de controle a autodepuração.

A eficiência na remoção da turbidez observada ao final dos 35 dias de ambos os ciclos da segunda etapa, para todas as unidades experimentais, é apresentada na Figura 80.

Figura 80 – Eficiência observada na remoção da Turbidez para ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, a reposição de efluentes, realizada no 7º, 14º, 21º e 28º dia, apresentam influência nos valores apresentados nas Figuras 76, 77, 78 e 79. As quantidades de efluente necessários em cada caixa foram citados na Tabela 7 para o primeiro ciclo e na Tabela 8 para o segundo. As Tabelas 23 e 24 contém os valores de turbidez dos efluentes acrescidos nas caixas respectivamente para o ciclo 1 e 2.

Tabela 23 - Resultados da turbidez para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	Turbidez do efluente (NTU)
Primeira reposição (7° dia)	137
Segunda reposição (14° dia)	97
Terceira reposição (21° dia)	67
Quarta reposição (28° dia)	120

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 24 - Resultados da turbidez para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

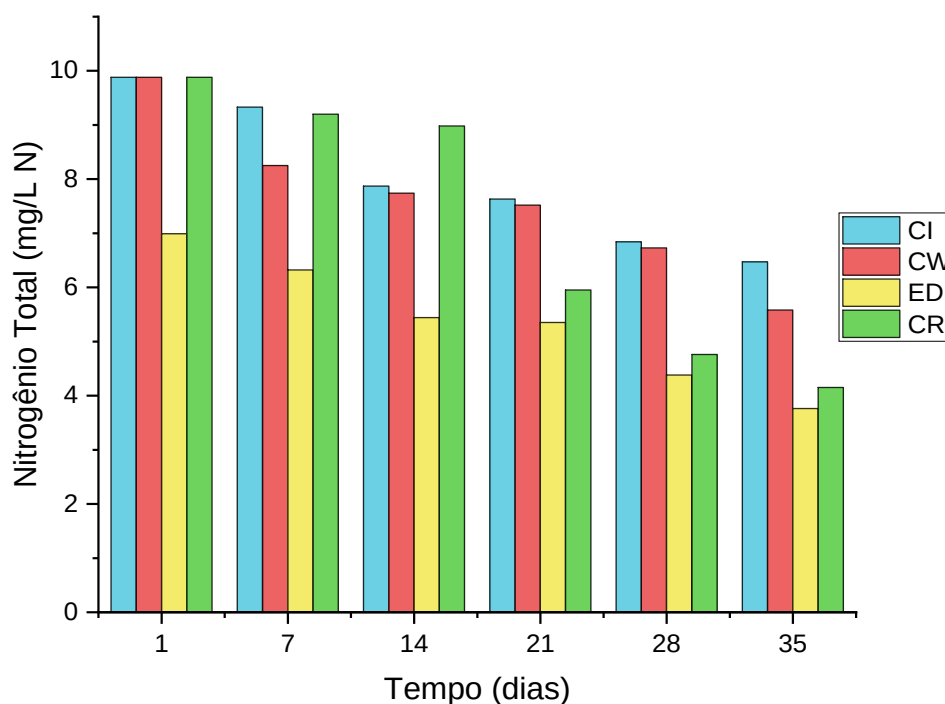
Reposições	Turbidez do efluente (NTU)
Primeira reposição (7° dia)	121
Segunda reposição (14° dia)	133
Terceira reposição (21° dia)	93
Quarta reposição (28° dia)	55

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.7. Nitrogênio Total

As Figuras 81 e 82 apresentam, respectivamente, os resultados de concentração de Nitrogênio Total para as caixas internas e externas ao laboratório, durante os 35 dias de experimento.

Figura 81 – Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas internas para o primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

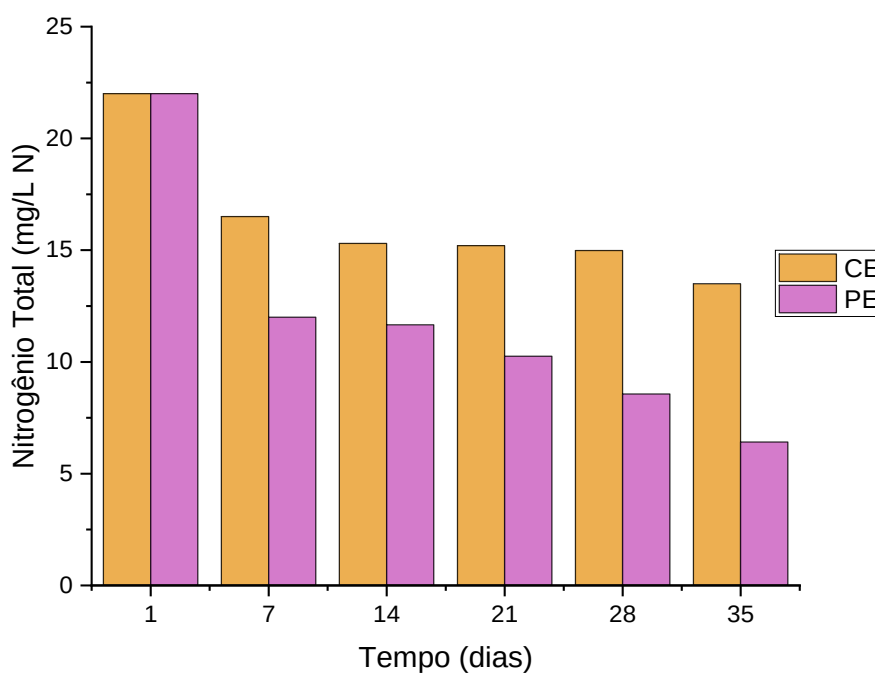
ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 82 - Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas externas para o primeiro ciclo da segunda etapa



CE: controle externo;

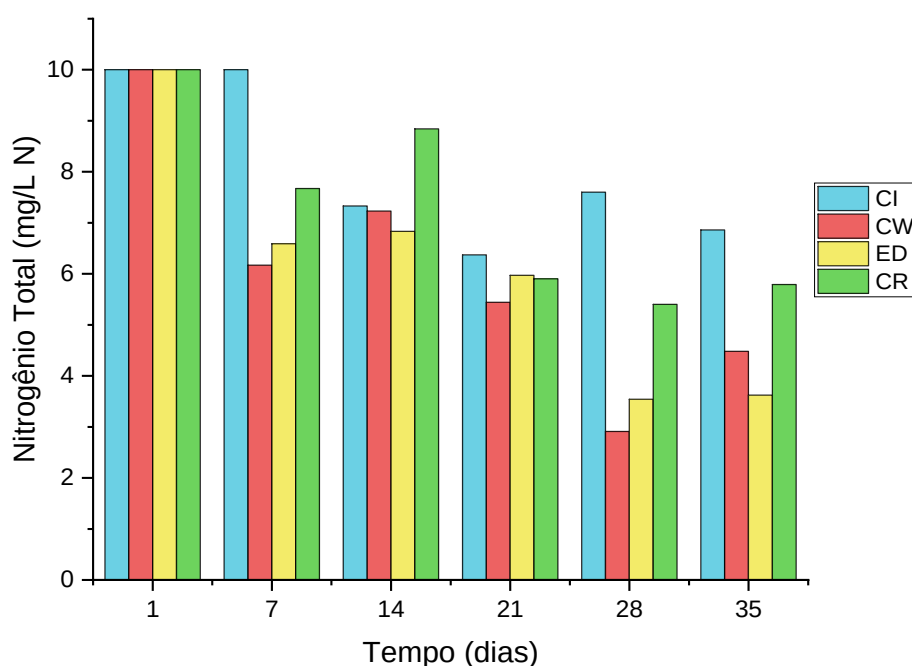
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em ambas as situações de cultivo, nota-se uma maior eficiência de remoção do Nitrogênio Total nas caixas que contém a *Wolffia* como forma de polimento, quando em comparação com as caixas controles internas e externas.

A Figura 83 apresenta os resultados observados de NT para as caixas internas utilizadas durante o segundo ciclo da segunda etapa, durante os 35 dias de experimento.

Figura 83 - Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas internas para o segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

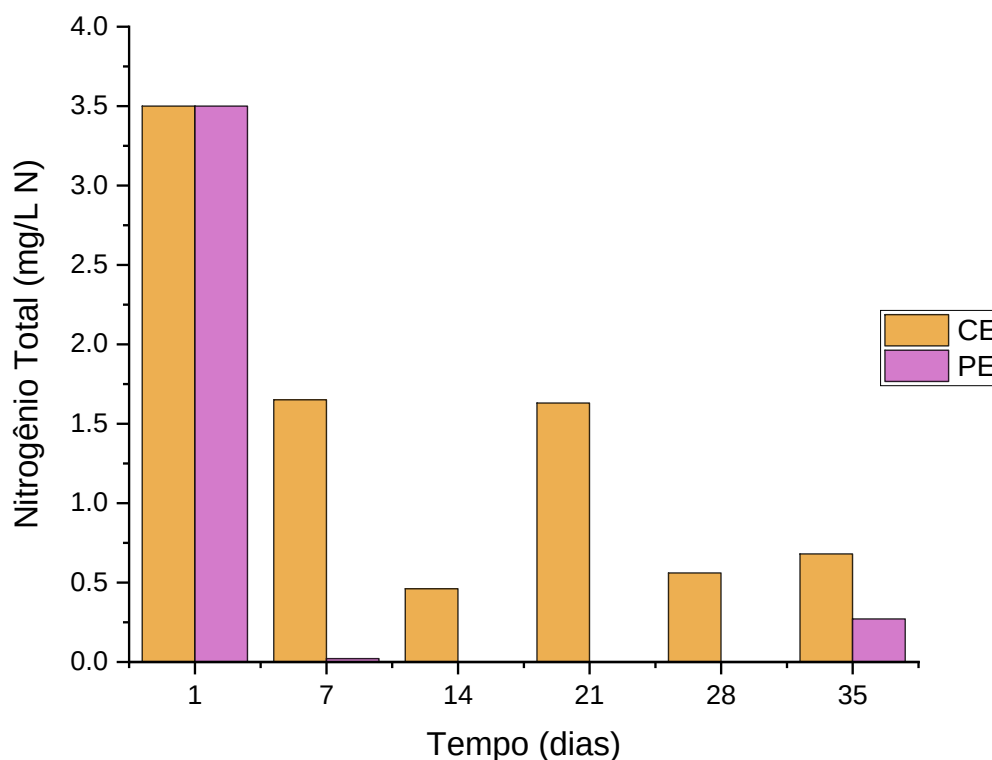
ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 84 mostra os resultados das análises de NT para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 84 - Resultados da concentração de Nitrogênio Total das caixas externas para o segundo ciclo da segunda etapa



CE: controle externo;

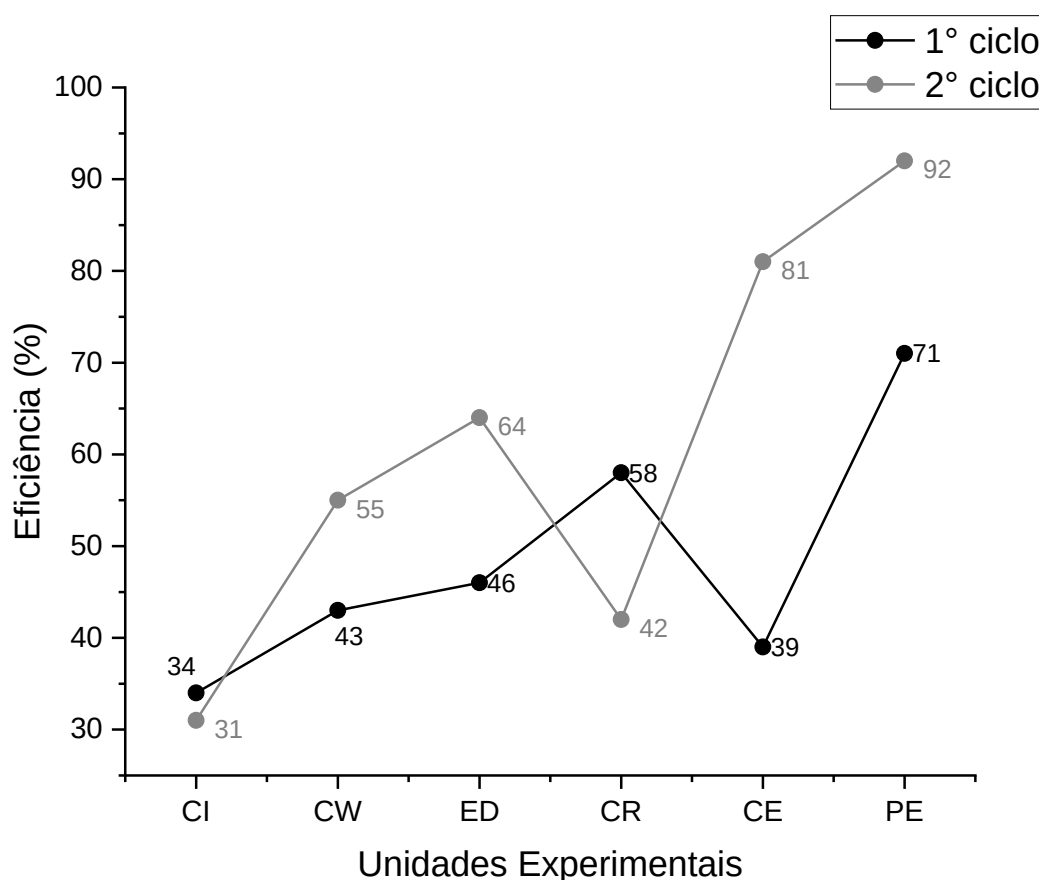
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com o observado nas Figuras 83 e 84, os resultados do segundo ciclo apresentaram-se semelhantes aos do primeiro. Tanto as caixas internas, quanto as externas, com a *Wolffia* apresentaram maior capacidade de remoção de nitrogênio total quando em comparação com as caixas controle.

A eficiência de remoção de Nitrogênio Total, para ambos os ciclos da segunda etapa e todas as unidades experimentais, é apresentada na Figura 85.

Figura 85 – Eficiência observada para a remoção de NT em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, em ambos os ciclos, nota-se um desempenho melhor na remoção do Nitrogênio Total na caixa PE.

Ademais, existem oscilações no decréscimo dos valores de nitrogênio total em todas as caixas, possivelmente causado pela reposição semanal de efluente. A concentração de NT nos efluentes de reposição encontram-se na Tabela 25 para o primeiro ciclo e na Tabela 26 para o segundo. As quantidades de reposição para cada unidade experimental estão representadas na Tabela 7 para o ciclo 1 e Tabela 8 para o ciclo 2.

Tabela 25 - Resultados do NT para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	Nitrogênio Total (mg/L N)
Primeira reposição (7° dia)	6,03
Segunda reposição (14° dia)	8,98
Terceira reposição (21° dia)	7,60
Quarta reposição (28° dia)	9,18

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 26 - Resultados do NT para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.

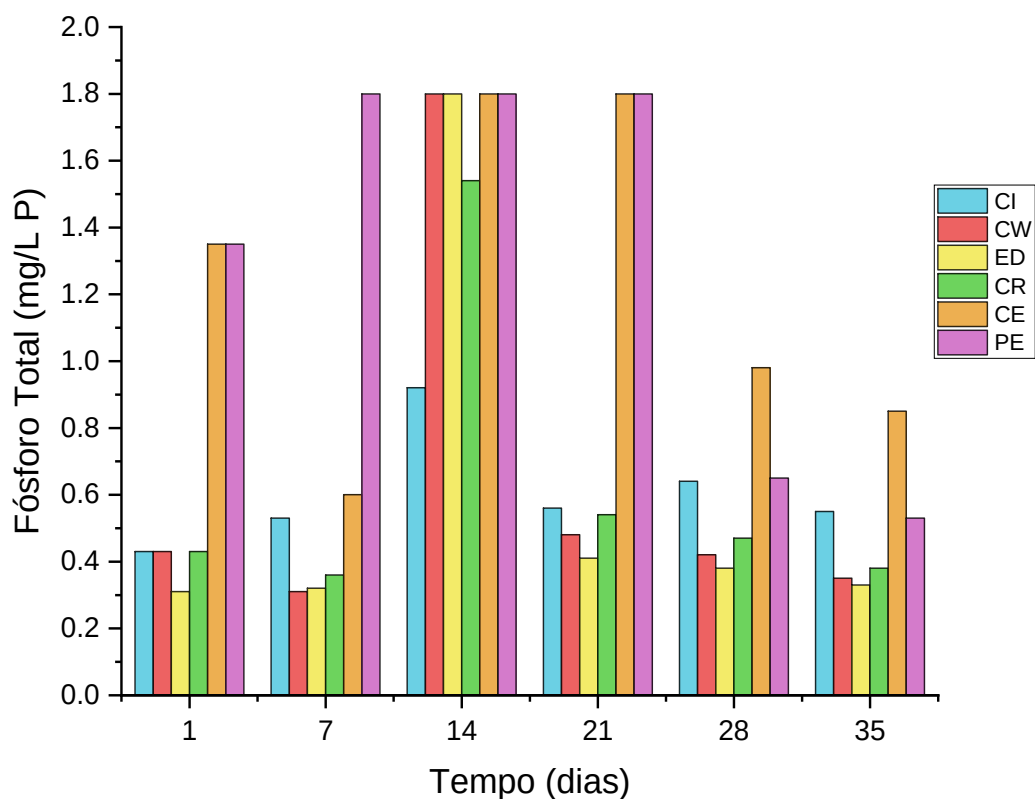
Reposições	Nitrogênio Total (mg/L N)
Primeira reposição (7° dia)	1,43
Segunda reposição (14° dia)	7,85
Terceira reposição (21° dia)	0,26
Quarta reposição (28° dia)	1,83

Fonte: Elaboração do próprio autor

5.3.8. Fósforo Total

A Figura 86 apresenta os resultados de concentração de fósforo total para todas as unidades experimentais durante os 35 dias de experimento.

Figura 86 - Resultados da concentração de Fósforo Total para o primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

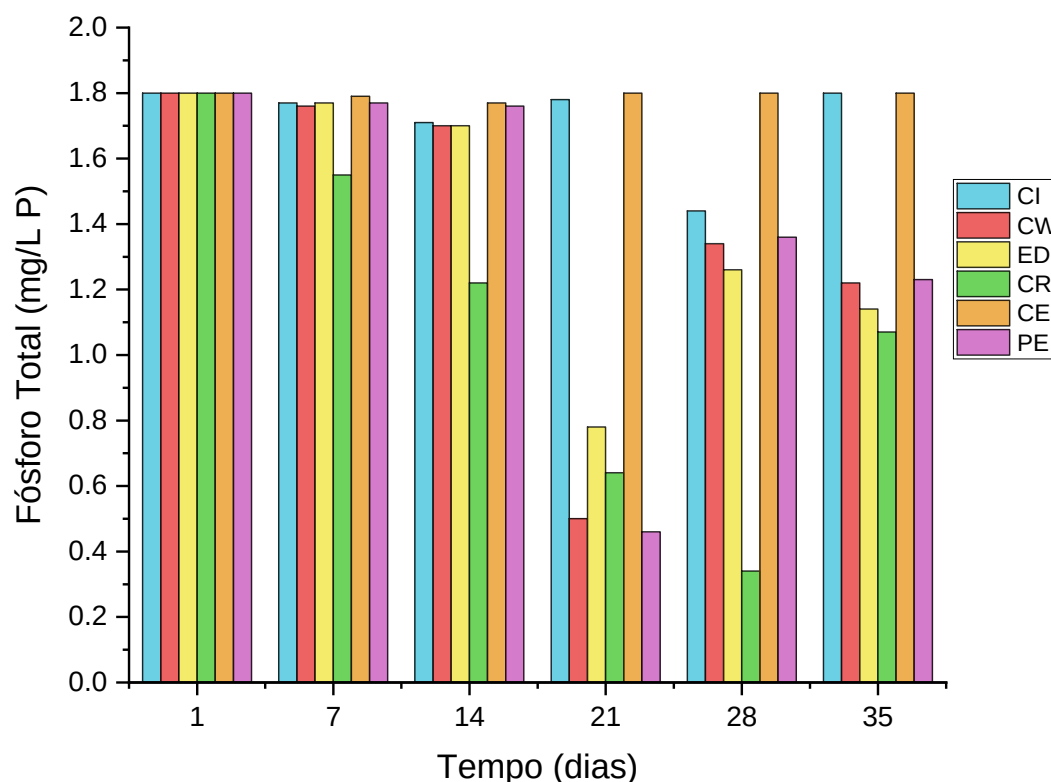
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 87 contém os resultados das análises de Fósforo Total para todas as unidades experimentais do segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 87 - Resultados da concentração de Fósforo Total para o primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

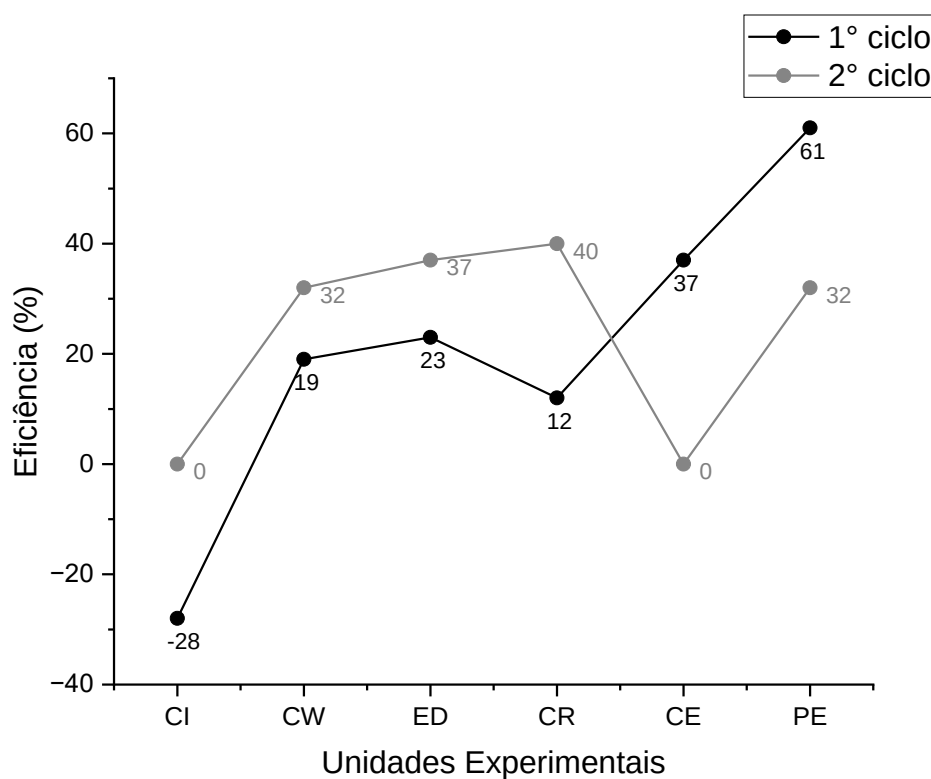
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 87, identifica-se uma eficiência de remoção de fósforo nas caixas que apresentam a *Wolffia* e, em ambas as caixas controle, tanto internamente, quanto externamente, não se nota diferença considerável entre a análise inicial e a final, após os 35 dias de experimento.

Os valores de eficiência de remoção de Fósforo Total para ambos os ciclos da segunda etapa são apresentados na Figura 88.

Figura 88 – Eficiência observada para a remoção de PT em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, os resultados sofrem influência direta da reposição semanal de efluente. A quantidade de reposição necessária para cada caixa apresenta-se na Tabela 7 para o primeiro ciclo e Tabela 8 para o segundo ciclo. As Tabelas 27 e 28 contém, respectivamente, as concentrações de PT para cada efluente de reposição, para o primeiro e segundo ciclo.

Tabela 27 - Resultados do PT para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo.

Reposições	Fósforo Total (mg/L P)
Primeira reposição (7º dia)	1,43
Segunda reposição (14º dia)	0,67
Terceira reposição (21º dia)	1,80
Quarta reposição (28º dia)	0,42

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 28 - Resultados do PT para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo

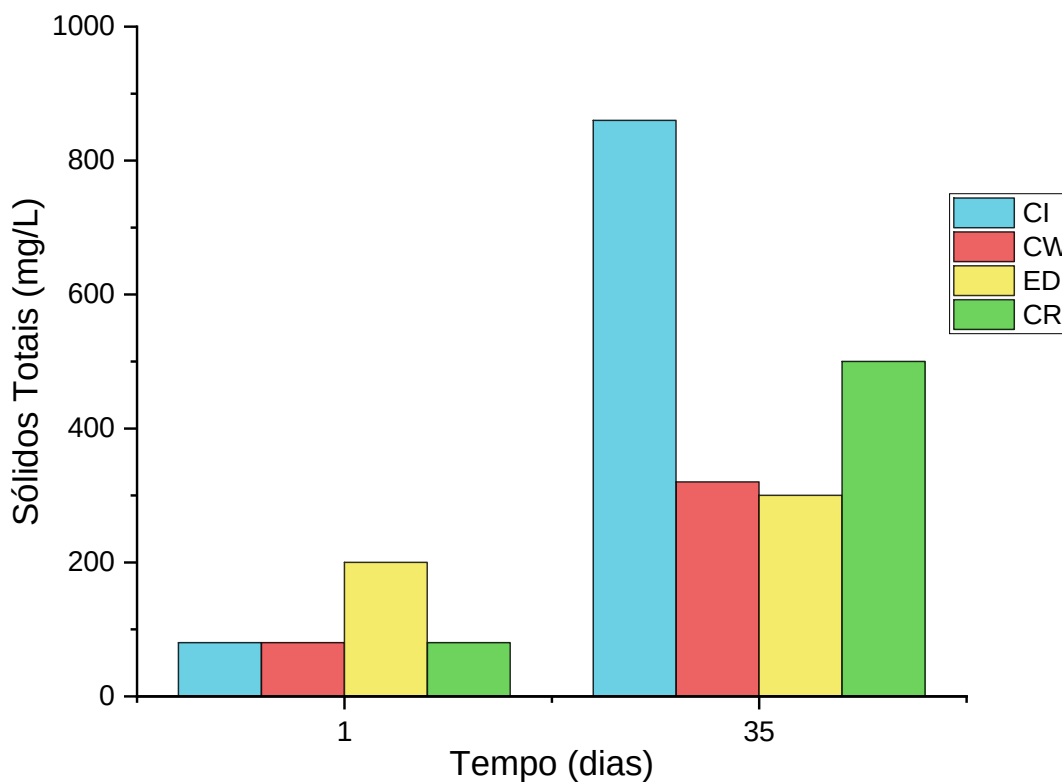
Reposições	Fósforo Total (mg/L P)
Primeira reposição (7° dia)	1,72
Segunda reposição (14° dia)	1,44
Terceira reposição (21° dia)	1,26
Quarta reposição (28° dia)	1,80

Fonte: Elaboração do próprio autor

5.3.9. Sólidos totais

A Figura 89 apresenta os resultados para os sólidos totais das caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa do experimento, abrangendo a análise inicial e a análise após os 35 dias de pesquisa.

Figura 89 – Resultados ST para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa.



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

ED: caixa interna com efluente diluído;

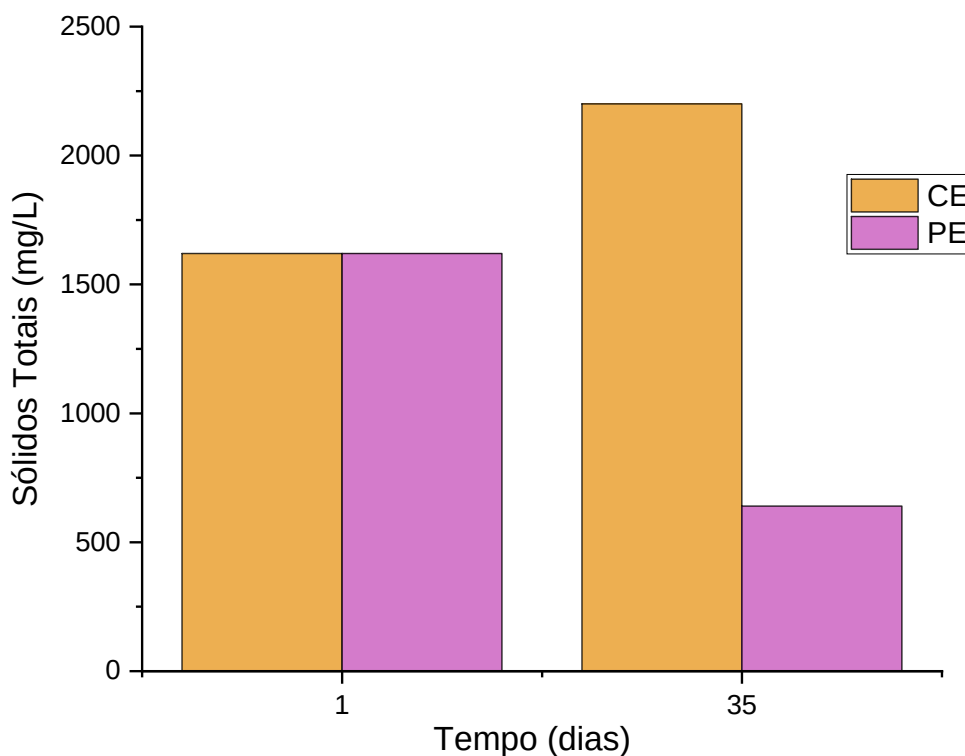
CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As caixas com cultivo de *Wolffia* mostram melhor desempenho na geração de sólidos totais, quando em comparação com a caixa controle, tendo em vista que apresentam menor elevação da concentração.

A Figura 90 apresenta o resultado para o ST das caixas externas.

Figura 90 - Resultados ST para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa.



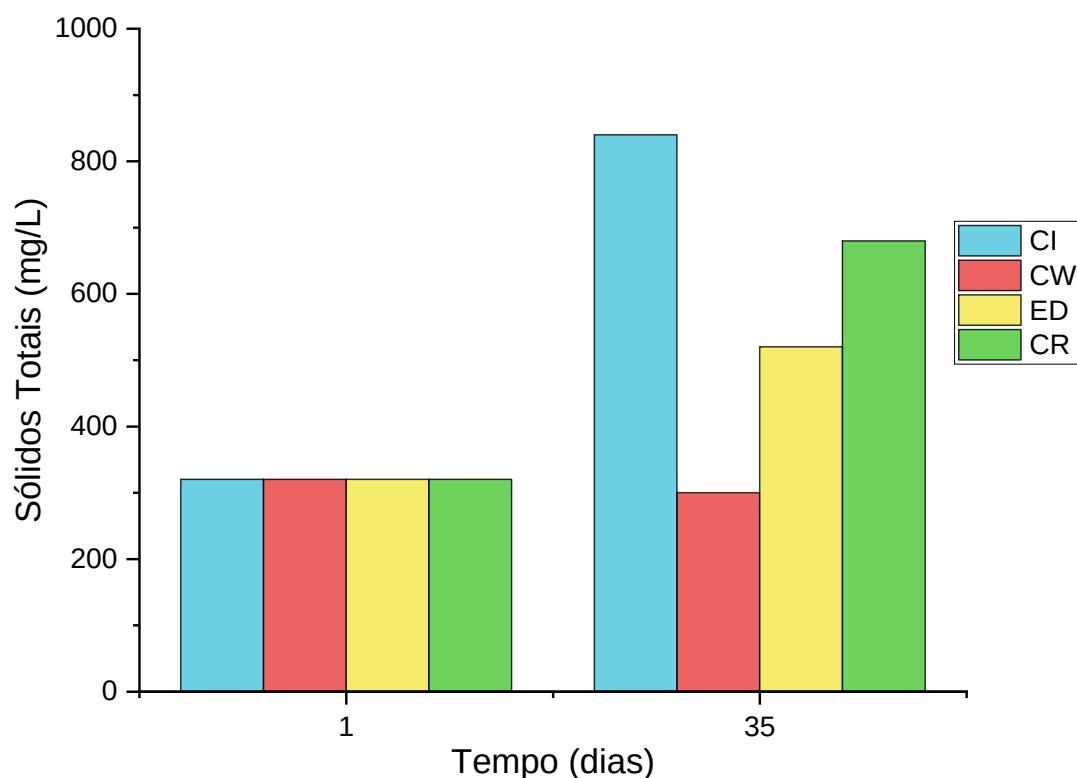
CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 91 contém os resultados das análises de sólido total para as caixas internas, realizadas no início e no final do segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 91 - Resultados ST para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

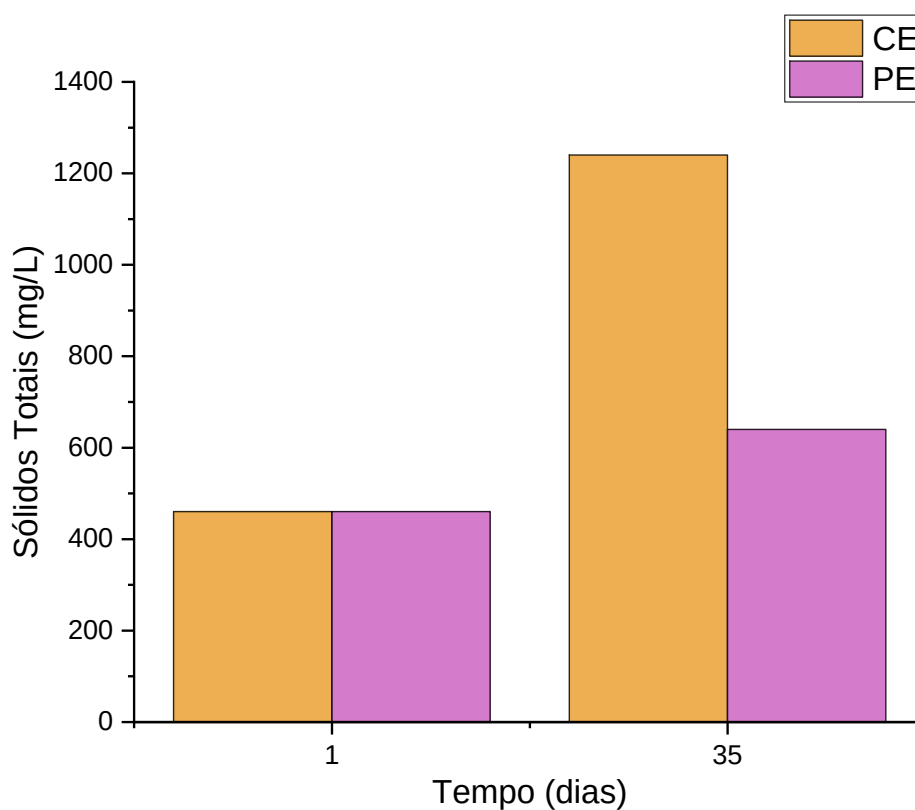
CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se maior quantidade de sólidos totais na caixa utilizada como controle quando em comparação com todas as caixas de cultivo de *Wolffia*.

A Figura 92 apresenta os resultados iniciais e finais da análise de sólidos totais para as caixas externas do segundo ciclo.

Figura 92 - Resultados ST para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa



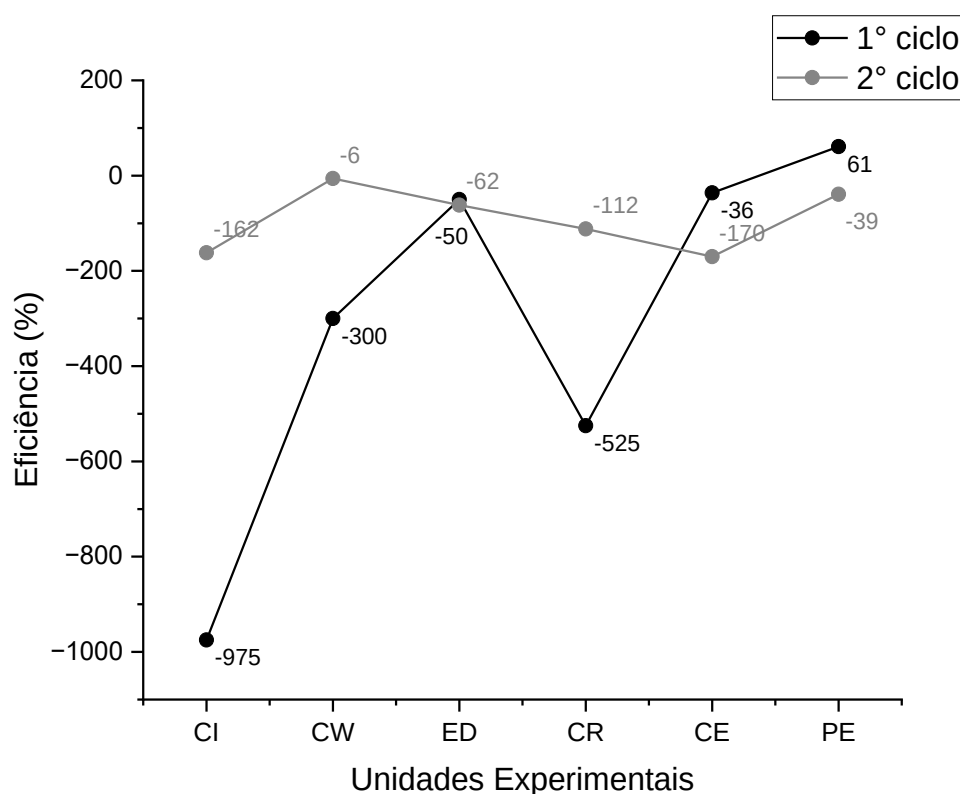
CE: controle externo;
 PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 92, percebe-se um aumento na concentração de sólidos totais em ambas as caixas externas.

Todos os valores de eficiência de remoção de Sólidos Totais, para ambos os ciclos da segunda etapa, encontram-se na Figura 93.

Figura 93 – Eficiência observada na remoção de ST em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ademais, os valores são influenciados diretamente pela reposição semanal de efluentes. A quantidade necessária em cada reposição foi citada na Tabela 7 para o ciclo 1 e na Tabela 8 para o ciclo 2. A concentração de sólidos totais de cada efluente de reposição do primeiro ciclo são apresentados na Tabela 29 e para o segundo na Tabela 30.

Tabela 29 - Resultados do ST para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	Sólidos Totais (mg/L)
Primeira reposição (7º dia)	200
Segunda reposição (14º dia)	210
Terceira reposição (21º dia)	580
Quarta reposição (28º dia)	720

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 30 - Resultados do ST para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo

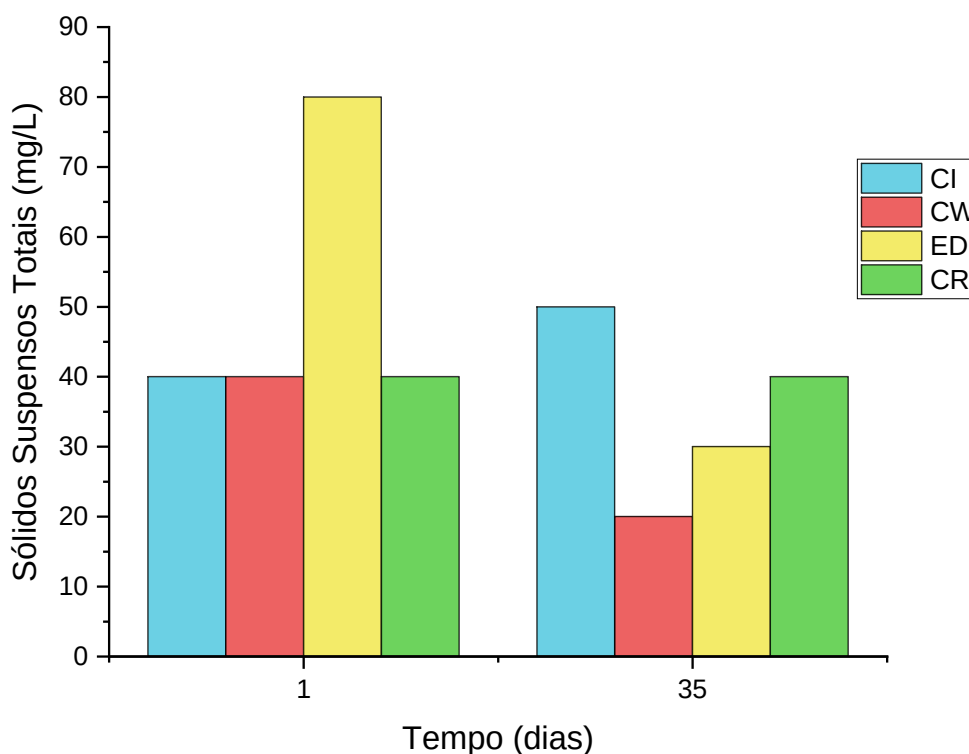
Reposições	Sólidos Totais (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	560
Segunda reposição (14° dia)	200
Terceira reposição (21° dia)	640
Quarta reposição (28° dia)	600

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.10. Sólidos Suspensos Totais

A Figura 94 contém os resultados para os Sólidos Suspensos Totais das caixas internas utilizadas durante o primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 94 - Resultados SST para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

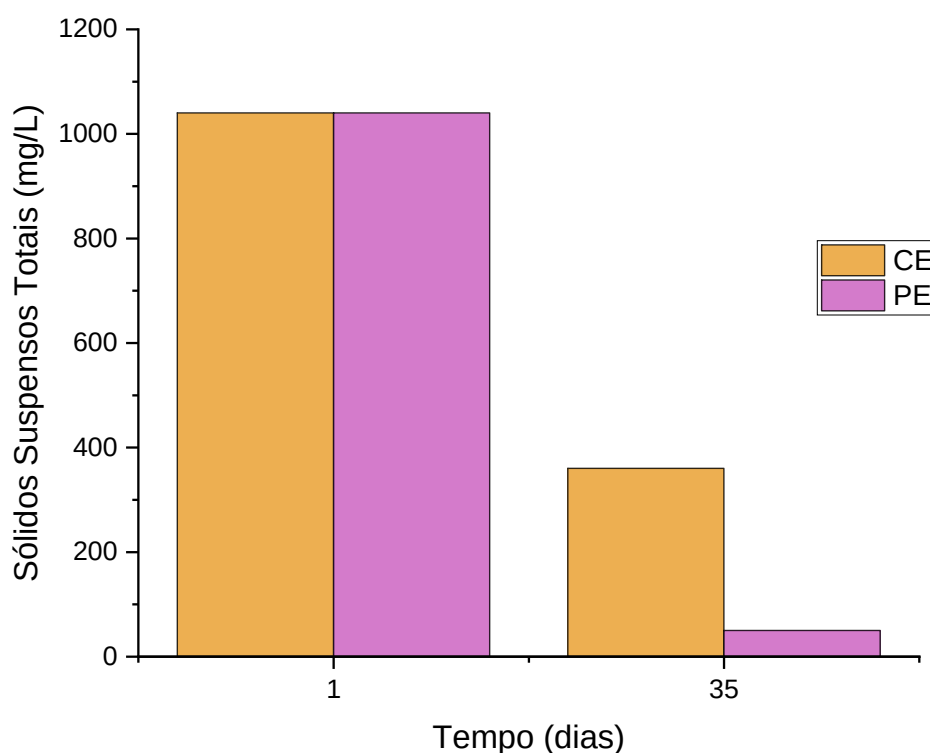
ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 95 apresenta os resultados do SST para as caixas externas utilizadas durante o primeiro ciclo da segunda etapa.

Figura 95 - Resultados SST para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa



CE: controle externo;

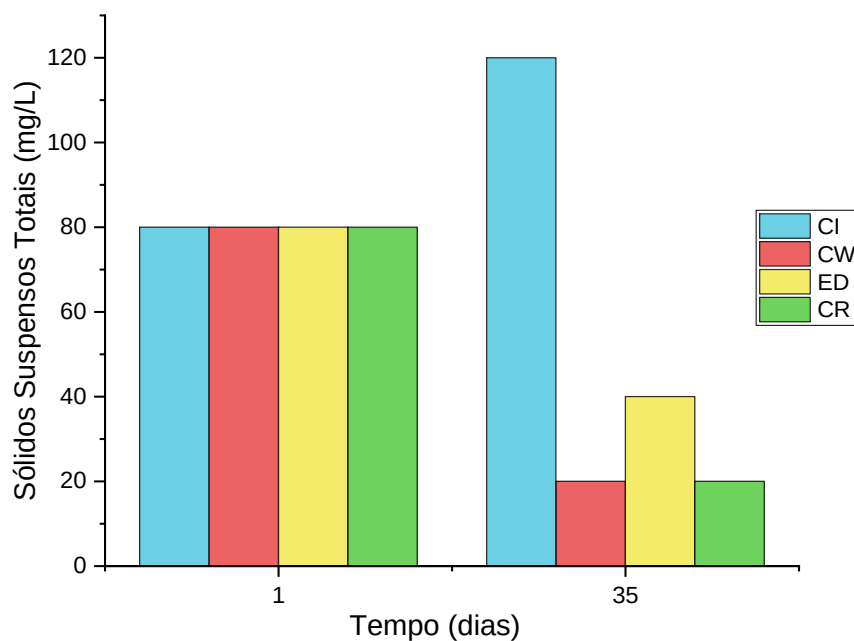
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante disso, nota-se uma redução na concentração de sólidos suspensos totais em todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, em exceção da caixa que possui a bomba de recirculação (CR), a qual apresentou a mesma concentração inicial e final. A caixa controle interna (CI) apresentou um aumento na concentração de SST.

As Figura 96 e 97 apresentam, respectivamente, os resultados para os sólidos suspensos totais das caixas internas e externas utilizadas no segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 96 - Resultados SST para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

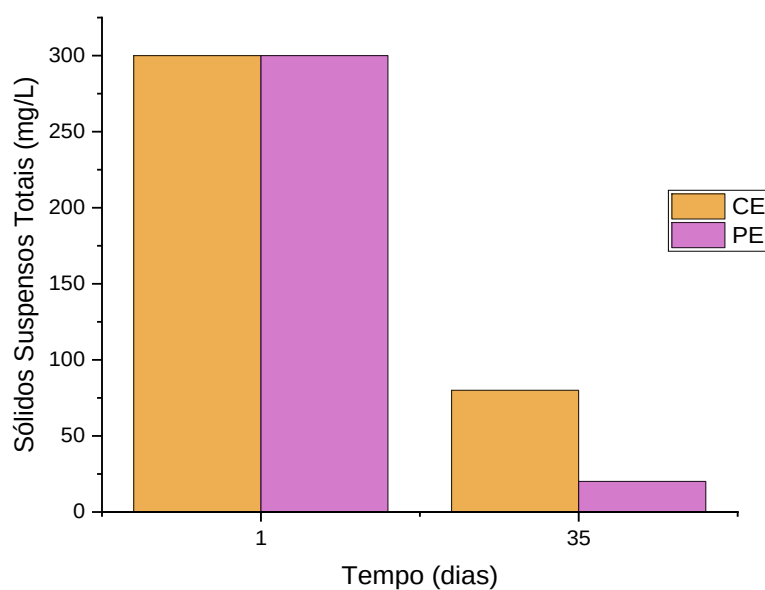
ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 97 - Resultados SST para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa



CE: controle externo;

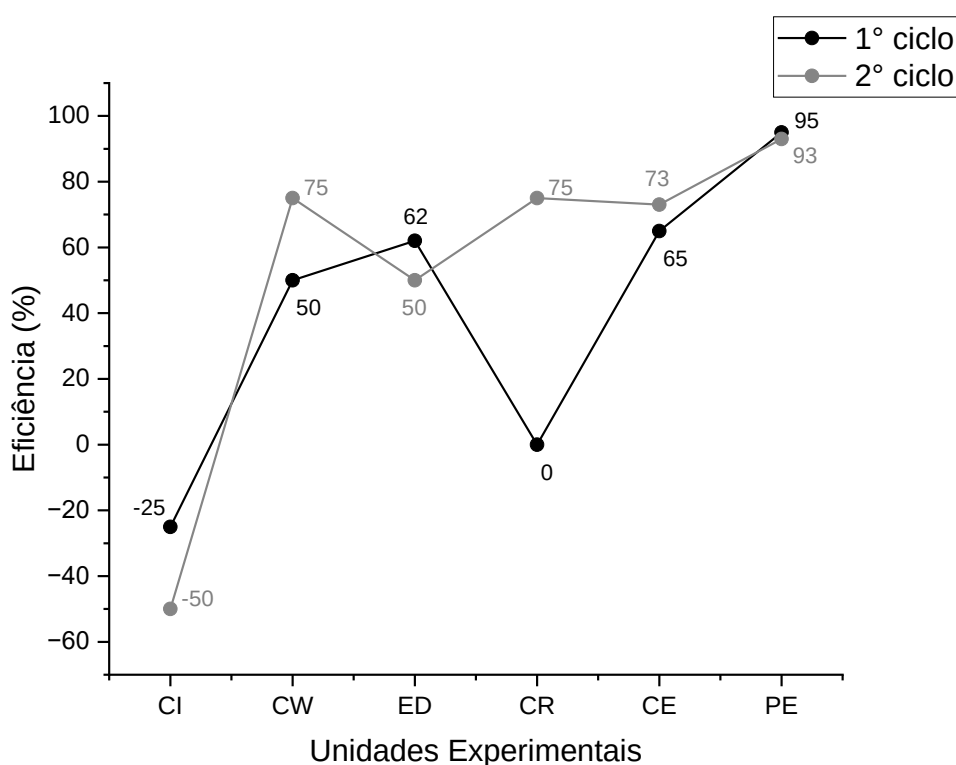
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se uma redução na concentração de sólidos suspensos totais em todas as unidades experimentais que possuem a *Wolffia*. Assim como no primeiro ciclo, a caixa controle interna (CI) apresentou aumento na quantidade de SST quando em comparação ao início do experimento.

A Figura 98 apresenta os valores de eficiência observados para a remoção de Sólidos Suspensos Totais em ambos os ciclos da segunda etapa.

Figura 98 – Eficiências observadas para a remoção de SST em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, assim como no primeiro ciclo, a caixa PE apresentou maior eficiência sobre as demais.

Ademais, os resultados analisados sofrem influência direta da reposição semanal do efluente que evapora das caixas. As quantidades necessárias para cada unidade experimento encontram-se nas Tabelas 7 e 8, respectivamente para o primeiro e segundo ciclo. A concentração de SST de cada efluente de reposição são apresentados na Tabela 31 para o ciclo um e 32 para o ciclo dois.

Tabela 31 - Resultados do SST para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	30
Segunda reposição (14° dia)	110
Terceira reposição (21° dia)	390
Quarta reposição (28° dia)	60

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 32 - Resultados do SST para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo.

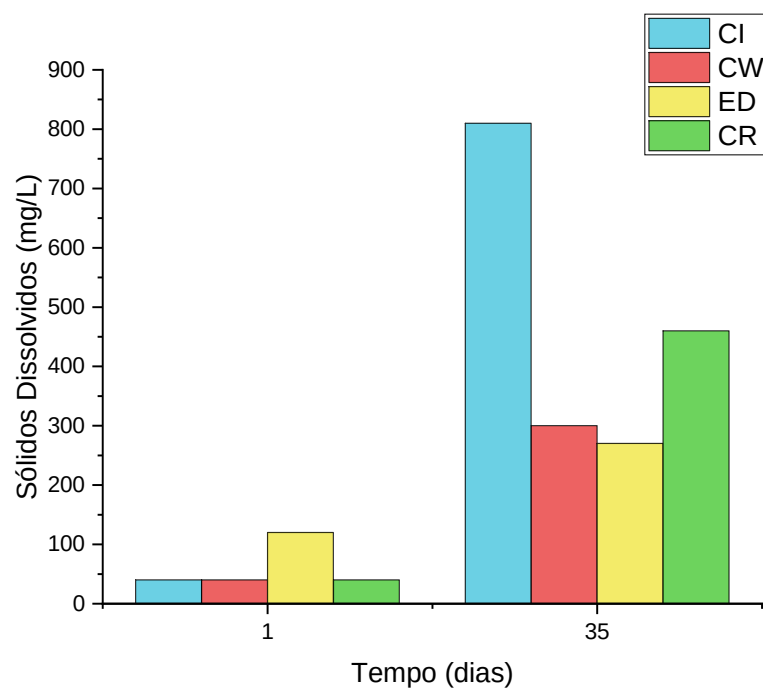
Reposições	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	20
Segunda reposição (14° dia)	60
Terceira reposição (21° dia)	20
Quarta reposição (28° dia)	20

Fonte: Elaboração do próprio autor

5.3.11. Sólidos Dissolvidos

As Figuras 99 e 100 apresentam, respectivamente, os resultados para as caixas internas e externas utilizadas no decorrer do primeiro ciclo para os sólidos dissolvidos.

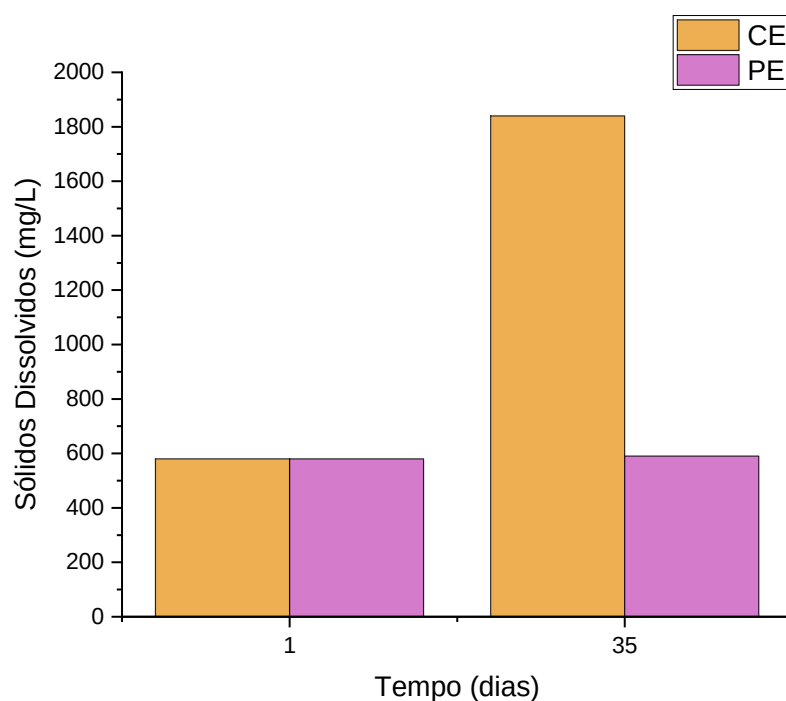
Figura 99 - Resultados SD para as caixas internas do primeiro ciclo da segunda etapa



CI: controle interno; ED: caixa interna com efluente diluído;
 CW: caixa interna contendo apenas Wolffia; CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 100 - Resultados SD para as caixas externas do primeiro ciclo da segunda etapa



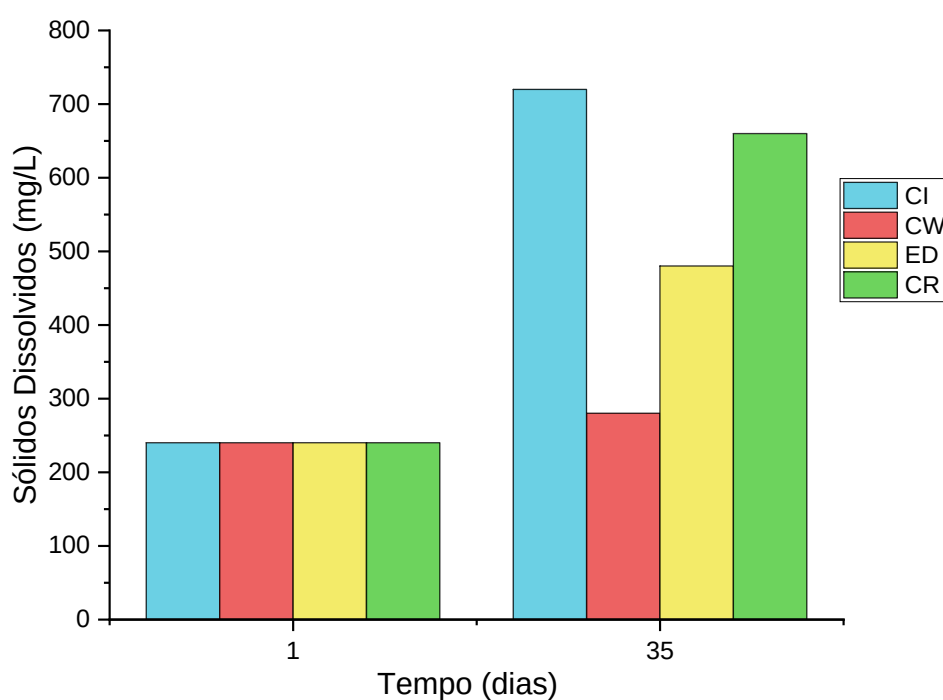
CE: controle externo; PE: caixa externa com a Wolffia.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se um aumento na concentração de sólidos dissolvidos em todas as unidades experimentais utilizadas no primeiro ciclo, entretanto, ambas as formas de controle apresentam maior valor de SD final, quando em comparação com as formas de cultivo de *Wolffia*.

A Figura 101 apresenta os resultados obtidos do SD para as caixas internas utilizadas no decorrer do segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 101 - Resultados SD para as caixas internas do segundo ciclo da segunda etapa



CI: controle interno;

ED: caixa interna com efluente diluído;

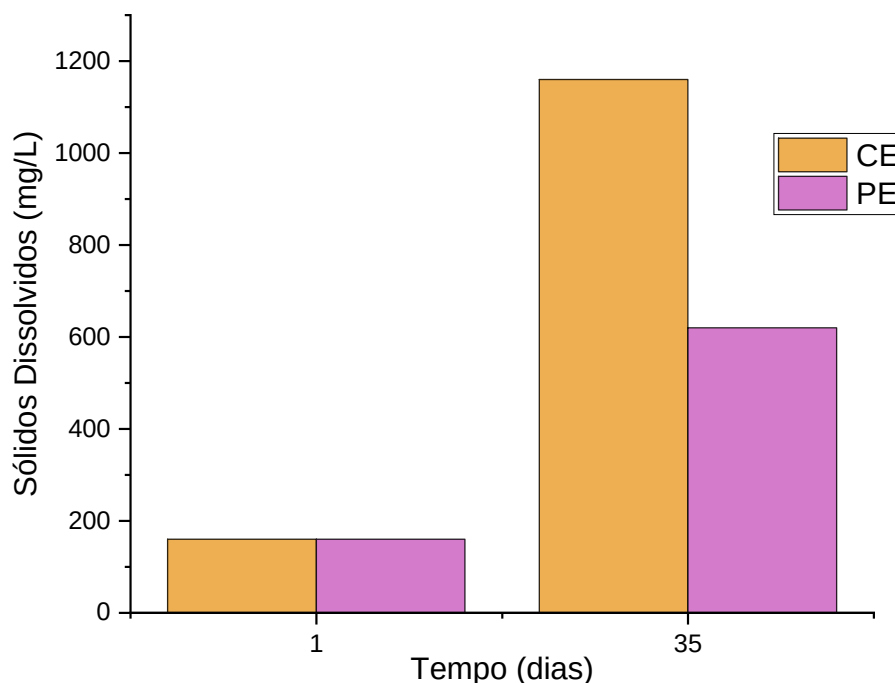
CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 102 contém os resultados para as análises de sólidos dissolvidos das caixas externas utilizadas no segundo ciclo da segunda etapa.

Figura 102 - Resultados SD para as caixas externas do segundo ciclo da segunda etapa



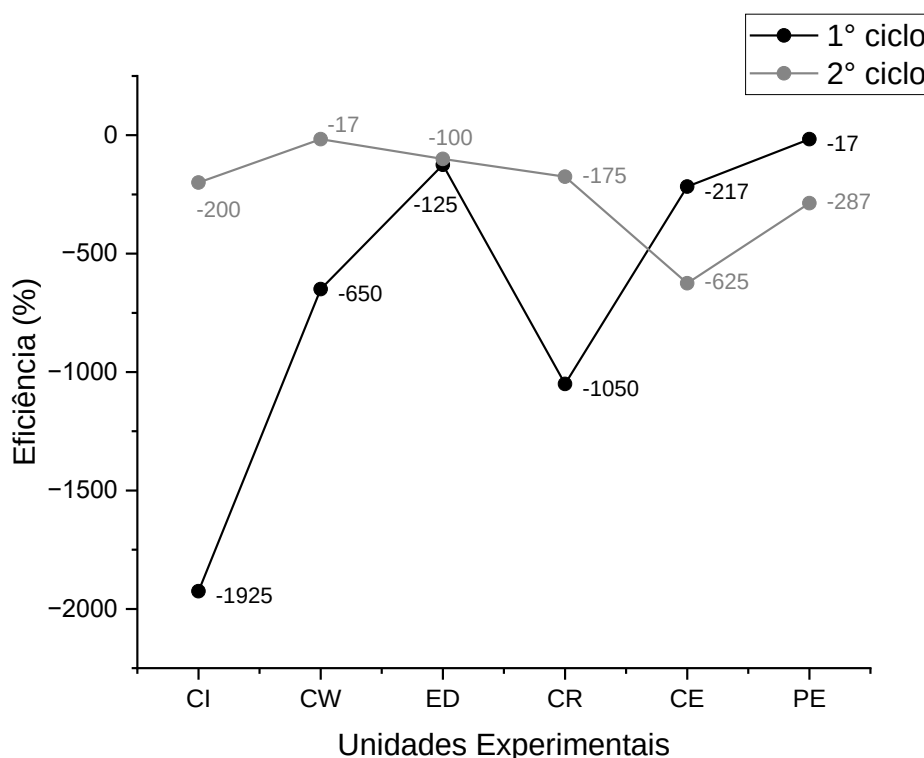
CE: controle externo;
PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante disso, percebe-se um comportamento semelhante entre ambos os ciclos. No decorrer do segundo ciclo, todas as unidades experimentais apresentam aumento na concentração de sólidos dissolvidos, porém, as caixas com o polimento com a *Wolffia* apresentam menor concentração final quando em comparação com as caixas controle.

Os valores de eficiência na remoção de Sólidos Dissolvidos, para ambos os ciclos da segunda etapa, apresentam-se na Figura 103.

Figura 103 – Eficiência observada na remoção de SD em ambos os ciclos da segunda etapa



CI: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação;

CE: controle externo;

PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ademais, assim como em todos os parâmetros analisados, os valores obtidos de SD sofrem influência da reposição semanal de efluente. A quantidade utilizada em cada unidade experimental do primeiro ciclo encontra-se na Tabela 7 e, do segundo ciclo, na Tabela 8. As concentrações de cada efluente de reposição são representadas na Tabela 33 para o primeiro ciclo e Tabela 34 para o segundo.

Tabela 33 - Resultados do SD para o efluente de reposição semanal para o primeiro ciclo

Reposições	Sólidos Dissolvidos (mg/L)
Primeira reposição (7º dia)	170
Segunda reposição (14º dia)	100
Terceira reposição (21º dia)	190
Quarta reposição (28º dia)	660

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 34 - Resultados do SD para o efluente de reposição semanal para o segundo ciclo

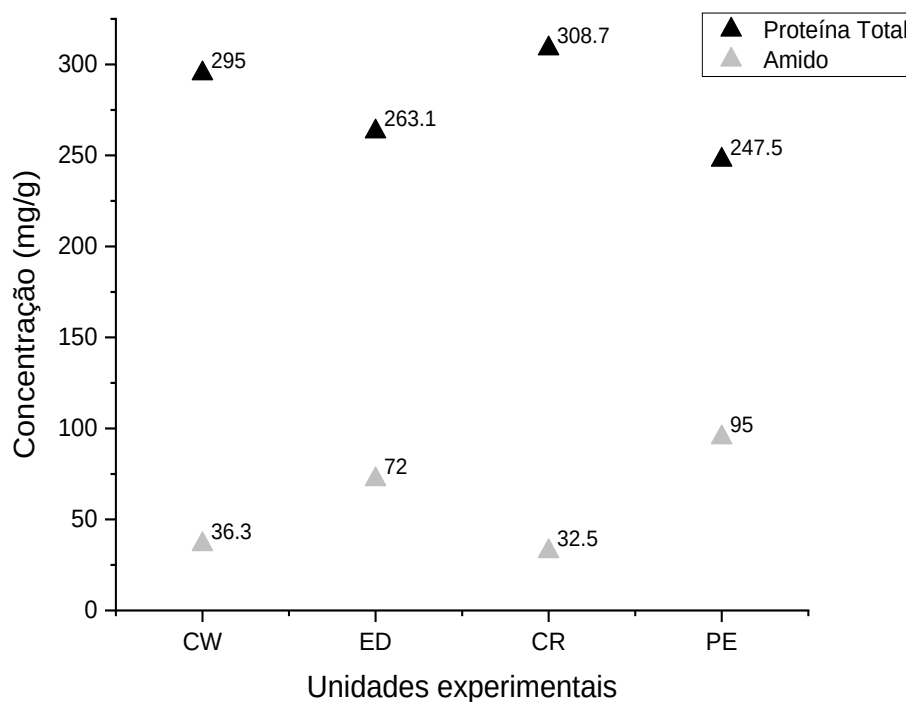
Reposições	Sólidos Dissolvidos (mg/L)
Primeira reposição (7° dia)	540
Segunda reposição (14° dia)	140
Terceira reposição (21° dia)	620
Quarta reposição (28° dia)	580

Fonte: Elaboração do próprio autor

5.3.12. Caracterização da Biomassa

A *Wolffia*, em todas as situações de cultivo, apresentou resultados inconclusivos para a análise de carboidrato total, diante disso, entende-se que o valor seja nulo ou muito próximo de zero.

A Figura 104 apresenta os resultados obtidos na análise da caracterização da biomassa. Abrange os resultados de proteína total e amido para todas as unidades de cultivo de *Wolffia* do segundo ciclo.

Figura 104 – Resultado da caracterização da biomassa da *Wolffia*

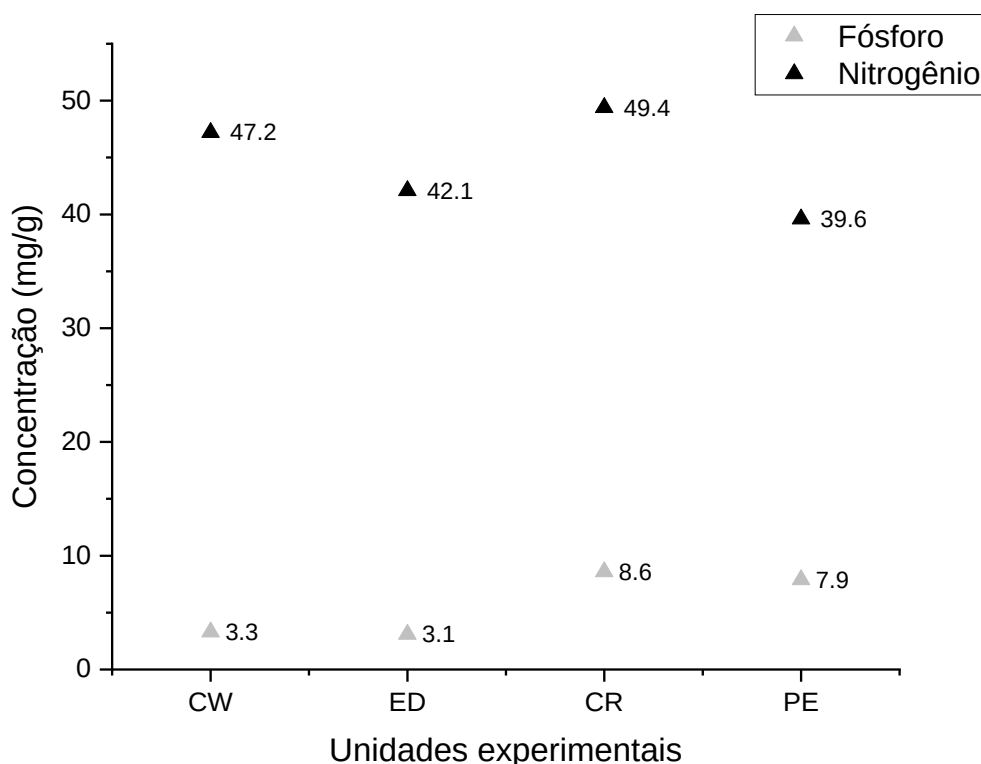
CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*; CR: caixa interna com recirculação;
 ED: caixa interna com efluente diluído; PE: caixa externa com a *Wolffia*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante disso, nota-se uma alta concentração de proteína total em todas as formas de cultivo de *Wolffia*, principalmente quando em comparação a quantidade de amido e carboidrato total. Ademais, nota-se uma maior concentração de proteína e menor de amido nas caixas CW e CR, quando eu comparação as caixas ED e PE.

A Figura 105 apresenta as concentrações de nitrogênio e fósforo encontradas durante a caracterização da biomassa para todas as unidades experimentais do segundo ciclo.

Figura 105 - Resultado da caracterização da biomassa da *Wolffia*



CW: caixa interna contendo apenas <i>Wolffia</i> ;	CR: caixa interna com recirculação;
ED: caixa interna com efluente diluído;	PE: caixa externa com a <i>Wolffia</i> .

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Percebe-se uma elevada quantidade de nitrogênio em todas as unidades experimentais, principalmente quando em comparação ao fósforo.

De acordo com Epstein (1972, 1999), os níveis médios de nitrogênio e fósforo encontrados nos tecidos das plantas e, geralmente, requeridos por elas são por volta de 1,5% para o N e 0,2% para o P (concentração na matéria seca). Nota-se que a caixa CW possui 4,72% de N e 0,33% de P, a caixa ED 4,21% para N e 0,31% para P, a caixa CR 4,94% de N e 0,86% de P e a caixa PE 3,96% para N e 0,79% para P.

Diante disso, identifica-se que a *Wolffia*, para esse experimento, possui elevadas concentrações de fósforo e, principalmente, nitrogênio em sua biomassa quando em comparação a média destes elementos encontrados em outras plantas.

5.4 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

Durante a terceira etapa, realizou-se a reposição do efluente que evapora das caixas de cultivo. A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos de cada efluente de reposição para os parâmetros pH, OD, DQO, DBO, NT, PT, ST, SST e SD.

Tabela 35 – Parâmetros analisados para efluentes de reposição

Parâmetros	7° dia	11° dia	14° dia	21° dia	28° dia
pH	6,81	7,06	6,68	6,70	7,01
OD (mg/L)	3,0	2,1	3,0	2,9	3,1
Turbidez (NTU)	96	122	118	134	96
DQO (mg/L)	196	291	178	384	271
DBO (mg/L)	40,13	49,46	69,32	66,89	61,21
NT (mg/L N)	5,89	7,33	7,41	7,82	6,37
PT (mg/L P)	3,26	3,18	3,21	3,18	3,08
ST (mg/L)	580	420	720	700	620
SST (mg/L)	40	140	300	340	300
SD (mg/L)	540	280	420	360	320

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 36 apresenta os resultados das quantidades de reposição necessárias para cada unidade experimental. Nota-se uma maior quantidade de efluente em todas as unidades externas quando em comparação as internas, o que pode ser causado pela presença direta da luz solar e pela elevada temperatura ambiente observada.

Tabela 36 – Quantidades necessárias para reposição do efluente

Unidades experimentais		Quantidade (mL)				
		7° dia	11°dia	14° dia	21°dia	28°dia
CI	1	-	150	-	150	200
	2	-	150	-	150	200
	3	-	150	-	150	200
CW	1	-	150	-	150	200
	2	-	150	-	150	200
	3	-	150	-	150	200
ED	1	-	150	-	150	200
	2	-	150	-	150	200
	3	-	150	-	150	200
CR	1	-	160	-	160	200
	2	-	160	-	160	200
	3	-	160	-	160	200
CE	1	260	450	350	350	500
	2	260	450	350	350	500
	3	260	450	350	350	500
CWE	1	280	450	350	350	500
	2	280	450	350	350	500
	3	280	450	350	350	500
EDE	1	230	450	350	350	500
	2	230	450	350	350	500
	3	230	450	350	350	500
CRE	1	330	600	400	400	600
	2	330	600	400	400	600
	3	330	600	400	400	600

C: controle interno;
 CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;
 ED: caixa interna com efluente diluído;
 CR: caixa interna com recirculação.

CE: controle externo;
 CWE: caixa externa contendo apenas Wolffia;
 EDE: caixa externa com efluente diluído;
 CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A reposição no 11º dia foi realizada pela grande taxa de evaporação apresentada nos primeiros dias do experimento, principalmente na parte externa ao laboratório.

Além disso, a reposição semanal do efluente interfere em todos os resultados apresentados para a terceira etapa do experimento, podendo causar oscilação nos parâmetros de qualidade da água e autodepuração do efluente.

A discussão da terceira etapa compreende os resultados para:

- CI: a caixa para controle da autodepuração interna;
- CW: a caixa interna que contém a *Wolffia*, o efluente concentrado e não possui bomba de recirculação;
- ED: a caixa interna que contém a *Wolffia* utilizando efluente diluído e não possui bomba de recirculação;
- CR: a caixa interna que contém a *Wolffia*, a bomba de recirculação e o efluente concentrado;
- CE: a caixa controle localizada na parte externa ao laboratório;
- CWE: a caixa externa que possui a *Wolffia*, efluente concentrado e não possui bomba de recirculação;
- EDE: a caixa externa que contém a *Wolffia* utilizando efluente diluído e não possui bomba de recirculação;
- CRE: a caixa externa que contém a *Wolffia*, a bomba de recirculação e o efluente concentrado.

5.4.1. Temperatura ambiente

Os resultados para as temperaturas máxima e mínima, internas e externas ao laboratório, obtidas no decorrer na terceira etapa estão na Tabela 37.

Tabela 37 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de temperatura para a terceira etapa

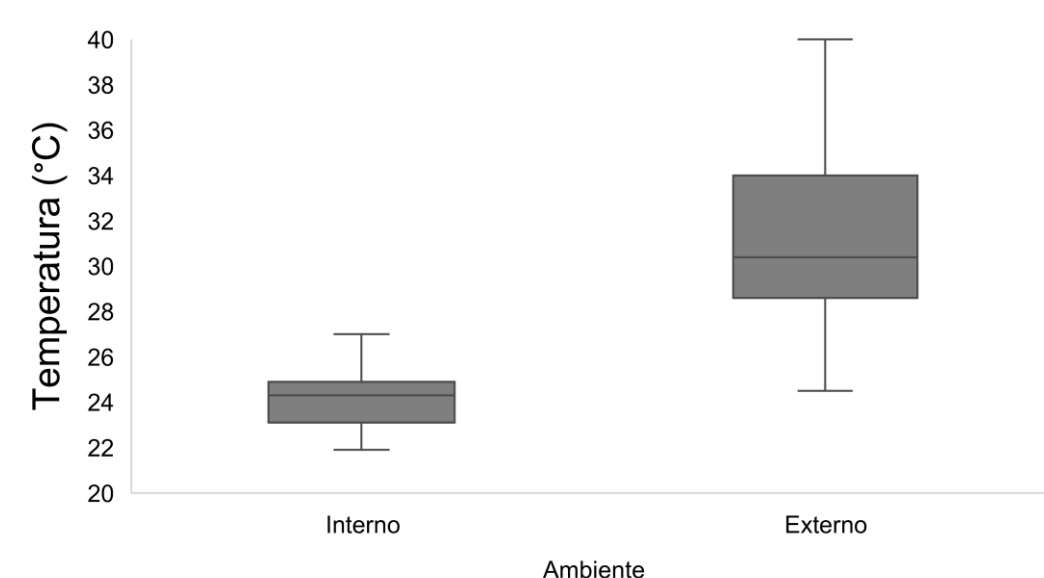
Ambiente	Temperatura (°C)				
	Máxima	Mínima	Média	Mediana	Desv. P.
Interno	32,2	19,9	24	24,3	±1,29
Externo	40,2	20,9	30,9	30,4	±3,50

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As temperaturas médias internas e externas ao laboratório apresentaram diferença significativa entre elas durante os 35 dias de análise, com p-valor de 0,0000. Os parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando $p < 0,05$.

A Figura 106 apresenta os valores obtidos para as temperaturas de ambos os ambientes utilizados em pesquisa para os 35 dias da terceira etapa.

Figura 106 – Temperatura média interna e externa ao laboratório durante a terceira etapa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se uma temperatura significativamente menor no ambiente interno, quando em comparação ao ambiente externo.

5.4.2. *Potencial hidrogeniônico (pH)*

A interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente apresentou diferença significativa em 1% para o parâmetro pH, com valor de F sendo igual a 4,15 e $p < 0,01$. Os valores obtidos para as médias do desdobramento da interação tripla para o pH encontram-se na Tabela 38.

Tabela 38 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para o pH

Dias	pH			
	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1			ns	ns
	CW	ns	7,36aA	7,36aA
	ED	ns	7,36aA	7,36aA
	CR	ns	7,36aA	7,36aA
	C	ns	7,36aA	7,36aA
7			ns	ns
	CW	**	7,70aA	9,82aB
	ED	**	7,65aA	9,38aB
	CR	**	7,61aA	9,86aB
	C	**	7,61aA	9,39aB
14			*	*
	CW	**	8,19bA	10,12bB
	ED	**	7,75aA	9,35aB
	CR	**	7,51aA	9,95bB
	C	**	8,12bA	9,69aB
21			ns	ns
	CW	**	8,30aA	10,25aB
	ED	**	8,13aA	10,48aB
	CR	**	8,31aA	10,34aB
	C	**	8,10aA	9,91aB
28			ns	ns
	CW	**	8,17aA	10,67aB
	ED	**	8,13aA	11,05aB
	CR	**	7,76aA	11,27aB
	C	**	7,93aA	10,76aB
35			**	**
	CW	**	7,42aA	10,85bB
	ED	**	8,20bA	10,13aB
	CR	**	8,28bA	10,95bB
	C	**	7,63aA	11,82cB

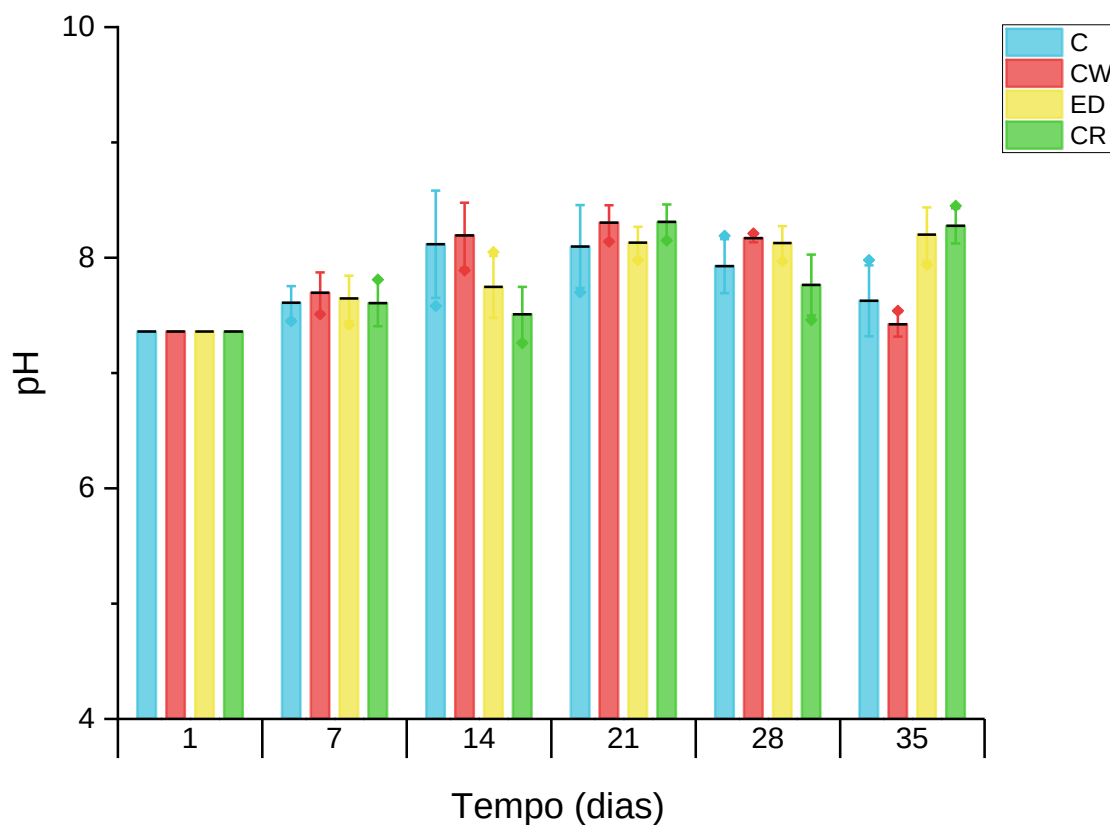
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

De acordo com o observado na Tabela 38, as unidades experimentais internas ao laboratório apresentam diferença significativa das externas a partir do 7º dia.

As Figuras 107 e 108 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo ao laboratório, o comportamento em relação ao pH de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa, com apresentação da média e desvio padrão.

Figura 107 – Valores obtidos para o pH para as unidades experimentais internas ao laboratório



C: controle interno;

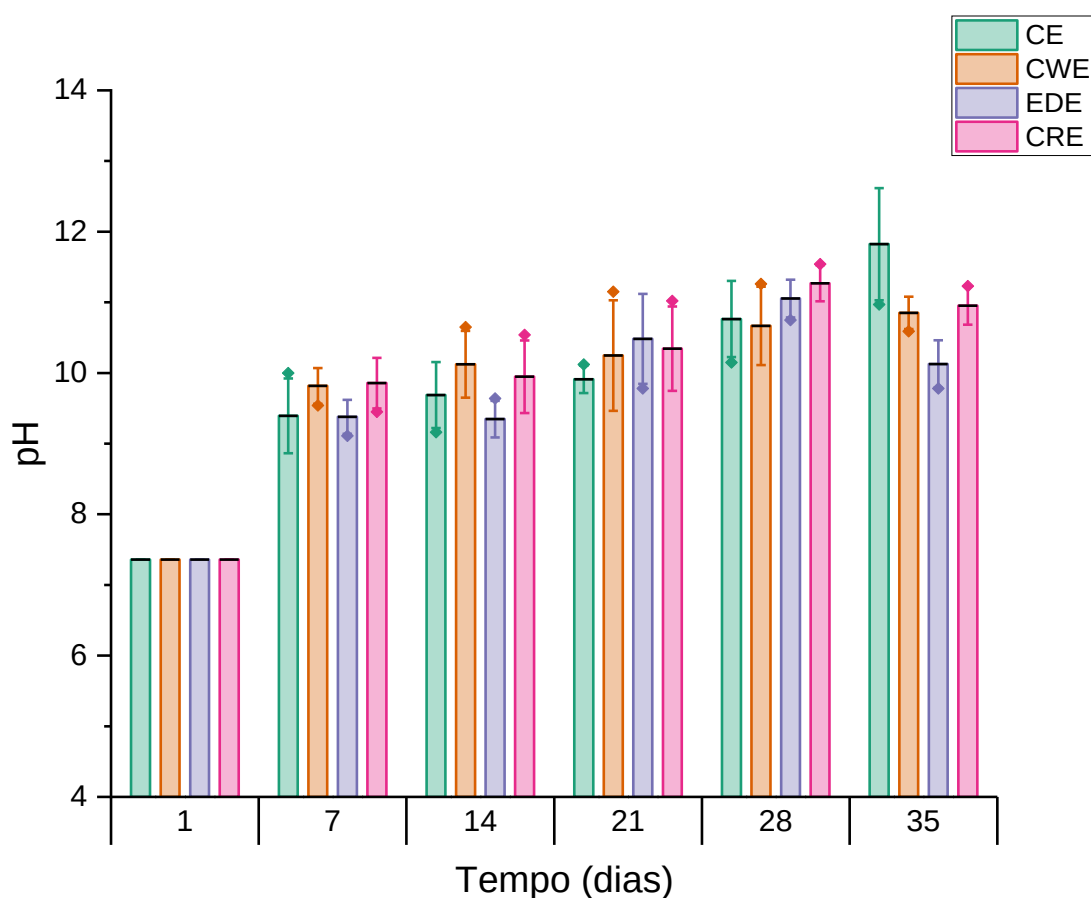
CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 108 - Valores obtidos para o pH para as unidades experimentais externas ao laboratório



CE: controle externo;

CWE: caixa externa contendo apenas Wolffia;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como em ambos os ciclos da segunda etapa, as caixas localizadas na parte externa ao laboratório apresentaram pH elevado quando em comparação as unidades experimentais internas, o que pode ser justificado pela quantidade de algas consideravelmente maior nas caixas externas.

5.4.3. Oxigênio Dissolvido (OD)

Para o oxigênio dissolvido, a interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente apresentou diferença significativa em 1%, com valor de F sendo igual a 2,95 e $p < 0,01$. Os valores obtidos para as médias do desdobramento da interação tripla para o OD encontram-se na Tabela 39.

Tabela 39 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para o OD

Oxigênio Dissolvido (mg/L)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1			ns	ns
	CW	ns	2,00aA	2,00aA
	ED	ns	2,00aA	2,00aA
	CR	ns	2,00aA	2,00aA
7	C	ns	2,00aA	2,00aA
			ns	**
	CW	**	1,90aA	8,63aB
	ED	**	1,63aA	14,23cB
14	CR	**	2,53aA	17,23dB
	C	**	1,80aA	11,50bB
			ns	**
	CW	**	1,86aA	10,93aB
21	ED	**	1,80aA	13,90bB
	CR	**	3,00aA	17,30cB
	C	**	1,90aA	13,53bB
			ns	**
28	CW	**	2,03aA	11,23aB
	ED	**	2,03aA	13,17bB
	CR	**	3,03aA	16,23cB
	C	**	1,47aA	15,17cB
35			ns	**
	CW	**	1,90aA	11,57aB
	ED	**	1,97aA	14,17bB
	CR	**	2,63aA	16,50cB
	C	**	1,60aA	15,83cB
			ns	**
	CW	**	1,90aA	13,37aB
	ED	**	1,83aA	16,17bB
	CR	**	1,30aA	16,57bB
	C	**	2,53aA	15,50bB

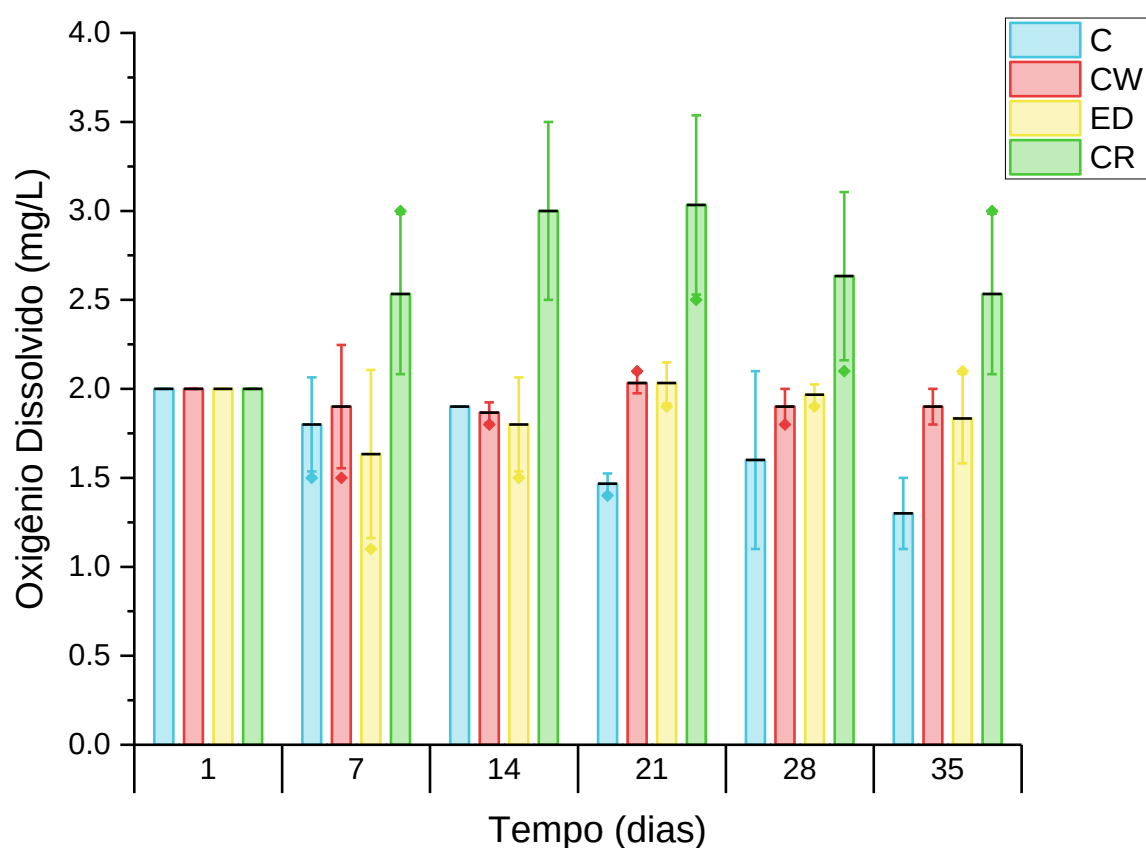
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

De acordo com a Tabela 39, nota-se uma diferença significativa entre todas as unidades experimentais internas e externas a partir do 7º dia de experimento.

As Figuras 109 e 110 apresentam, respectivamente, para o ambiente interno e externo, o comportamento em relação ao Oxigênio Dissolvido em todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa.

Figura 109 - Valores obtidos para o OD para as unidades experimentais internas ao laboratório



C: controle interno;

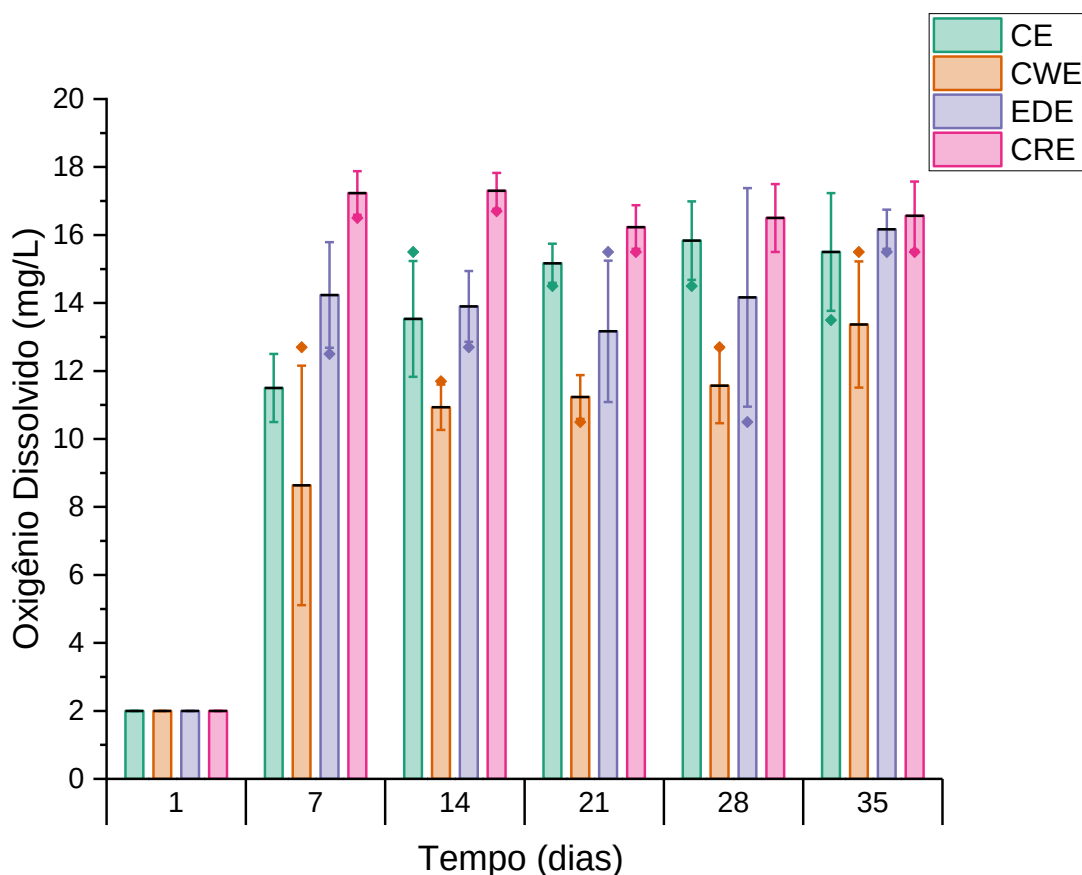
ED: caixa interna com efluente diluído;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 110 - Valores obtidos para o OD para as unidades experimentais externas ao laboratório



CE: controle externo;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;

CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante ao observado nas Figuras 109 e 110, nota-se um comportamento semelhante a segunda etapa em relação ao Oxigênio Dissolvido. As unidades experimentais externas apresentam valores de OD significativamente maiores quando em comparação as unidades experimentais internas a partir do 7º dia de experimento.

5.4.4. Turbidez

Para o parâmetro de turbidez, nota-se que a interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente apresentou diferença significativa em 1%, com valor de F sendo igual a 25,10 e $p < 0,01$. Os valores obtidos para as médias do desdobramento da interação tripla para a turbidez encontram-se na Tabela 40.

Tabela 40 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para a turbidez

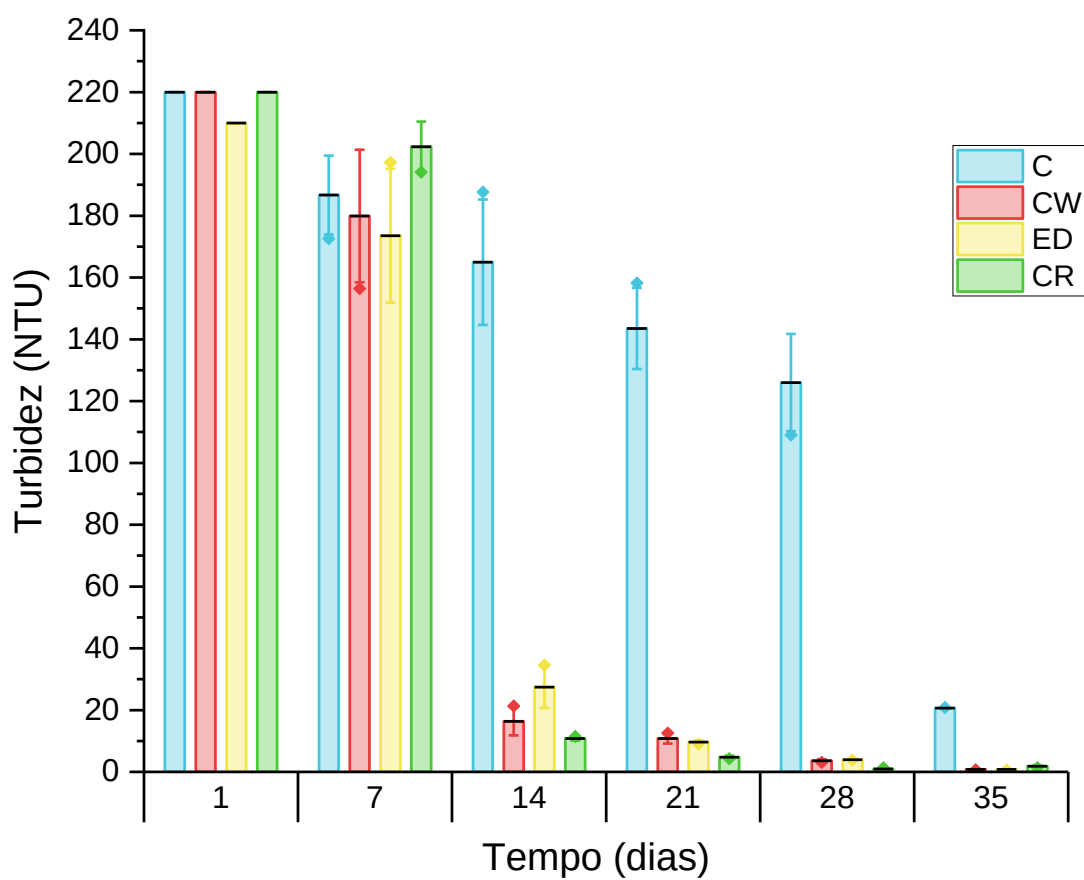
		Turbidez (NTU)		
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1			ns	ns
	CW	ns	220,00aA	220,00aA
	ED	ns	210,00aA	210,00aA
	CR	ns	220,00aA	220,00aA
	C	ns	220,00aA	220,00aA
7			**	*
	CW	**	179,87aA	204,68bB
	ED	**	173,52aA	210,54bB
	CR	ns	202,33bA	195,29aA
	C	ns	186,66aA	190,46aA
14			**	**
	CW	**	16,39aA	100,57cB
	ED	ns	27,43aA	25,39bA
	CR	ns	10,77aA	10,46aA
	C	ns	164,97bA	161,64dA
21			**	**
	CW	**	10,78aA	71,09bB
	ED	ns	9,66aA	11,65aA
	CR	ns	4,79aA	4,80aA
	C	ns	143,52bA	154,77cA
28			**	**
	CW	**	3,61aA	59,67bB
	ED	ns	3,95aA	9,92aA
	CR	ns	0,96aA	2,42aA
	C	**	126,00bA	157,47cB
35			*	**
	CW	ns	0,80aA	12,90aA
	ED	ns	0,80aA	5,31aA
	CR	ns	1,81aA	0,76aA
	C	**	20,63bA	148,24bB

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

As Figuras 111 e 112 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo ao laboratório, o comportamento em relação a turbidez das unidades experimentais da terceira etapa.

Figura 111 - Valores obtidos da turbidez para as unidades experimentais internas ao laboratório.



C: controle interno;

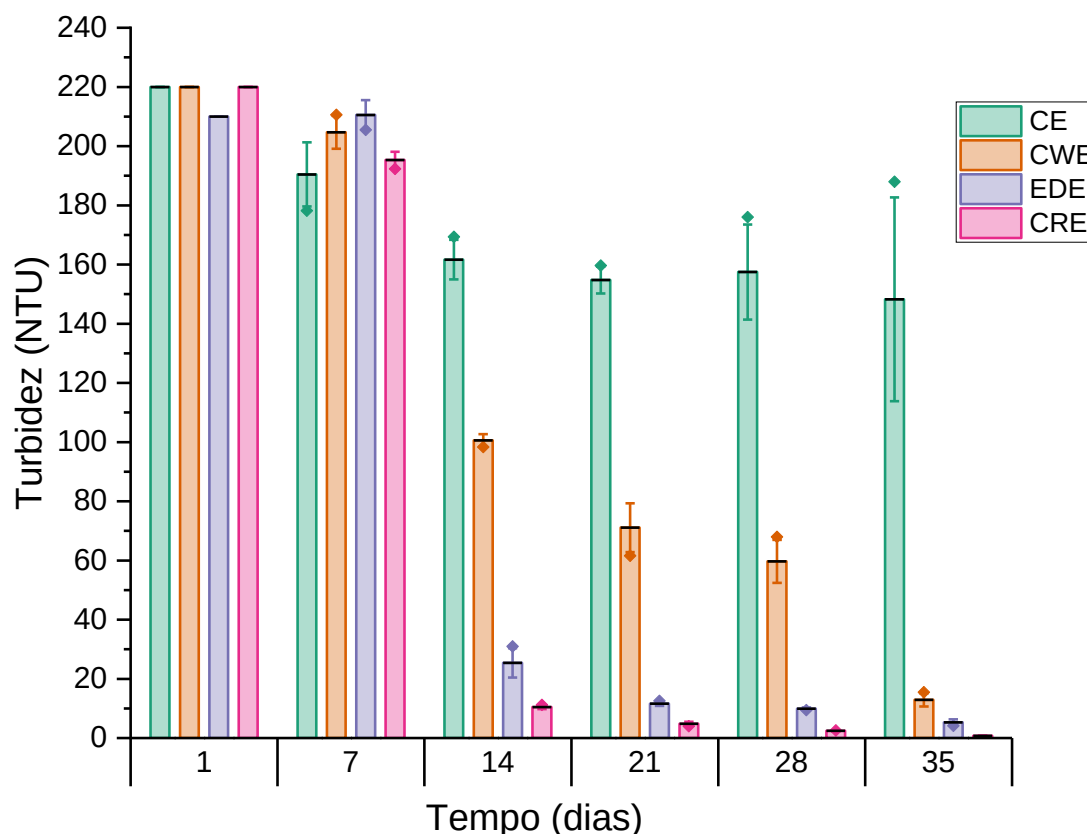
CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 112- Valores obtidos da turbidez para as unidades experimentais externas ao laboratório



CE: controle externo;

CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CRE: caixa externa com recirculação.

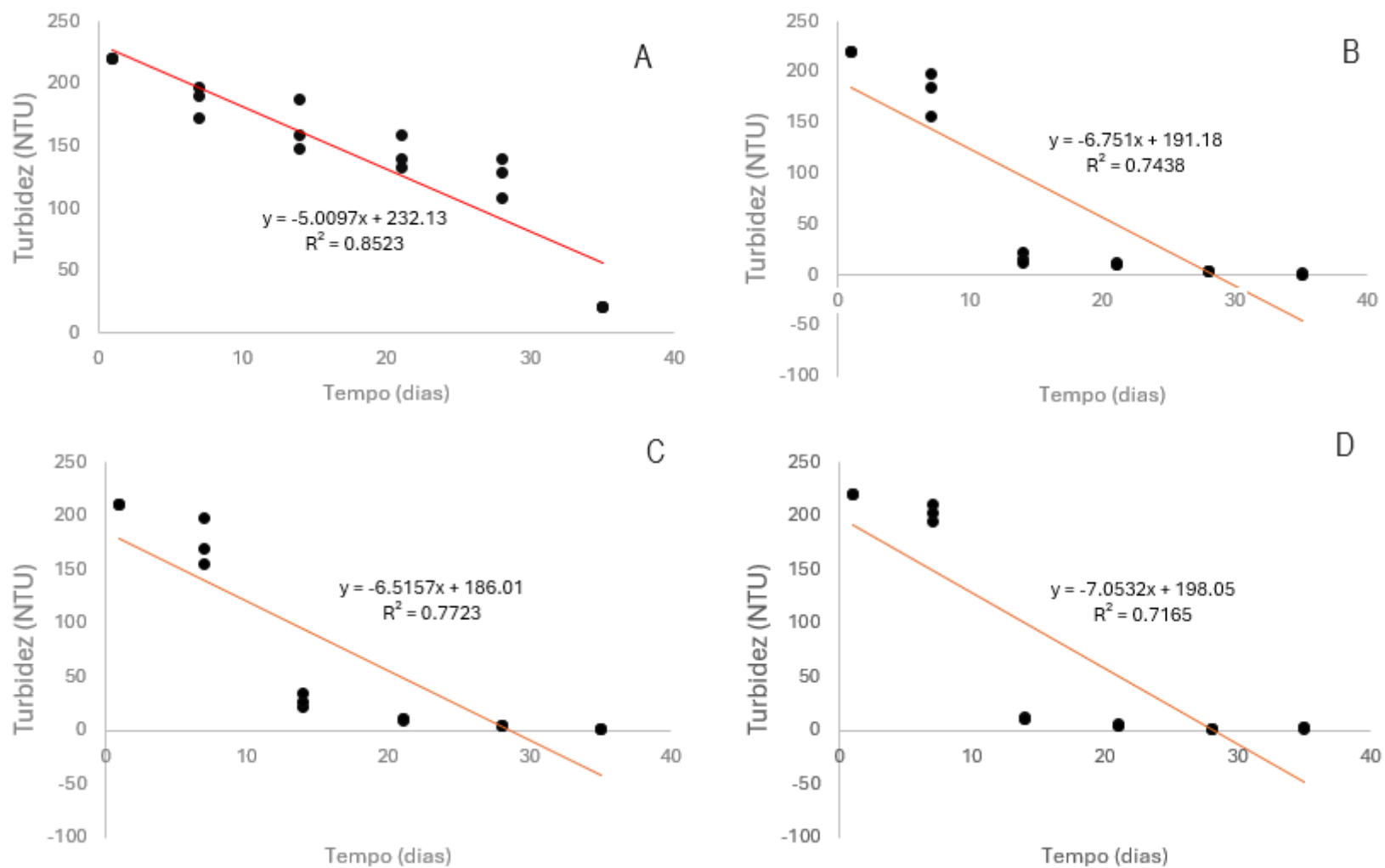
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se uma maior capacidade de remoção de turbidez em todas as unidades experimentais que contém a *Wolffia* como forma de polimento quando em comparação as caixas controle.

De acordo com a Tabela 40, nota-se diferença significativa entre as unidades experimentais externas e internas apenas nos dias 7, para as unidades experimentais CW e ED, 14 e 21 apenas para a CW, 28 para CW e C e 35 para C. Nos demais dias e unidades experimentais, observa-se semelhança entre o comportamento dos ambientes.

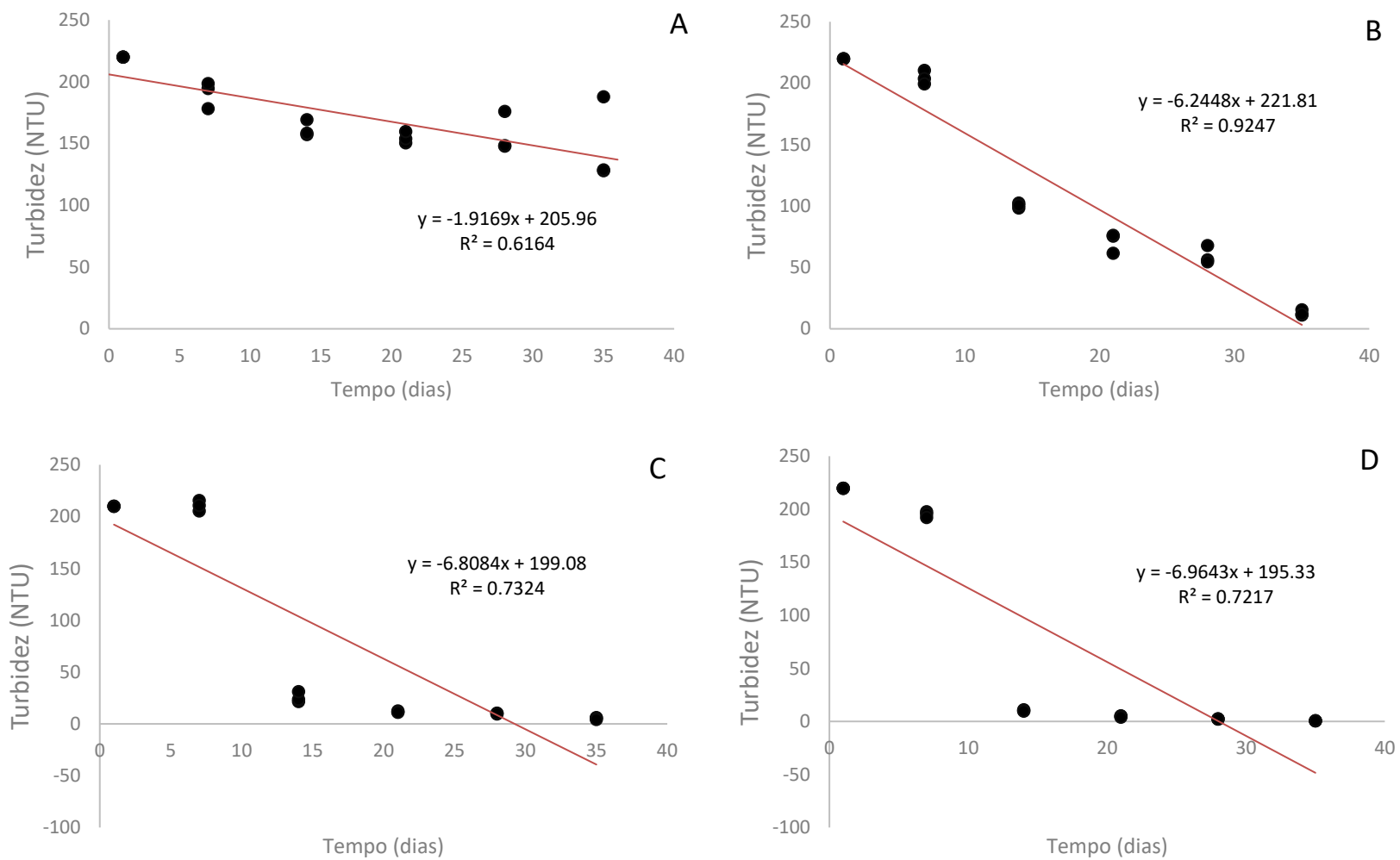
Além disso, todas as unidades experimentais apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para a avaliação do tempo. As Figuras 113 e 114 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo, a regressão linear para as unidades experimentais, para os 35 dias de análise.

Figura 113 - Regressão linear observada para o parâmetro de turbidez para as unidades experimentais CI (A), CW (B), ED (C) e CR (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 114 – Regressão linear observada para o parâmetro de turbidez para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 41 apresenta os valores de eficiência calculados para as unidades experimentais, contendo os valores para as três repetições utilizadas para cada tratamento, a média e o desvio padrão.

Tabela 41 – Eficiências de remoção de turbidez para unidades experimentais da terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	90,68	90,51	90,68	90,62	±0,10
CW	99,58	99,63	99,70	99,64	±0,06
ED	99,60	99,57	99,70	99,62	±0,07
CR	99,03	99,38	99,12	99,18	±0,18
CE	41,82	41,49	14,55	32,62	±15,65
CWE	94,86	92,95	94,59	94,14	±1,03
EDE	97,07	97,32	98,02	97,47	±0,49
CRE	99,65	99,68	99,63	99,65	±0,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se uma maior eficiência na remoção da turbidez em todas as caixas que contém a *Wolffia* como forma de polimento do efluente quando em comparação as caixas utilizadas como controle. As três unidades experimentais de cultivo da planta externas apresentam diferença significativa de 1%, com $p < 0,01$, sobre a caixa controle externa, entretanto, as unidades experimentais internas não apresentam diferença significativa entre si, com $p > 0,05$.

Ademais, as caixas de cultivo interno e externo não apresentam alteração significativa na eficiência, no entanto, as caixas utilizadas como forma de controle apresentam diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$.

5.4.5. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente apresentou diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$ e F sendo igual a 61,59 para o parâmetro de DQO. A Tabela 42 apresenta os valores obtidos para as médias do desdobramento da interação tripla para a Demanda Química de Oxigênio.

Tabela 42 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para a DQO.

(continua)

Demanda Química de Oxigênio (mg/L)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1	CW	ns	** 343bA	** 343bA
	ED	ns	305aA	305aA
	CR	ns	371cA	371cA
	C	ns	343bA	343bA
3	CW	**	** 120aA	** 230aB
	ED	**	129aA	229aB
	CR	**	213bA	453cB
	C	**	230bA	322bB
5	CW	**	** 199aA	** 328bB
	ED	**	235bA	260aB
	CR	**	255bA	425cB
	C	**	310cA	536dB
8	CW	**	** 237bA	** 318bB
	ED	ns	226bA	234aA
	CR	**	195aA	419cB
	C	**	255cA	543dB
10	CW	**	** 218bA	** 313bB
	ED	ns	201aA	217aA
	CR	**	184aA	437cB
	C	**	244cA	758dB
12	CW	**	** 198aA	** 307bB
	ED	*	186aA	209aB
	CR	**	173aA	427cB
	C	**	228bA	700dB

Tabela 42 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para a DQO

(continuação)

Demanda Química de Oxigênio (mg/L)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
15	CW	**	188bA	300bB
	ED	ns	180bA	190aA
	CR	**	158aA	413cB
	C	**	236cA	700dB
17	CW	**	123aA	278bB
	ED	ns	123aA	133aA
	CR	**	106aA	408cB
	C	**	231bA	650dB
19	CW	**	105aA	266bB
	ED	ns	114aA	122aA
	CR	**	103aA	390cB
	C	**	309bA	680dB
22	CW	**	100aA	256bB
	ED	ns	110aA	117aA
	CR	**	98aA	355cB
	C	**	291bA	683dB
24	CW	**	91aA	212bB
	ED	ns	101aA	109aA
	CR	**	91aA	245cB
	C	**	300bA	680dB
26	CW	**	100aA	211bB
	ED	ns	108aA	107aA
	CR	**	100aA	193bB
	C	**	297bA	674cB

Tabela 42 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para a DQO

(conclusão)

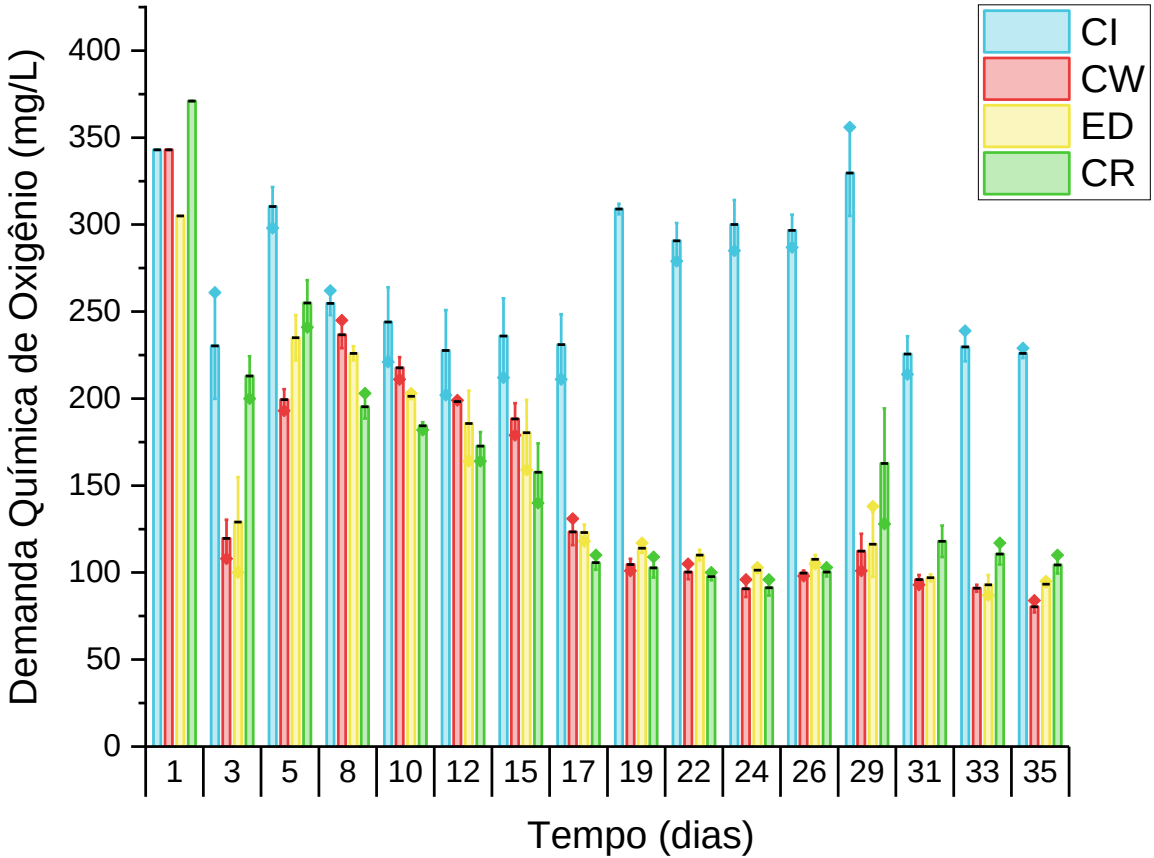
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
29	CW	**	112aA	247cB
	ED	ns	116aA	129aA
	CR	ns	163bA	173bA
	C	**	330cA	563dB
31	CW	**	96aA	135bB
	ED	ns	97aA	109aA
	CR	**	118bA	152bB
	C	**	226cA	555cB
33	CW	**	91aA	113aB
	ED	ns	93aA	102aA
	CR	**	111aA	141bB
	C	**	230bA	544cB
35	CW	ns	80aA	92aA
	ED	ns	93aA	82aA
	CR	**	104aA	121bB
	C	ns	226bA	487cA

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

A Figura 115 apresenta o comportamento para a DQO observada para as unidades experimentais internas utilizadas durante a terceira etapa.

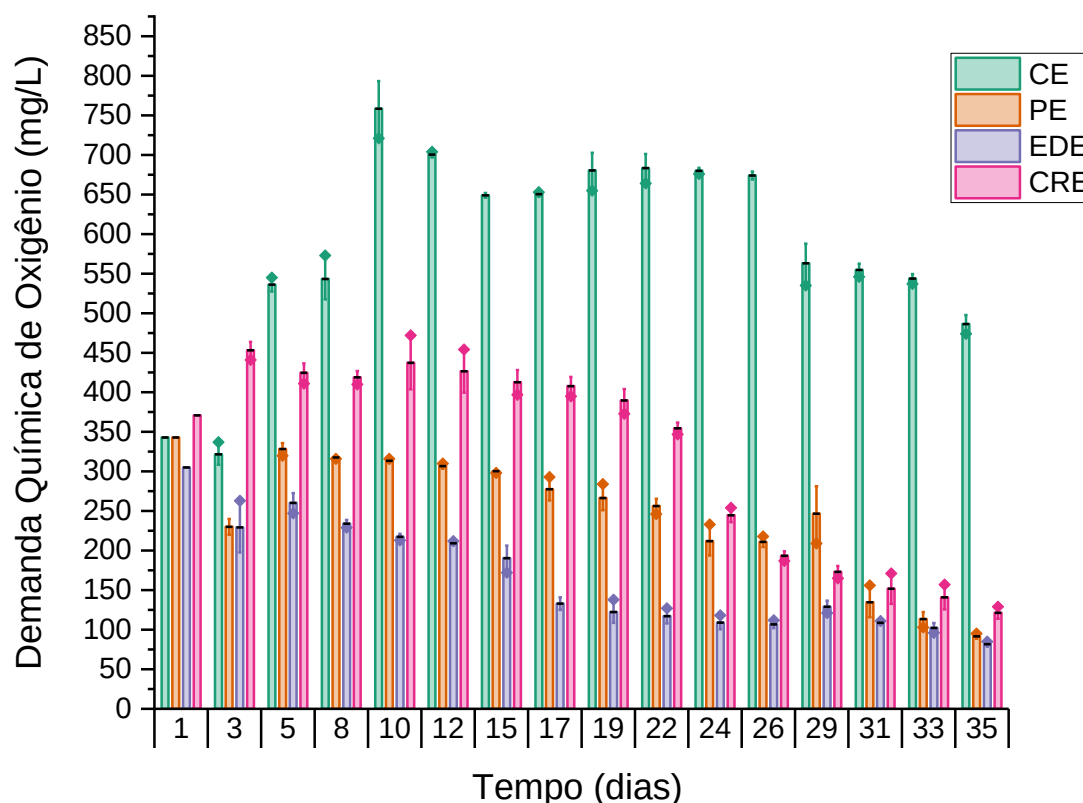
Figura 115 - Valores obtidos de DQO para as unidades experimentais internas ao laboratório



C: controle interno; ED: caixa interna com efluente diluído;
CW: caixa interna contendo apenas Wolffia; CR: caixa interna com recirculação.
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 116 apresenta o comportamento para a DQO observada para as unidades experimentais externas utilizadas durante a terceira etapa.

Figura 116 - Valores obtidos de DQO para as unidades experimentais externas ao laboratório



CE: controle externo;

CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CRE: caixa externa com recirculação.

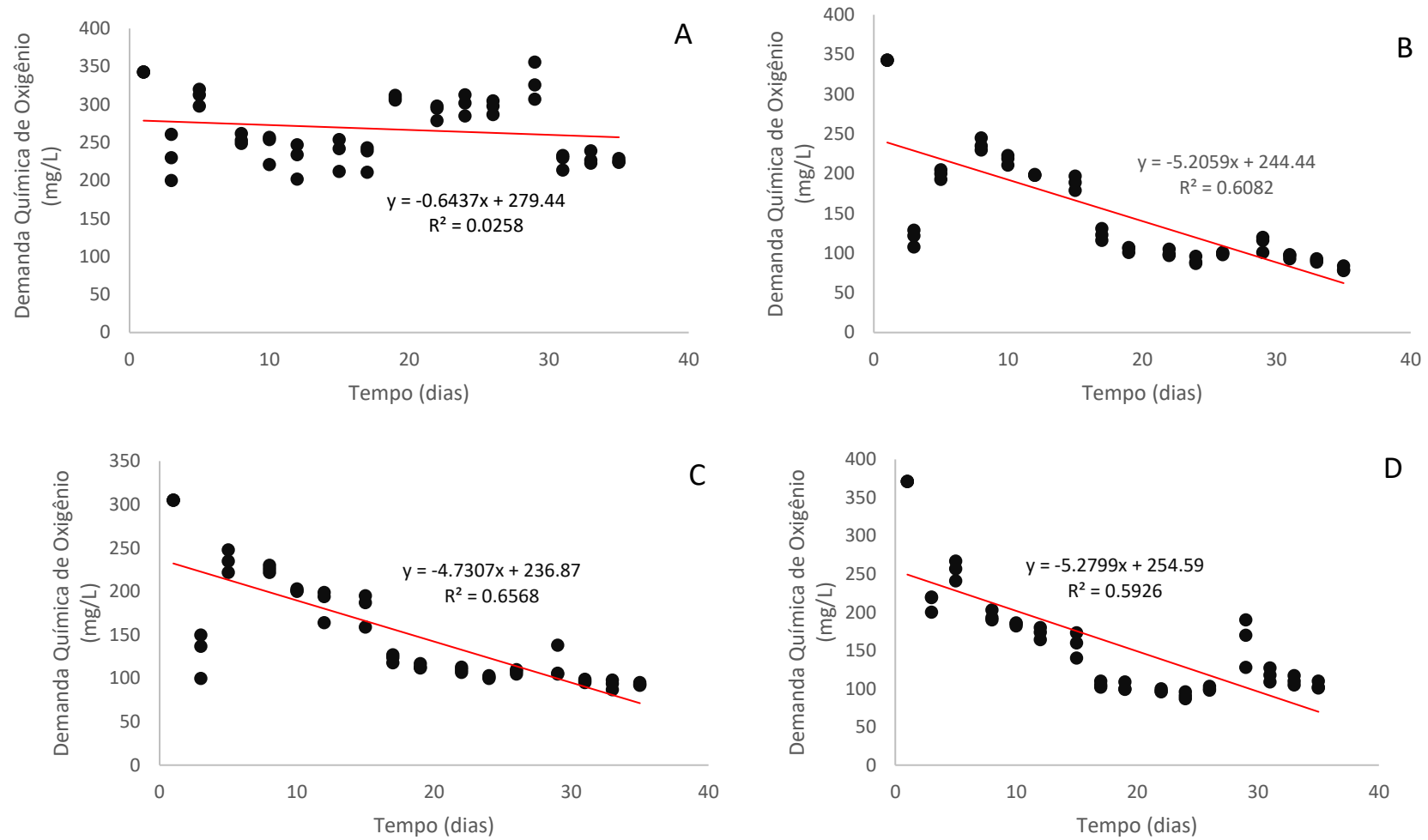
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como indicam as Figuras 115 e 116, todas as unidades experimentais que possuem a *Wolffia* como forma de polimento apresentam maior capacidade de remoção de DQO, quando em comparação a ambas as caixas utilizadas como controle.

De acordo com a Tabela 42, as unidades internas apresentam diferença significativa sobre as externas em grande parte do experimento, com exceção da caixa ED (efluente diluído), a qual apresentou diferença significativa em apenas três dias de análise. Nota-se uma influência considerável do ambiente na remoção da DQO.

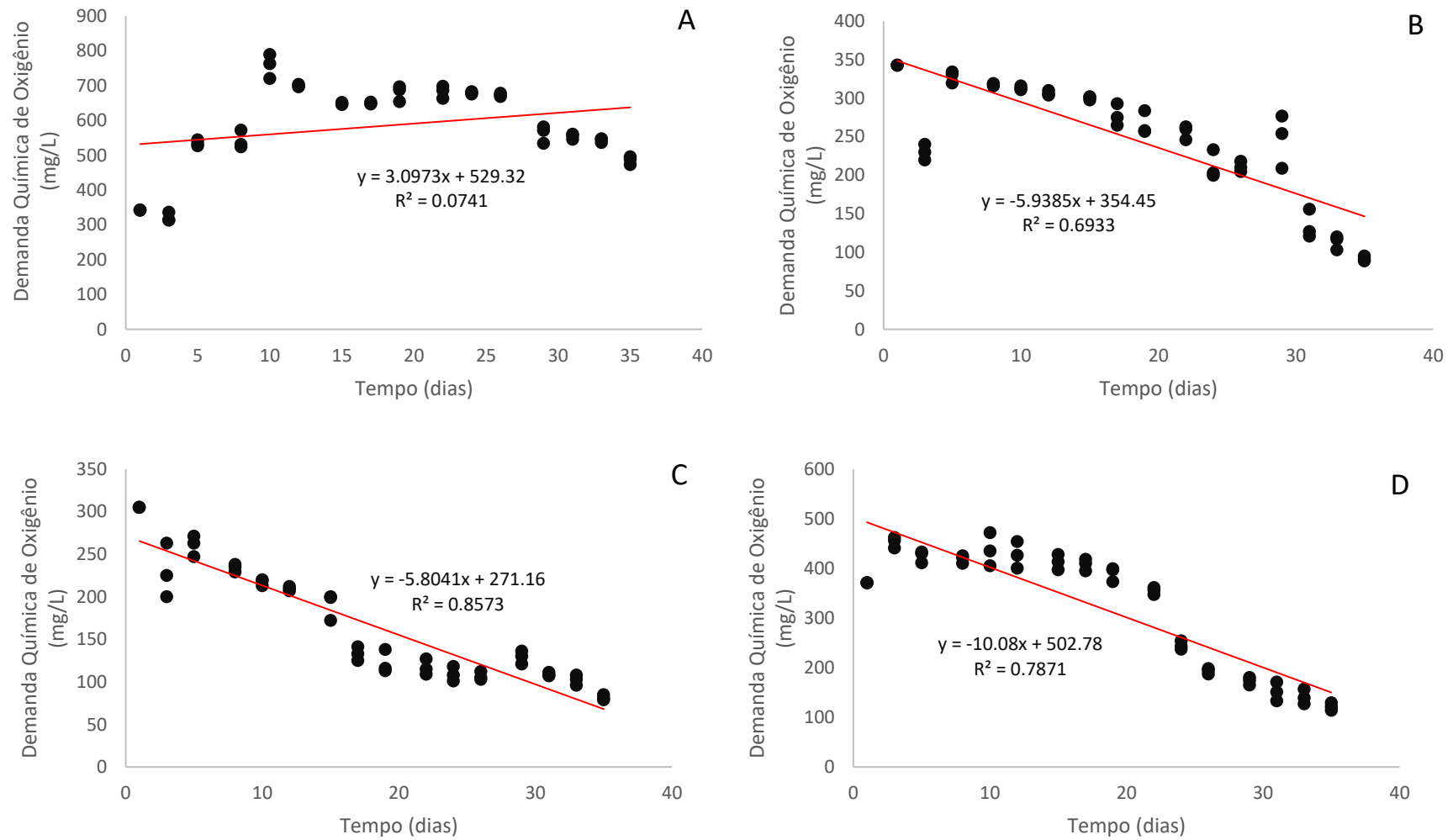
Ademais, todas as unidades experimentais apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para a avaliação sobre o tempo. As Figuras 117 e 118 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo, a regressão linear para as unidades experimentais, para os 35 dias de análise.

Figura 117 - Regressão linear observada para o parâmetro de DQO para as unidades experimentais C (A), CW (B), ED (C) e CR (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 118 - Regressão linear observada para o parâmetro de DQO para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 43 apresenta os valores calculados para eficiência na remoção da DQO de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa, contém os valores para as três repetições de cada tratamento, assim como sua média e desvio padrão.

Tabela 43 – Eficiências de remoção de DQO para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	34,40	34,69	33,24	34,11	±0,77
CW	75,51	77,26	76,97	76,58	±0,94
ED	69,51	68,85	69,84	69,40	±0,50
CR	72,51	70,35	72,78	72,88	±1,33
CE	-42,57	-38,19	-44,60	-41,80	±3,28
CWE	72,30	73,47	74,05	73,27	±0,89
EDE	73,44	74,10	72,13	73,22	±1,00
CRE	69,27	67,38	65,22	67,30	±2,02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se um maior valor de eficiência para todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, quando em comparação as caixas utilizadas como forma de controle. Ambas as formas de cultivo, tanto internamente quanto externamente, apresentam diferença significativa de 1%, com $p < 0,01$, sobre a caixa controle. Além disso, as caixas internas ED e CW apresentaram diferença significativa sobre a caixa CR, assim como a caixa externa CWE apresentou diferença significativa sobre as demais.

Diante disso, nota-se, em ambas as formas de cultivo, um melhor desempenho da caixa contendo apenas a *Wolffia* como polimento remoção da DQO.

Ademais, as caixas C (controle), CR (com recirculação) e ED (efluente diluído) apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, em relação ao ambiente, enquanto a caixa CW (contendo apenas a *Wolffia*) apresentou diferença significativa de 5%, com $p < 0,05$.

5.4.6. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Tabela 44 apresenta os valores obtidos para as médias do desdobramento da interação tripla entre tratamento, ambiente e dia, com diferença significativa em 1%, sendo F igual a 61,58 e $p < 0,01$, para a DBO.

Tabela 44 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para a DBO

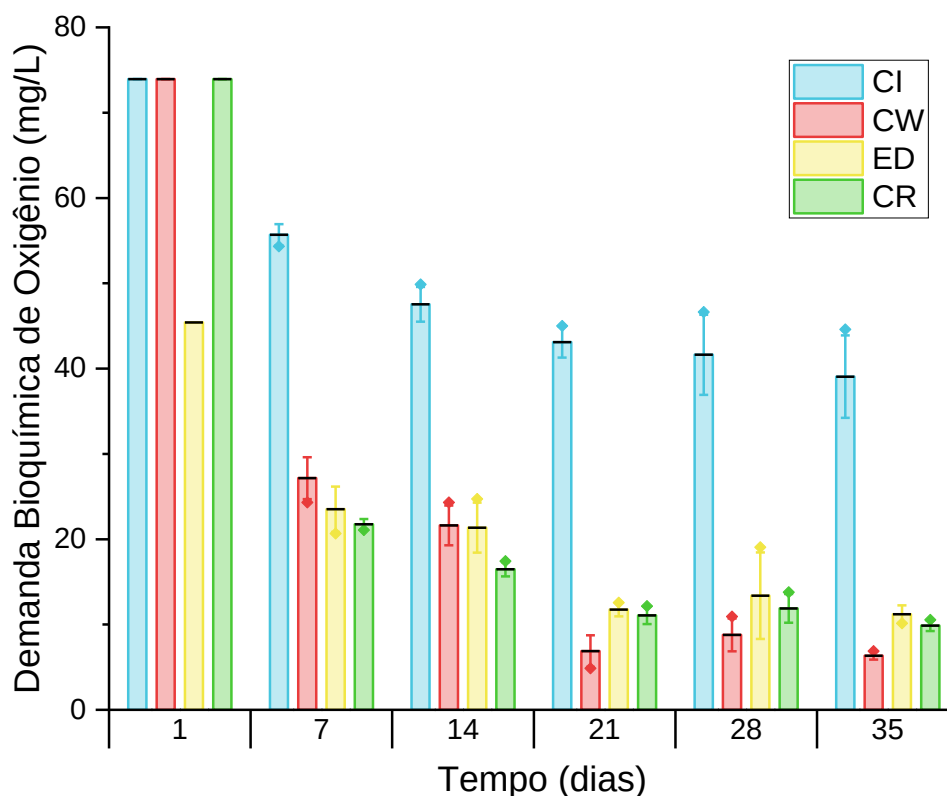
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1	CW	ns	** 7394bA	** 7394bA
	ED	ns	45,41aA	45,41aA
	CR	ns	73,94bA	73,94bA
	C	ns	73,94bA	73,94bA
7	CW	**	** 27,16bA	** 43,10aB
	ED	**	23,51aA	58,66bB
	CR	**	21,76aA	76,76cB
	C	**	55,68cA	87,29dB
14	CW	**	** 21,61bA	** 33,65aB
	ED	**	21,35bA	43,92bB
	CR	**	16,48aA	46,35bB
	C	**	47,54cA	86,34cB
21	CW	**	** 6,89aA	** 16,35aB
	ED	ns	11,76bA	15,54aB
	CR	**	11,08bA	27,03bB
	C	**	43,11cA	103,50cB
28	CW	**	** 17,03aA	** 17,03aB
	ED	ns	13,38aA	16,90aA
	CR	**	11,89aA	28,92bB
	C	**	41,63bA	103,51cB
35	CW	**	** 6,35aA	** 14,32aB
	ED	ns	11,21bA	13,65aA
	CR	**	9,89bA	27,85bB
	C	**	39,06cA	97,56cB

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

A Figura 119 apresenta, para o ambiente interno, o comportamento para o parâmetro de DBO para todas as unidades experimentais.

Figura 119 – Resultados para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais internas da terceira etapa



C: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

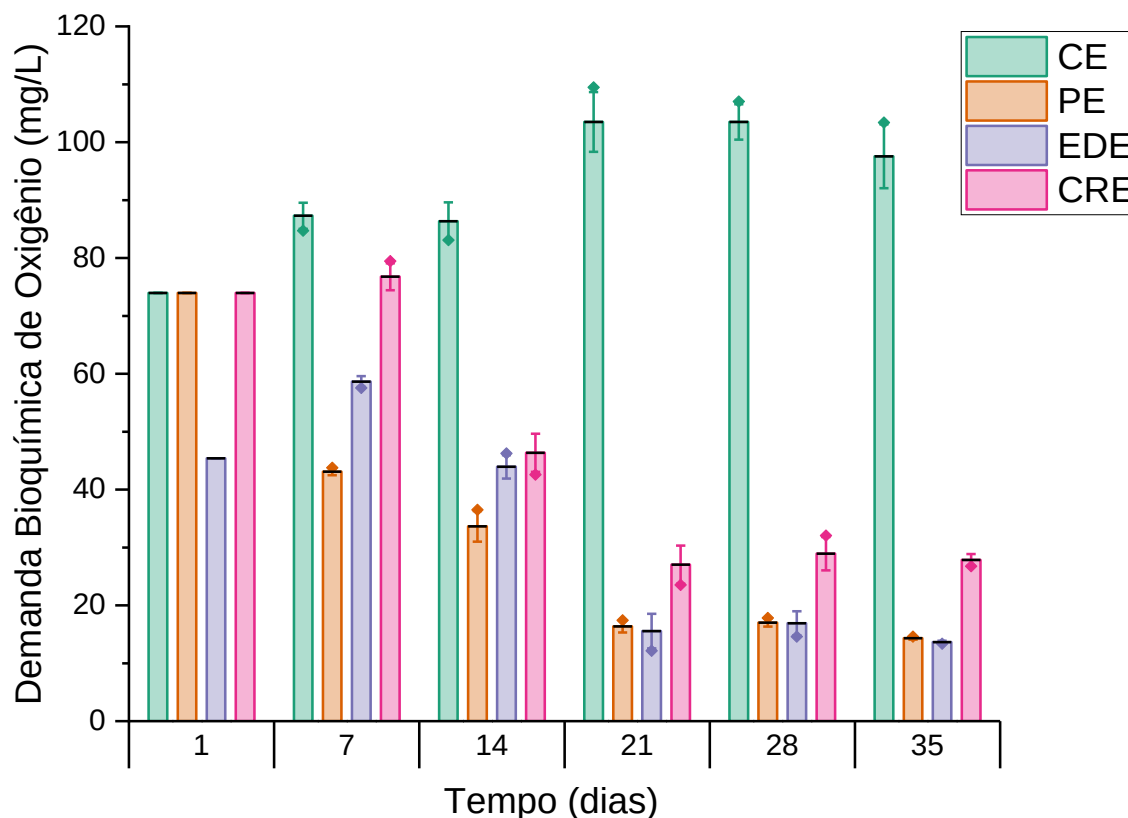
ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 120 apresenta o comportamento em relação ao parâmetro de DBO para as unidades experimentais externas utilizadas durante a terceira etapa.

Figura 120 - Resultados para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais internas da terceira etapa



CE: controle externo;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;

CRE: caixa externa com recirculação.

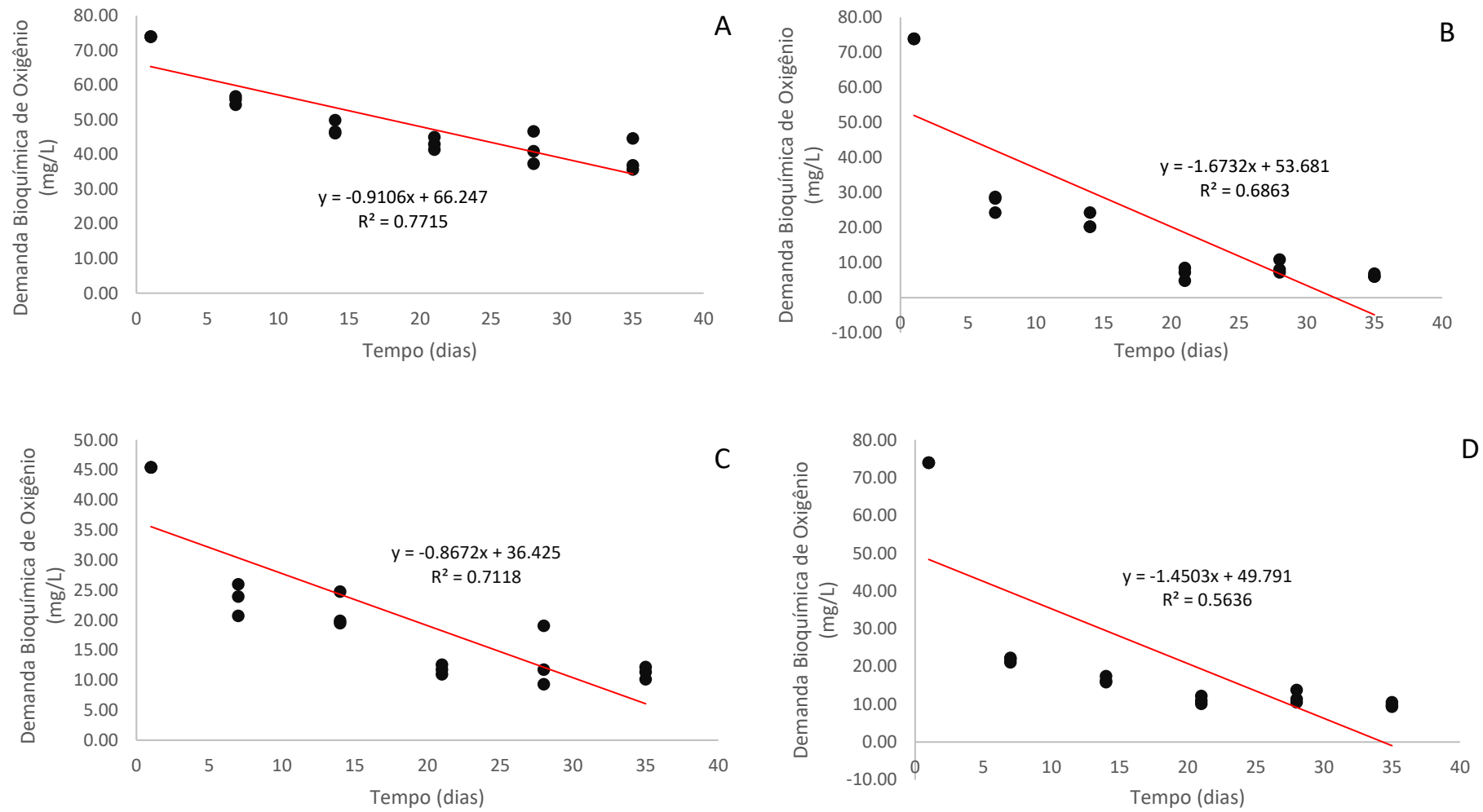
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao final dos 35 dias de experimento, todas as unidades experimentais que possuem a *Wolffia* como forma de polimento apresentaram menor concentração de DBO, o que indica maior capacidade de remoção quando em comparação as caixas utilizadas como controle.

Nota-se, por meio dos dados a Tabela 44, que, a partir do 7º dia, todas as unidades experimentais internas apresentam diferença significativa sobre as externas, com exceção da caixa ED (efluente diluído), a qual apresentou comportamento semelhante em ambos os ambientes.

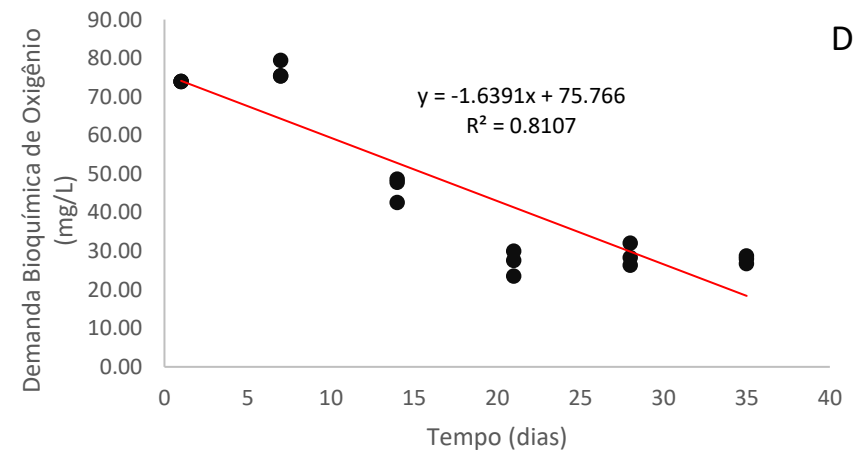
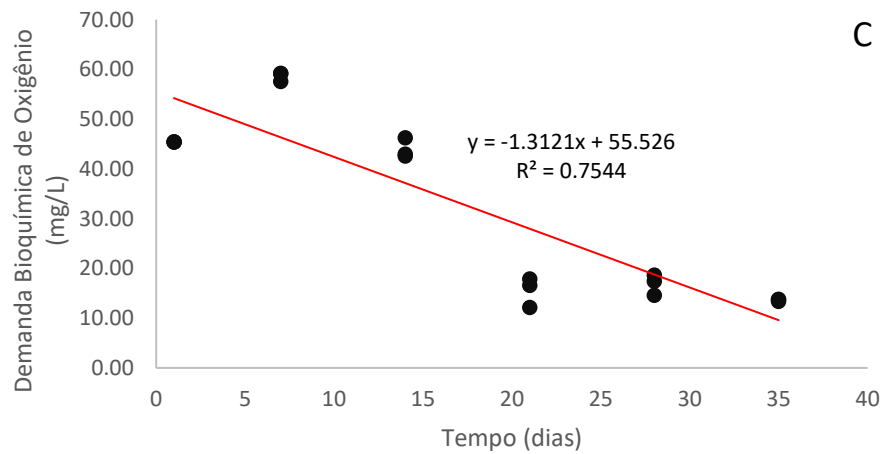
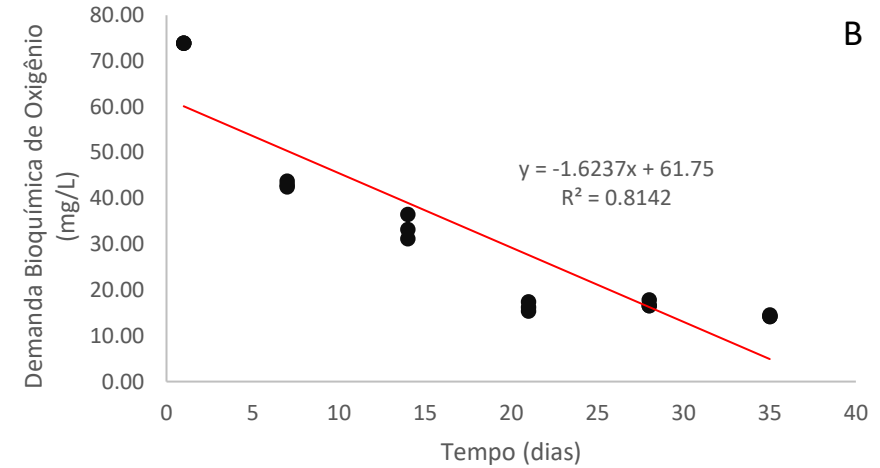
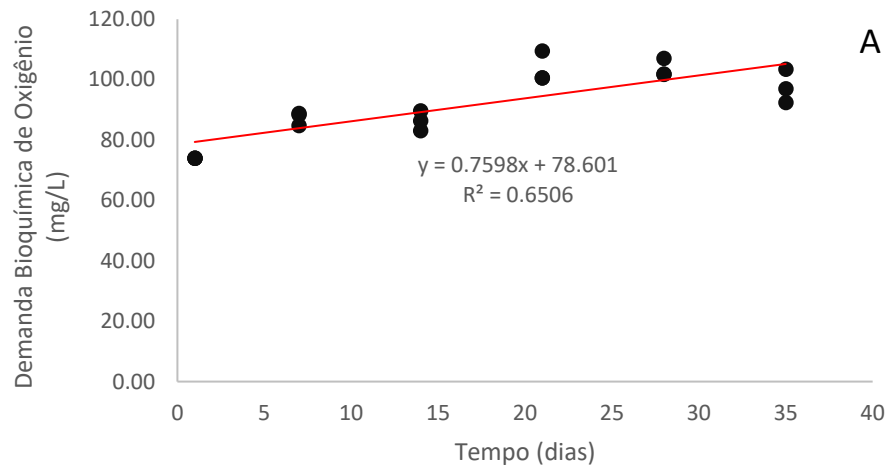
Além disso, todas as unidades experimentais apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para a avaliação sobre o tempo. As Figuras 121 e 122 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo, a regressão linear para as unidades experimentais, para os 35 dias de análise.

Figura 121 - Regressão linear observada para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais C (A), CW (B), ED (C) e CR (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 122 - Regressão linear observada para o parâmetro de DBO para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 45 contém os valores mensurados para eficiência na remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa, apresentando os valores para as três repetições de cada tratamento, assim como sua média e desvio padrão.

Tabela 45 – Eficiências de remoção de DBO para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	50,12	51,74	39,68	47,18	±6,54
CW	91,79	90,68	91,78	91,42	±0,64
ED	77,68	75,00	73,22	75,30	±2,25
CR	85,75	87,39	86,84	86,66	±0,84
CE	-31,04	-39,82	-24,97	-31,94	±7,46
CWE	80,26	80,81	80,81	90,63	±0,32
EDE	70,50	69,64	69,65	69,93	±0,50
CRE	61,06	62,17	63,81	62,34	±1,39

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se, através da Tabela 45, um maior valor de eficiência para todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, quando em comparação as caixas utilizadas como forma de controle.

Ambas as formas de cultivo, tanto internas quanto externas, apresentam diferença significativa de 1%, com $p < 0,01$, sobre as caixas utilizadas como forma de controle.

Além disso, em ambos os ambientes, a caixa CW (contendo apenas a *Wolffia*) apresenta diferença significativa sobre as demais. Diante disso, observa-se que, em ambas as formas de cultivo, a unidade experimental CW apresenta maior capacidade de remoção de DBO.

5.4.7. Nitrogênio Total (NT)

A interação tripla entre tratamento, ambiente e dia, para o parâmetro de Nitrogênio Total, apresentou diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$ e F igual a 85,42. A Tabela 46 apresenta os valores obtidos para as médias do desdobramento dessa interação.

Tabela 46 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para o NT

Nitrogênio Total (mg/L N)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1			ns	ns
	CW	ns	7,05aA	7,05aA
	ED	ns	7,05aA	7,05aA
	CR	ns	7,05aA	7,05aA
7			ns	**
	CW	**	5,14aA	0,07aB
	ED	**	5,16aA	2,03bB
	CR	**	5,28aA	0,26aB
14			**	**
	CW	**	5,43aA	0,00aB
	ED	**	5,01aA	1,25bB
	CR	**	5,09aA	0,15aB
21			**	**
	CW	**	4,51bA	2,15cB
	ED	ns	1,45aA	1,23bA
	CR	**	1,15aA	0,38aB
28			**	**
	CW	**	4,05bA	0,50aB
	ED	ns	1,23aA	0,84bA
	CR	**	1,02aA	0,32aB
35			**	**
	CW	**	3,42bA	0,00aB
	ED	ns	0,16aA	0,00aA
	CR	**	0,50aA	0,00aA
			*	
	C	*	7,33cA	2,58bB

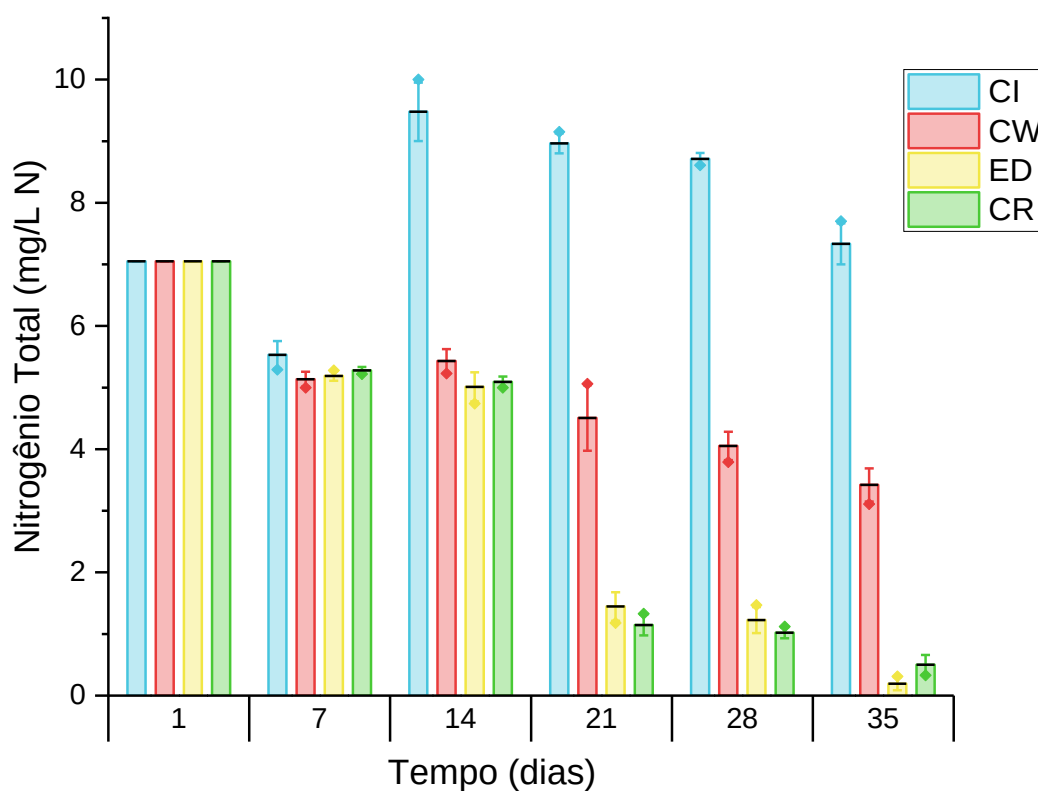
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

Através da Tabela 46, nota-se que, a partir do 7º dia de experimento, todas as unidades experimentais internas apresentam diferença significativa sobre as externas, com exceção da caixa ED (efluente diluído), a qual apresentou comportamento semelhante em ambos os ambientes.

A Figura 123 apresenta o comportamento das unidades experimentais internas sobre o parâmetro de Nitrogênio total.

Figura 123 -Valores observados para o NT das unidades experimentais internas



C: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

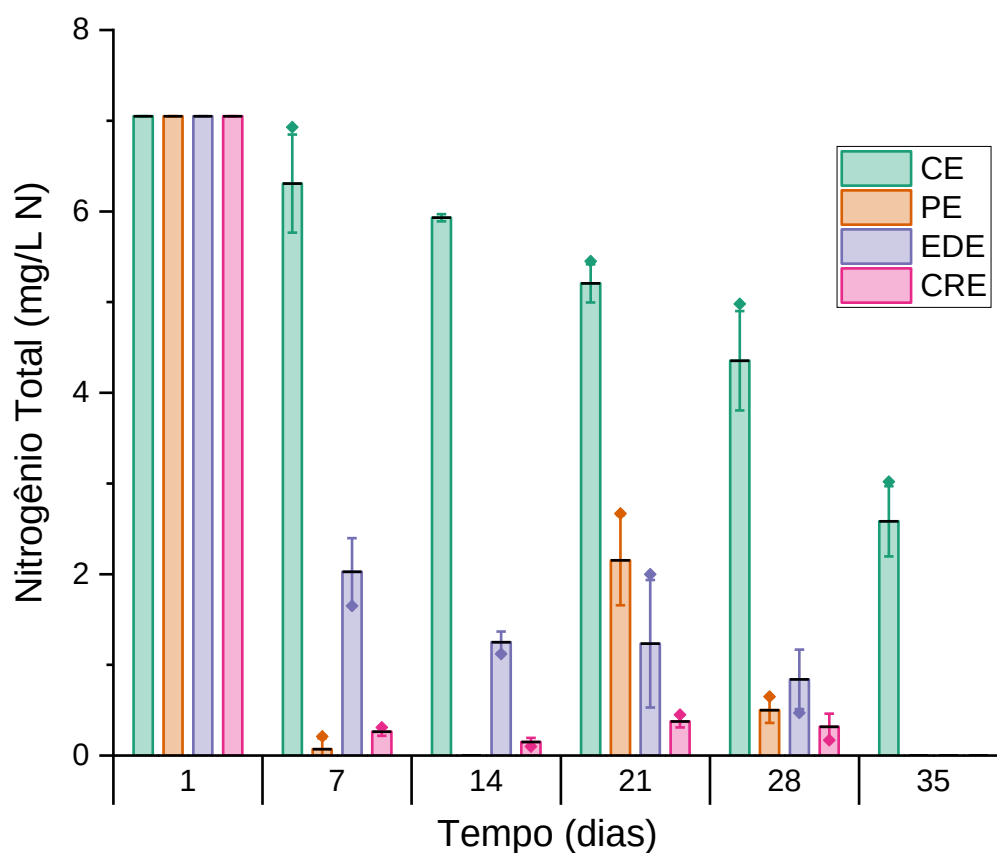
ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 124 apresenta os valores para o Nitrogênio Total, observados durante os 35 dias de experimento, das caixas alocadas na parte externa ao laboratório.

Figura 124 - Valores observados para o NT das unidades experimentais externas



CE: controle externo;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;

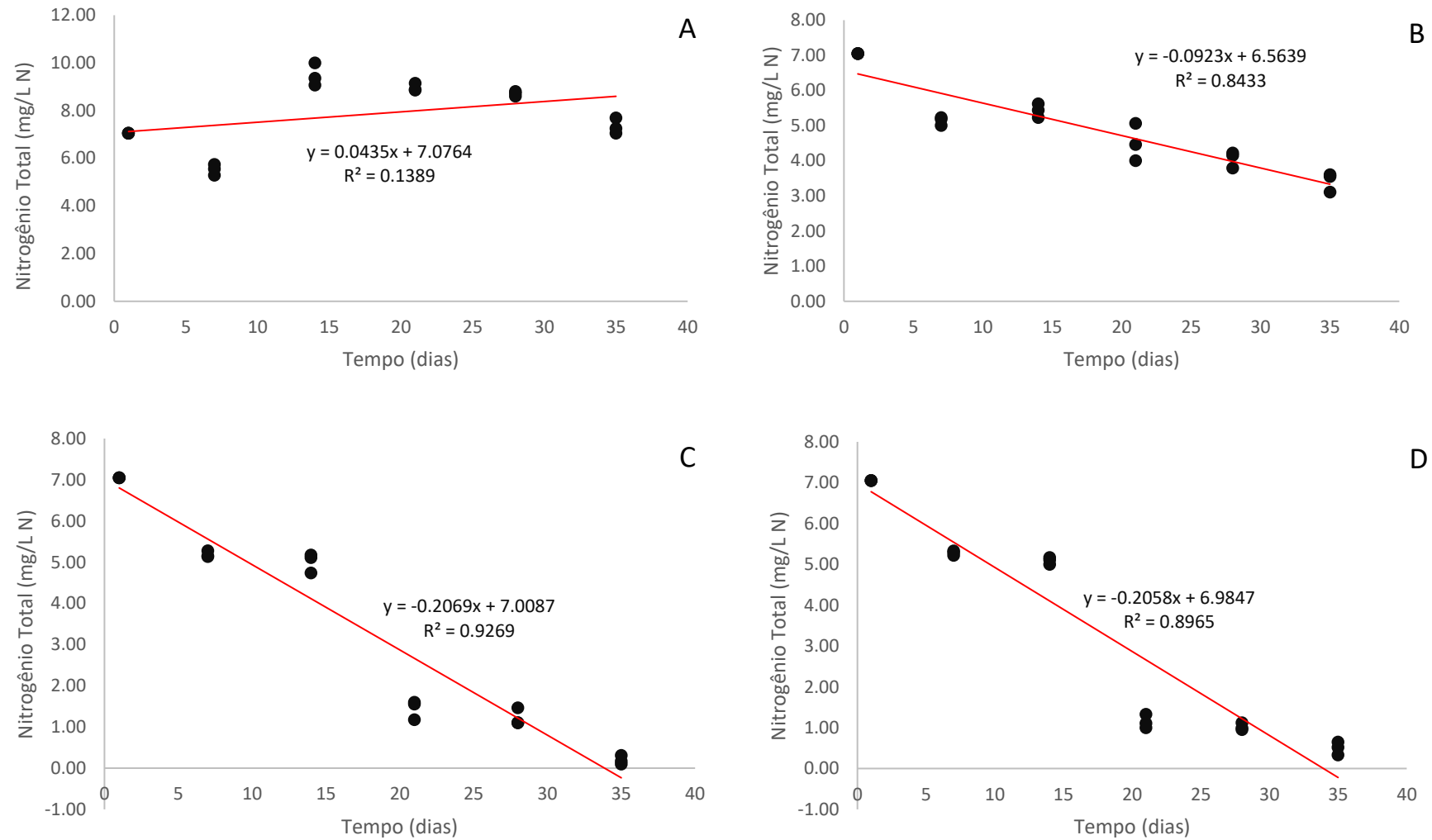
CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Todas as unidades experimentais que possuem a *Wolffia* como forma de polimento apresentaram, ao final dos 35 dias de experimento, menor concentração de Nitrogênio Total quando em comparação a caixa controle.

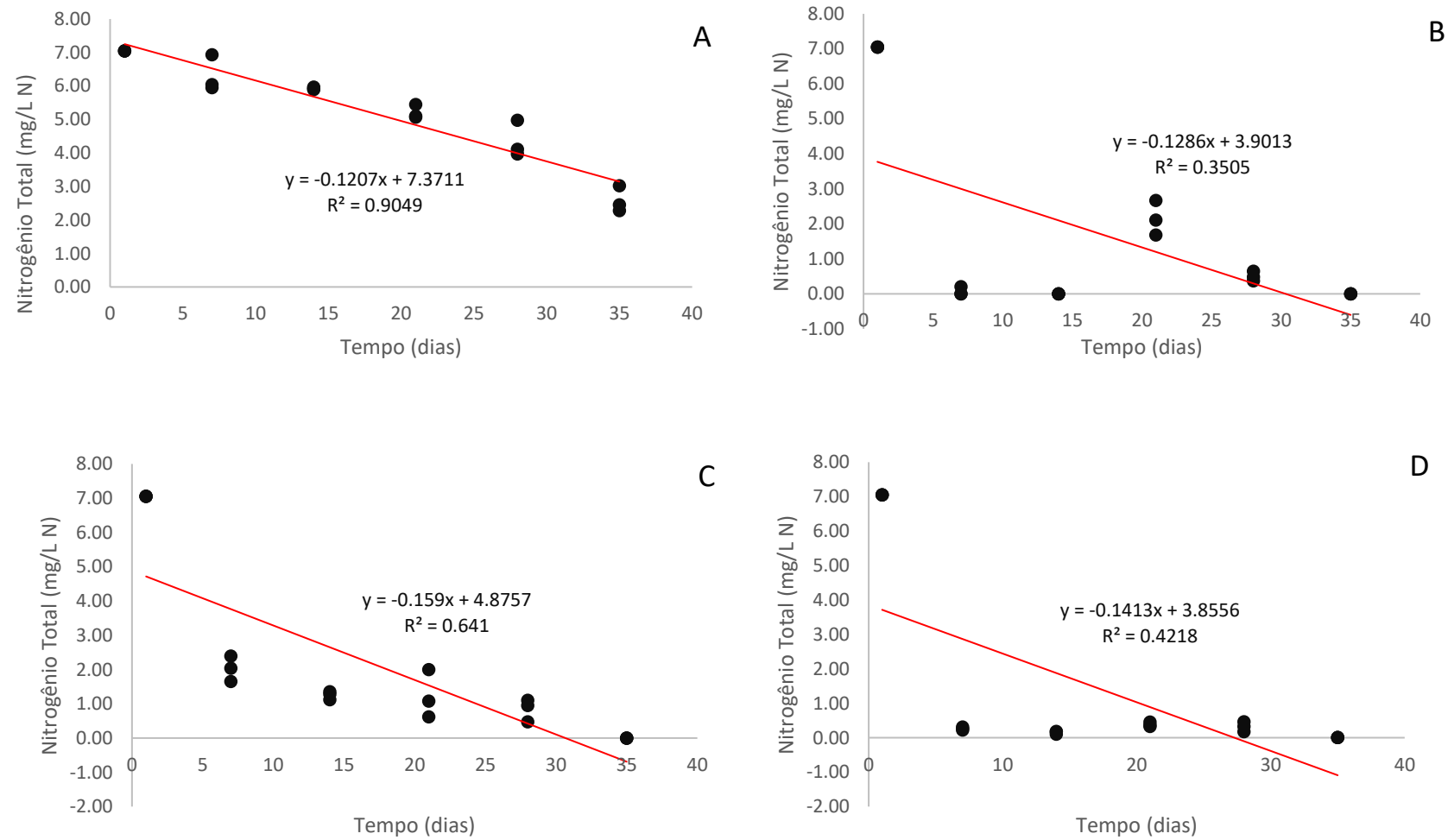
Ademais, todas as unidades experimentais apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para a avaliação sobre o tempo. As Figuras 125 e 126 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo, a regressão linear para as unidades experimentais, para os 35 dias de análise.

Figura 125 - Regressão linear observada para o parâmetro de NT para as unidades experimentais C (A), CW (B), ED (C) e CR (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 126 - Regressão linear observada para o parâmetro de NT para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores calculados para eficiência na remoção do Nitrogênio Total de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa, são apresentados na Tabela 47, assim como os valores para as três repetições de cada tratamento, a média e o desvio padrão.

Tabela 47 – Eficiências de remoção de NT para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	0,00	-2,84	-9,22	-4,02	±4,72
CW	55,89	48,94	49,65	51,49	±3,82
ED	95,60	98,58	97,59	97,26	±1,52
CR	90,78	95,32	92,62	92,91	±2,28
CE	57,16	67,66	65,25	63,36	±5,50
CWE	100,00	100,00	100,00	100,00	±0,00
EDE	100,00	100,00	100,00	100,00	±0,00
CRE	100,00	100,00	100,00	100,00	±0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante do exposto, nota-se um maior valor de eficiência para todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, quando em comparação as caixas utilizadas como forma de controle.

As unidades experimentais externas de cultivo da macrófita apresentam diferença significativa em 1% sobre a caixa controle, com $p < 0,01$, mas não apresentam diferença entre si.

As três caixas internas ao laboratório de polimento com a *Wolffia* apresentam diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre a caixa controle. Além disso, as caixas ED (efluente diluído) e CR (com recirculação) apresentam diferença significativa sobre a caixa que contém apenas a *Wolffia* (CW).

5.4.8. Fósforo Total (PT)

A interação tripla entre o ambiente, dia e tratamento, para o parâmetro de Fósforo Total, apresentou diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$ e F sendo igual a 22,99. A Tabela 48 apresenta os resultados para as médias de desdobramento da interação.

Tabela 48 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para o NT

Fósforo Total (mg/L P)				
Dias	Tratamento		Ambiente	
			Interno	Externo
1			ns	ns
	CW	ns	3,26aA	3,26aA
	ED	ns	3,24aA	3,17aA
	CR	ns	3,26aA	3,26aA
7	C	ns	3,26aA	3,26aA
			**	**
	CW	ns	2,87bA	2,89cA
	ED	**	2,67aA	1,58aB
14	CR	**	2,98bA	2,69bB
	C	ns	3,23cA	3,23dA
			**	**
	CW	**	2,53cA	2,25cB
21	ED	**	2,31bA	1,48aB
	CR	**	2,07aA	1,61bB
	C	ns	3,26dA	3,26dA
			**	**
28	CW	**	2,42cA	1,97cB
	ED	**	2,17bA	1,45bB
	CR	**	1,80aA	0,48aB
	C	ns	3,23dA	3,22dA
35			**	**
	CW	**	1,34aA	0,88bB
	ED	**	1,63bA	1,17cB
	CR	**	1,41aA	0,34aB
	C	**	2,80cA	3,13dB
			**	**
	CW	*	0,50aA	0,37aB
	ED	**	0,45aA	0,11aB
	CR	**	0,47aA	0,00aB
	C	*	2,73bA	2,86bB

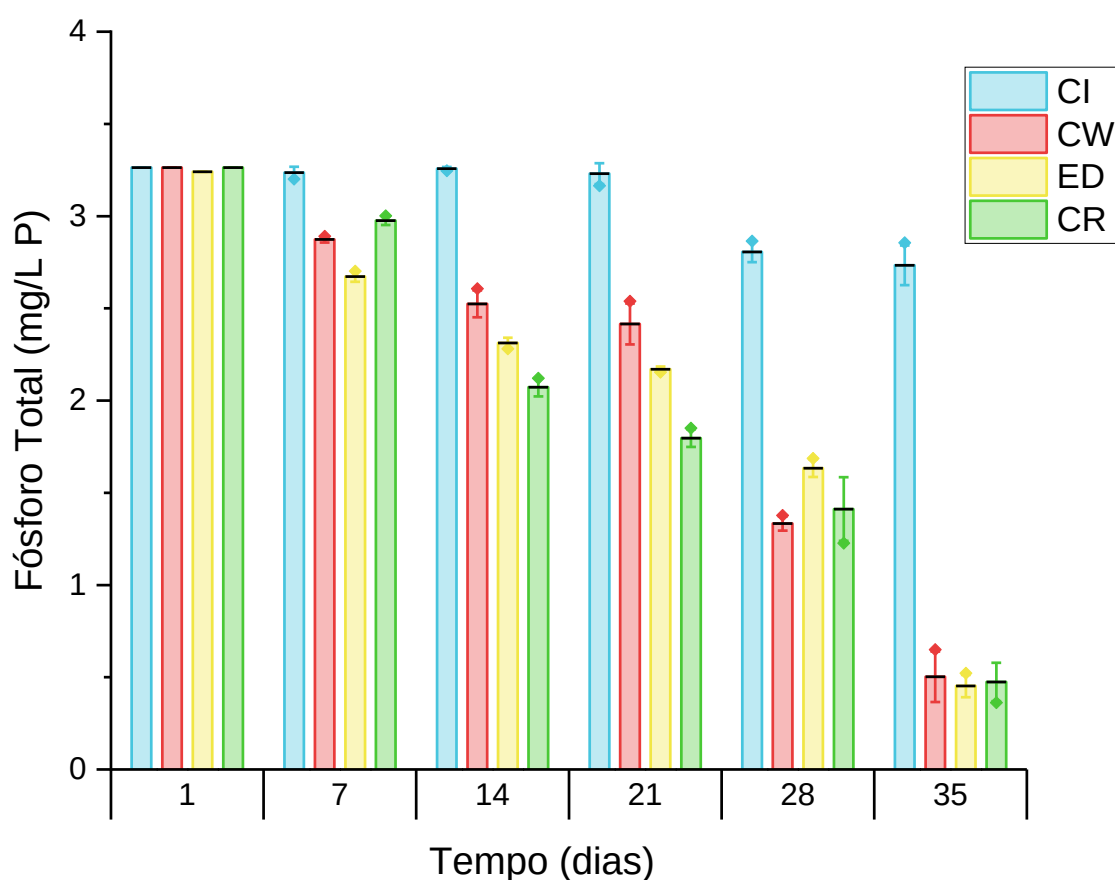
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

Com a análise da Tabela 48, nota-se que após o 7º dia de experimento, todas as unidades experimentais internas apresentam diferença significativa sobre as externas, com exceção da caixa controle e da caixa CW no 7º dia, que apresentam comportamento semelhante em ambos os ambientes.

A Figura 127 apresenta o comportamento em relação ao parâmetro de Fósforo Total para as unidades internas ao laboratório, durante toda a terceira etapa.

Figura 127 – Valores obtidos para PT para as unidades internas da terceira etapa



C: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

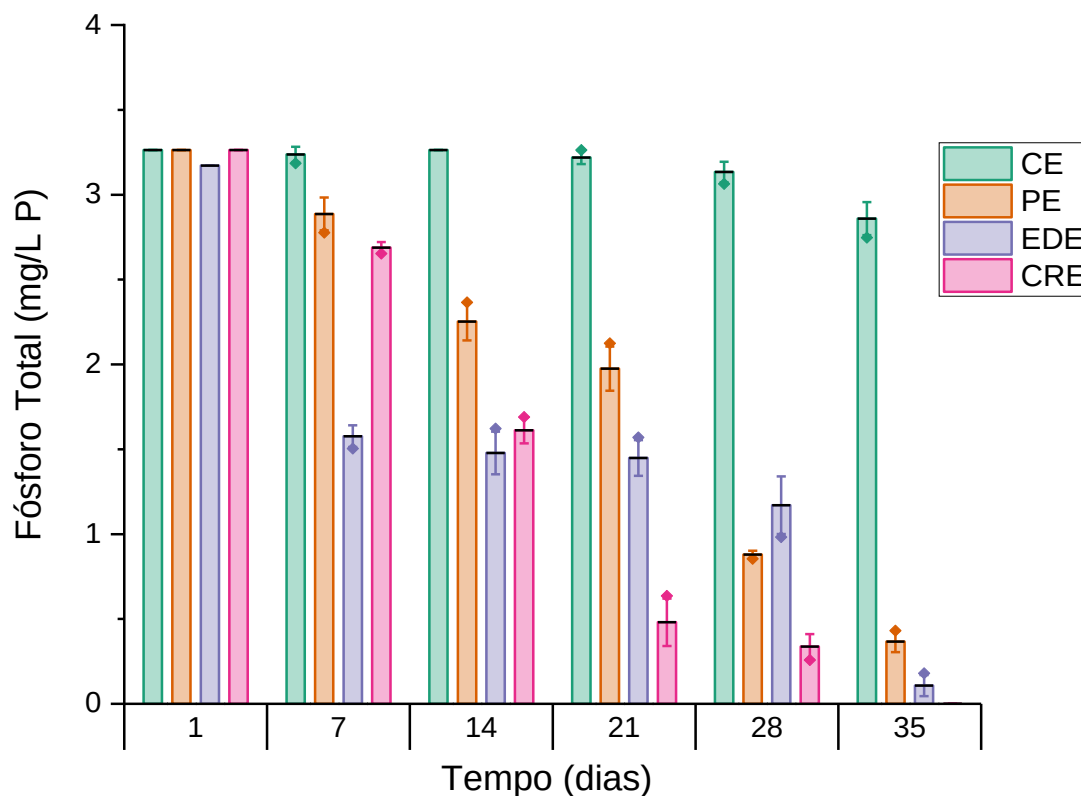
ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 128 apresenta o comportamento em relação ao Fósforo Total para as unidades externas utilizadas durante a terceira etapa.

Figura 128 - Valores obtidos para PT para as unidades externas da terceira etapa



CE: controle externo;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CWE: caixa externa contendo apenas Wolffia;

CRE: caixa externa com recirculação.

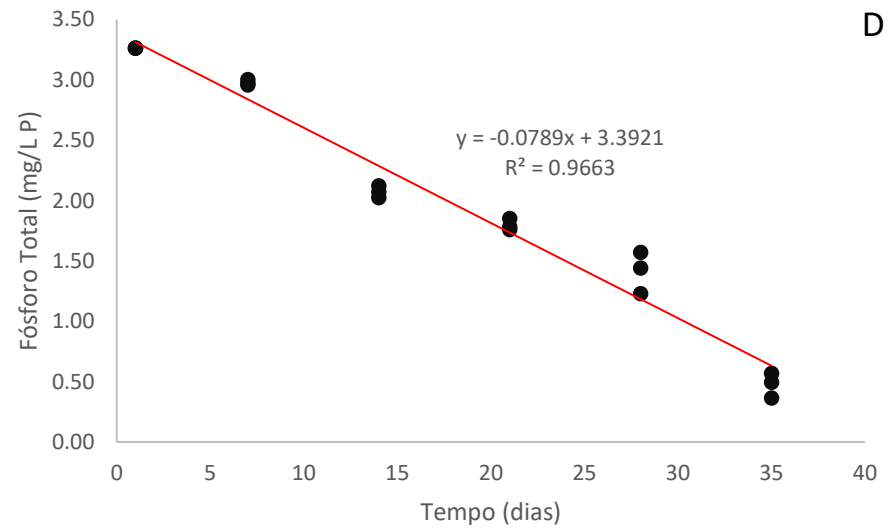
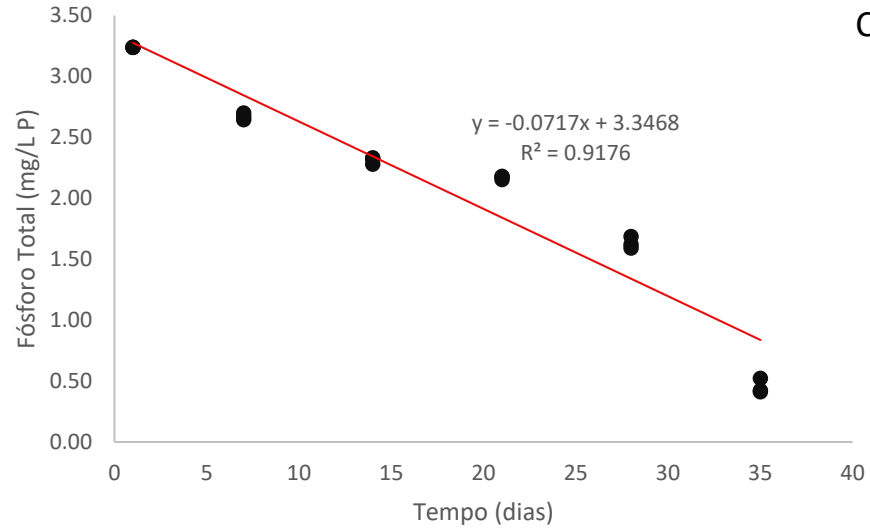
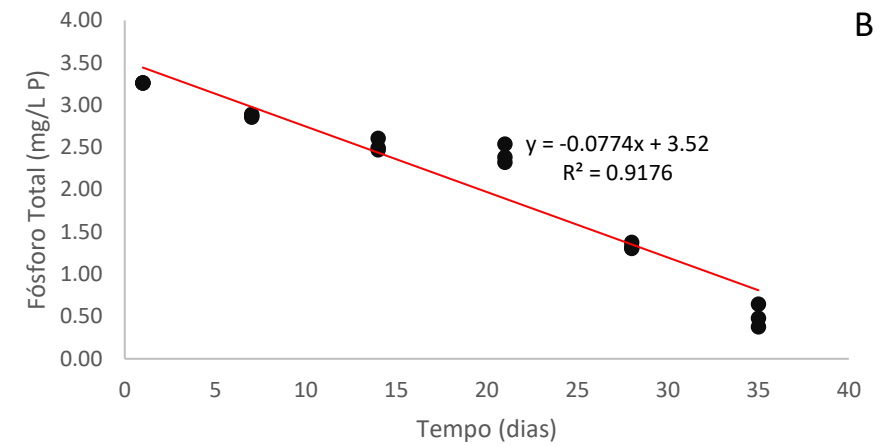
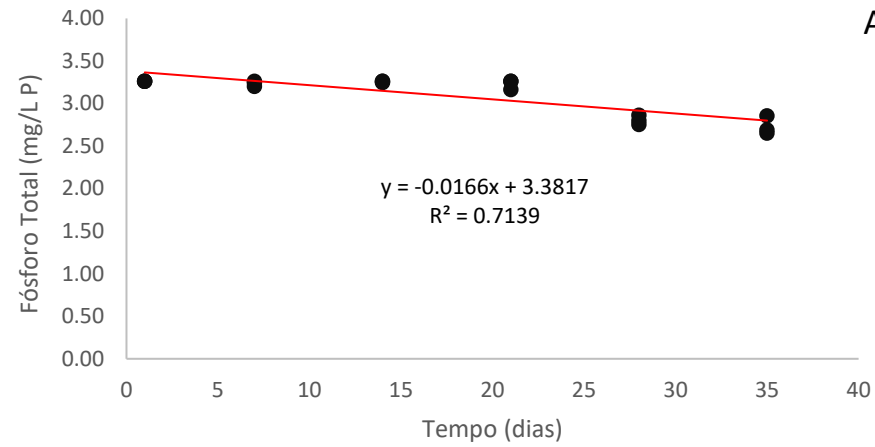
Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com as Figuras 127 e 128, as unidades experimentais que possuem o polimento com a macrófita apresentaram, ao final dos 35 dias de experimento, menor concentração de Fósforo Total quando em comparação a caixa controle.

Além disso, todas as unidades experimentais apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para a avaliação sobre o tempo.

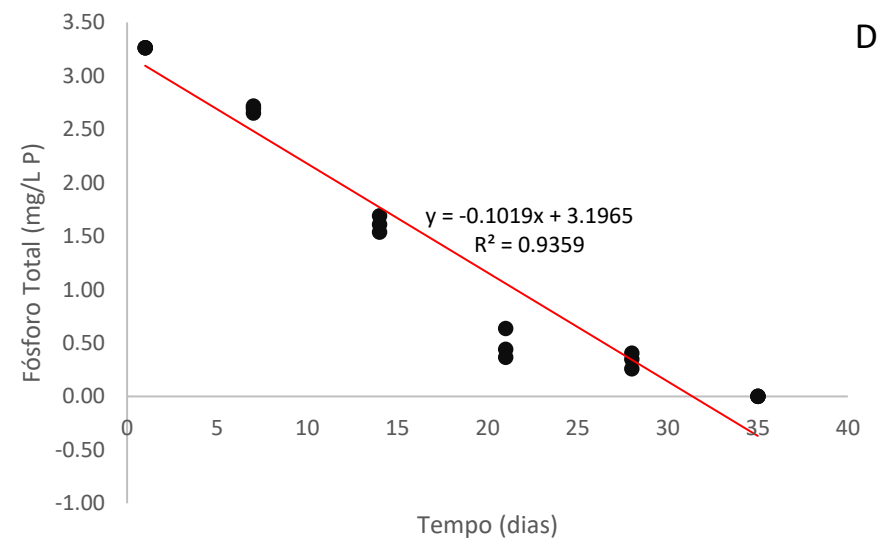
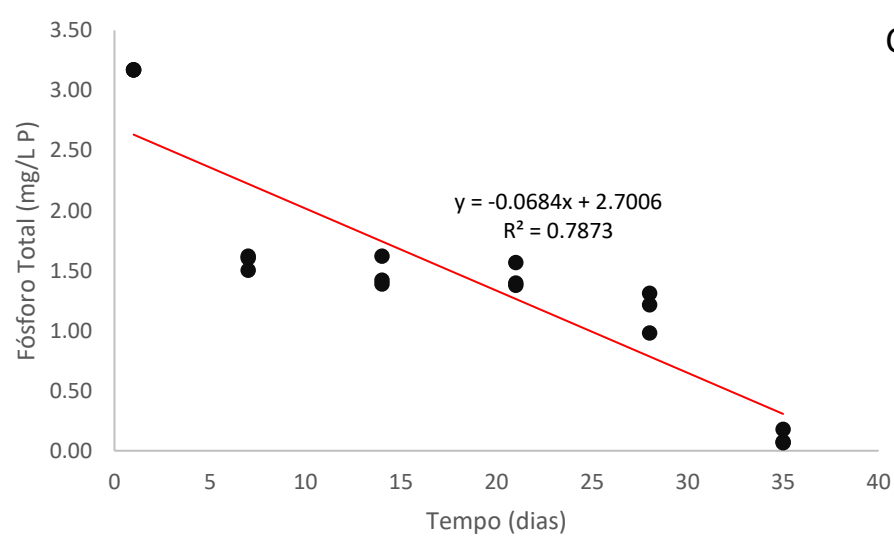
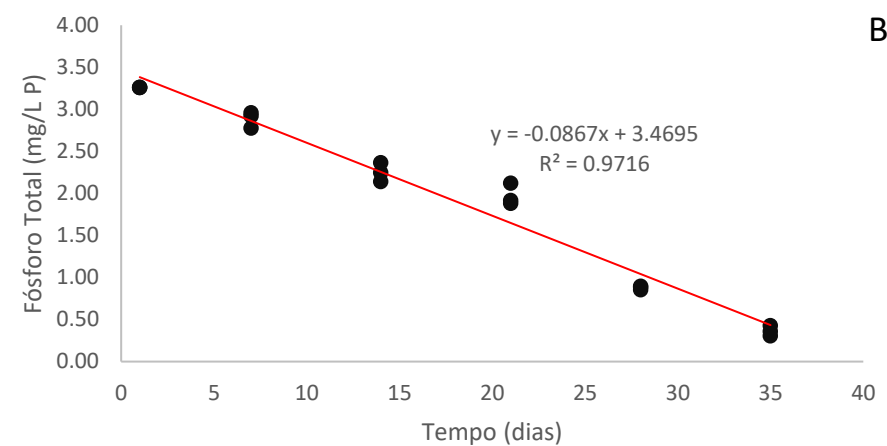
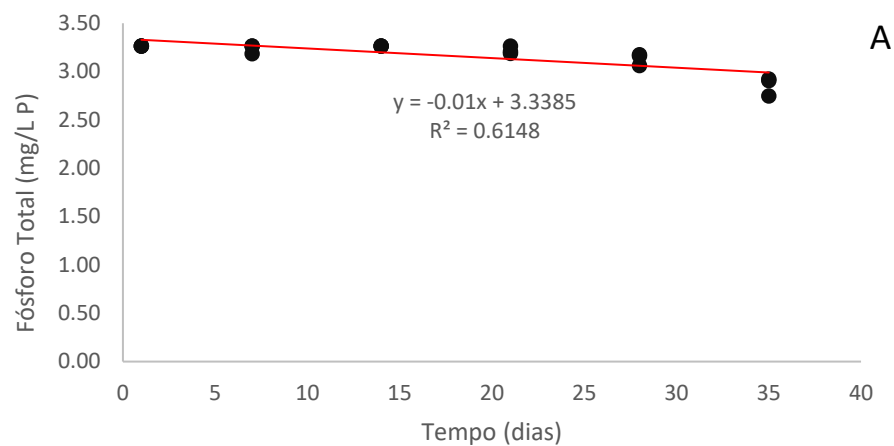
As Figuras 129 e 130 apresentam, respectivamente para o ambiente interno e externo, a regressão linear do parâmetro PT para as unidades experimentais, para os 35 dias de análise.

Figura 129 - Regressão linear observada para o parâmetro de PT para as unidades experimentais C (A), CW (B), ED (C) e CR (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 130 - Regressão linear observada para o parâmetro de PT para as unidades experimentais CE (A), CWE (B), EDE (C) e CRE (D)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 49 apresenta os valores mensurados para eficiência na remoção do Fósforo Total de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa, assim como os valores para as três repetições de cada tratamento, a média e o desvio padrão.

Tabela 49 – Eficiências de remoção de PT para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	12,50	17,50	18,70	16,23	±3,29
CW	88,40	85,30	80,10	84,60	±4,19
ED	86,91	87,31	83,89	86,04	±1,87
CR	84,90	88,90	82,60	85,47	±3,19
CE	15,80	10,40	10,90	12,37	±2,98
CWE	86,60	88,90	90,60	88,77	±1,90
EDE	97,63	94,34	97,84	96,60	±1,96
CRE	100,00	100,00	100,00	100,00	±0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Diante do exposto, nota-se um maior valor de eficiência para todas as caixas de cultivo de *Wolffia*, quando em comparação as caixas utilizadas como forma de controle.

As três unidades experimentais externas de cultivo da *Wolffia* apresentam diferença significativa em 1% sobre a caixa controle, com $p < 0,01$. Além disso, as caixas ED (efluente diluído) e CR (com recirculação) apresentam diferença significativa sobre a caixa CW (apenas com a *Wolffia*).

As unidades experimentais internas ao laboratório de polimento com a *Wolffia* apresentam diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre a caixa controle, entretanto, não apresentam diferença significativa entre si.

5.4.9. Sólidos Totais (ST), Suspensos Totais (SST) e Dissolvidos (SD)

A interação tripla entre ambiente, tratamento e dia apresentou diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$ e F igual a 6,05, para o parâmetro SST, 5%, com $p < 0,05$ e F igual a 4,49 para o parâmetro SD e não apresentou diferença significativa, com $p > 0,05$ e F igual a 0,94, para o ST. Diante disso, realiza-se a

análise para a interação dupla entre ambiente e dia e tratamento e dia para o parâmetro ST.

A Tabela 50 apresenta as médias para o desdobramento da interação tripla entre ambiente, tratamento e dia, para os parâmetros Sólidos Suspensos Totais e Sólidos Dissolvidos.

Tabela 50 - Médias do desdobramento da interação tripla dos fatores tratamento, dia e ambiente, para SST e SD

Dias	Tratamento	SST (mg/L)			SD (mg/L)		
		Ambiente			Ambiente		
		Interno	Externo		Interno	Externo	
1		ns	ns		ns	ns	
	CW	ns	170,00aA	170,00aA	ns	510,00aA	510,00aA
	ED	ns	170,00aA	170,00aA	ns	510,00aA	510,00aA
	CR	ns	170,00aA	170,00aA	ns	510,00aA	510,00aA
	C	ns	170,00aA	170,00aA	ns	510,00aA	510,00aA
35		**	ns		*	**	
	CW	ns	33,33aA	86,67aA	**	833,33bA	453,33aB
	ED	*	46,67aA	240,00aB	*	706,67bA	440,00aB
	CR	**	866,67cA	306,67aB	ns	506,67aA	633,33aA
	C	*	426,67bA	233,33aB	*	713,33bA	1000,00bB

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) pelo teste F a 5% e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste Scott-Knott.

De acordo com a Tabela 50, as unidades experimentais internas controle, ED (efluente diluído) e CR (com recirculação) apresentam diferença significativa sobre as unidades experimentais externas para o parâmetro de Sólidos Suspensos Totais, no 35° dia de experimento, enquanto a caixa CW (com *Wolffia*) não apresenta diferença significativa sobre a externa.

Para o parâmetro de sólidos dissolvidos, no 35° dia de pesquisa, as unidades experimentais internas CW (com *Wolffia*), ED (efluente diluído) e controle apresentam diferença significativa sobre as externas, enquanto a CR (com recirculação) não apresenta influência do ambiente para SD.

A Tabela 51 apresenta as médias do desdobramento da interação do fator tratamento com o fator dia para o parâmetro de Sólidos Totais.

Tabela 51 - Médias do desdobramento da interação dupla dos fatores tratamento e dia, para ST

Tratamentos	Dia	
	1 ^{ns}	35 ^{**}
CW ^{ns}	680aA	703,33aA
ED ^{ns}	680aA	716,67aA
CR ^{**}	680aA	1156,67bB
C ^{**}	680aA	1186,67bB

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste F a 5%.

A Tabela 52 apresenta as médias do desdobramento da interação dupla entre o fator ambiente e o fator dia, para o parâmetro ST.

Tabela 52 - Médias do desdobramento da interação dupla dos fatores ambiente e dia, para ST

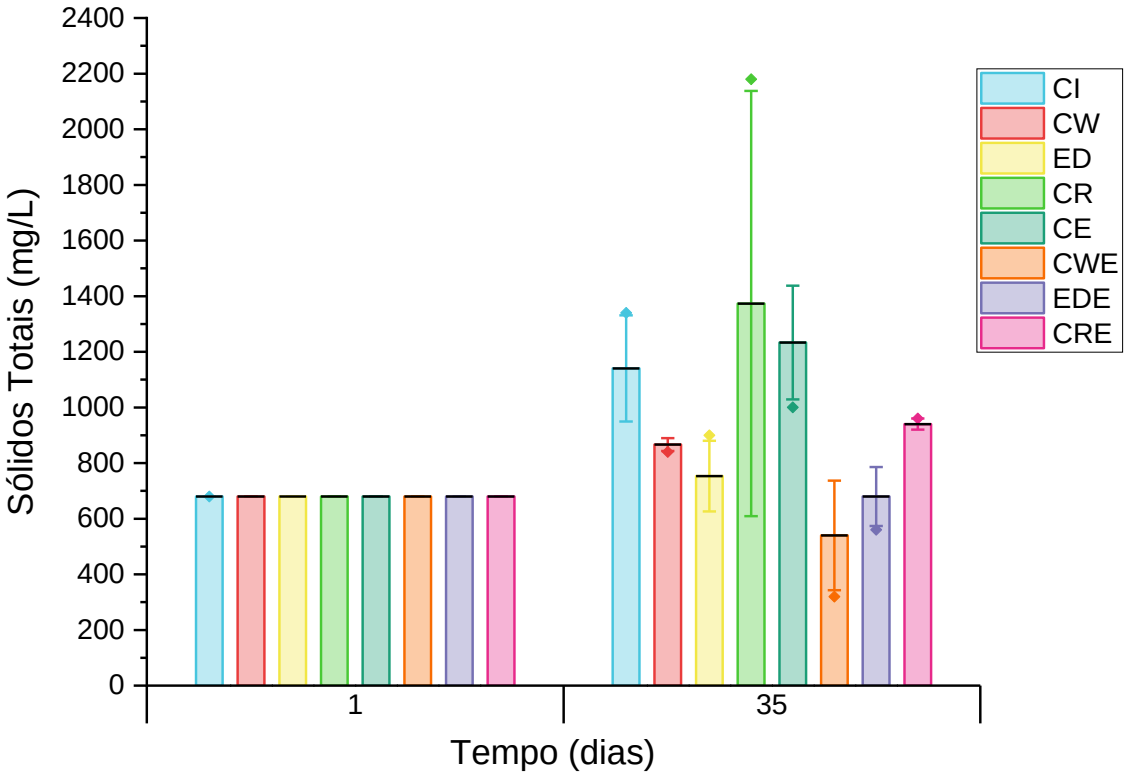
Ambientes	Dia	
	1 ^{ns}	35 [*]
Interno ^{**}	680aA	1033,33aB
Externo ^{ns}	680aA	848,33aA

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, maiúsculas nas linhas (ou entre colunas) e minúsculas nas colunas (ou entre linhas) pelo teste F a 5%.

A Figura 131 apresenta o comportamento das unidades experimentais internas e externas para o parâmetro de Sólidos Totais.

Figura 131 – Valores obtidos para ST para todas as unidades experimentais da terceira etapa



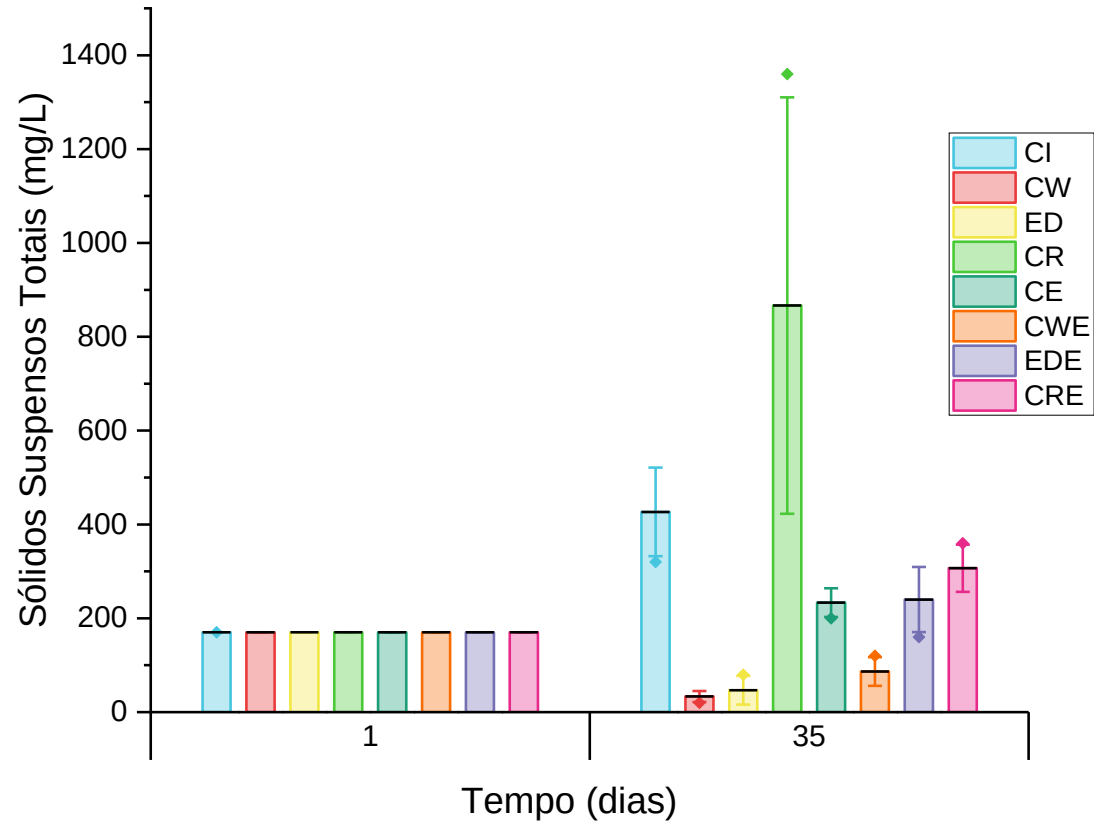
C: controle interno; CE: controle externo;
CW: caixa interna contendo apenas *Wolffia*; CWE: caixa externa contendo apenas *Wolffia*;
ED: caixa interna com efluente diluído; EDE: caixa externa com efluente diluído;
CR: caixa interna com recirculação. CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode observar uma maior concentração de Sólidos Totais em todas as unidades experimentais da terceira etapa, com exceção da caixa CWE (externa e com a *Wolffia*).

A Figura 132 apresenta o comportamento em relação a Sólidos Suspensos Totais, para todas as unidades experimentais da terceira etapa.

Figura 132 - Valores obtidos para SST para todas as unidades experimentais da terceira etapa



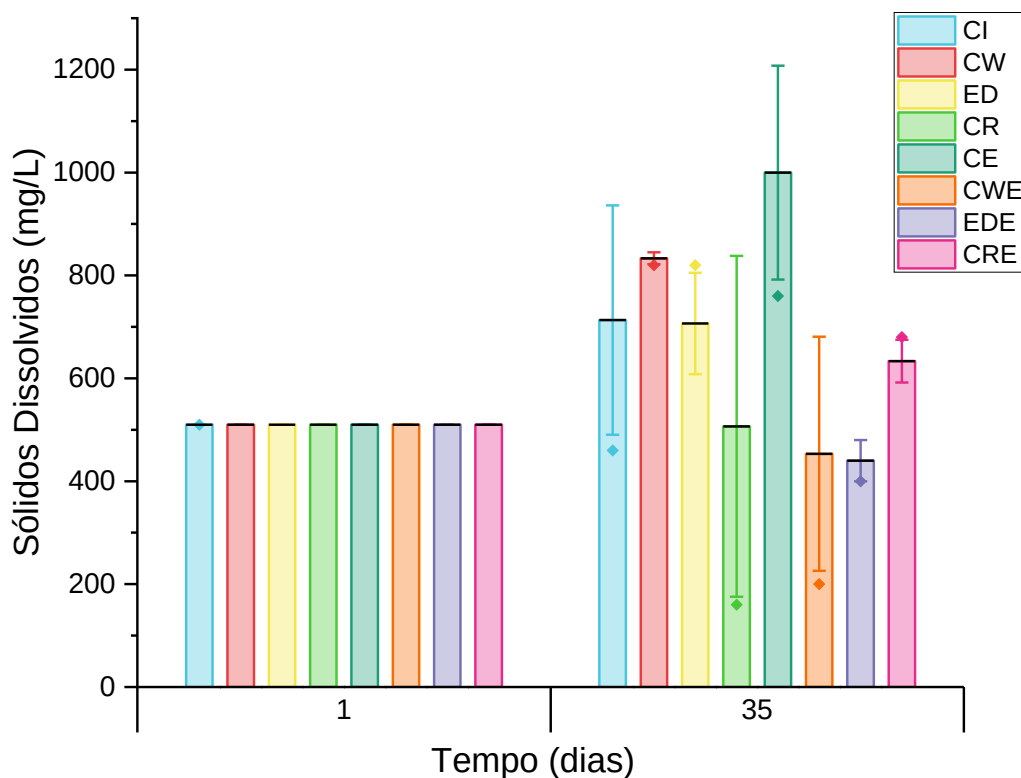
C: controle interno;	CE: controle externo;
CW: caixa interna contendo apenas <i>Wolffia</i> ;	CWE: caixa externa contendo apenas <i>Wolffia</i> ;
ED: caixa interna com efluente diluído;	EDE: caixa externa com efluente diluído;
CR: caixa interna com recirculação.	CRE: caixa externa com recirculação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a análise da Figura 132, observa-se uma elevação na concentração de Sólidos Suspensos Totais em ambas as caixas utilizadas como forma de controle, nas caixas que possuem bomba de recirculação e na caixa externa com efluente diluído. As caixas que contém a apenas a *Wolffia* (CW), tanto internamente quanto externamente, e a caixa com efluente diluído interna apresentaram redução no valor.

A Figura 133 apresenta o comportamento de todas as unidades experimentais em relação a concentração de Sólidos Dissolvidos.

Figura 133 - Valores obtidos para SD para todas as unidades experimentais da terceira etapa



C: controle interno;

CW: caixa interna contendo apenas Wolffia;

ED: caixa interna com efluente diluído;

CR: caixa interna com recirculação.

CE: controle externo;

CWE: caixa externa contendo apenas Wolffia;

EDE: caixa externa com efluente diluído;

CRE: caixa externa com recirculação.

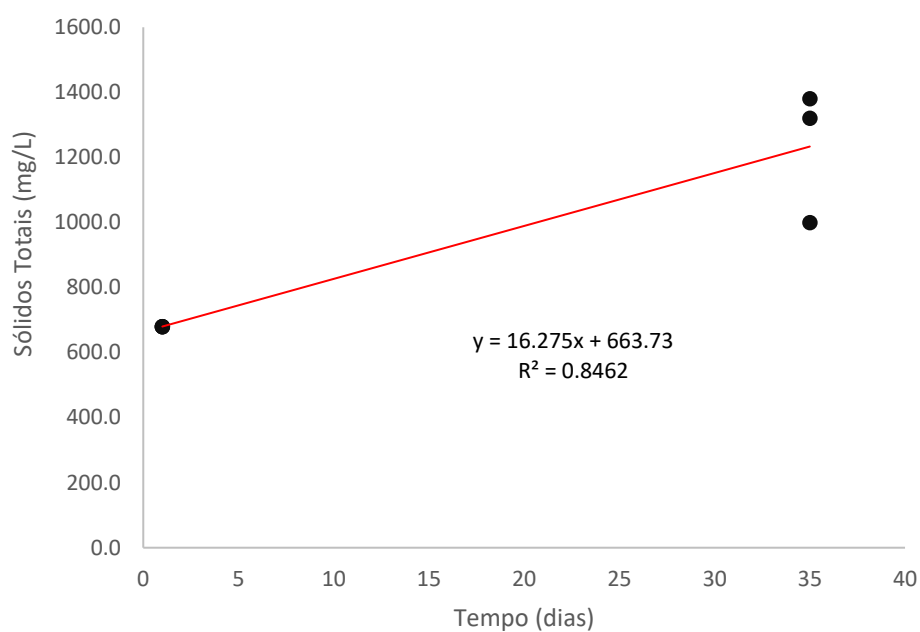
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode-se observar, com o auxílio da Figura 133, uma elevação na concentração de sólidos dissolvidos no controle interno e externo, na caixa CW interna, na caixa ED interna e na CR externa, enquanto as demais apresentam redução no valor.

Para a análise de Sólidos Totais, o controle externo (CE) e a caixa interna com recirculação (CR) apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre o tempo.

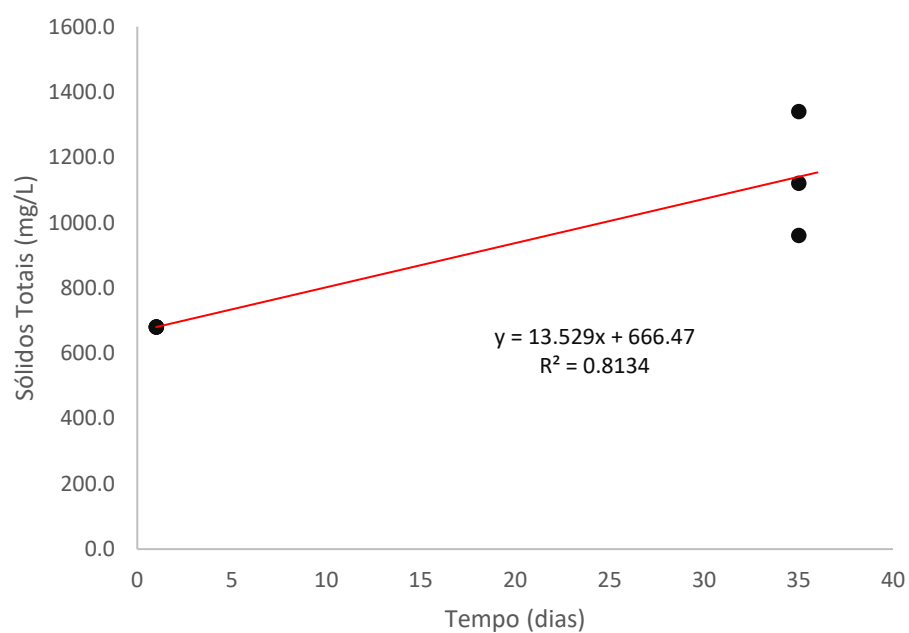
As Figuras 134 e 135 apresentam, respectivamente para a caixa CE e CR, a regressão linear para a análise dos Sólidos Totais.

Figura 134 - Regressão linear observada para o parâmetro de ST para a unidade experimental CE



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 135 - Regressão linear observada para o parâmetro de ST para a unidade experimental CR

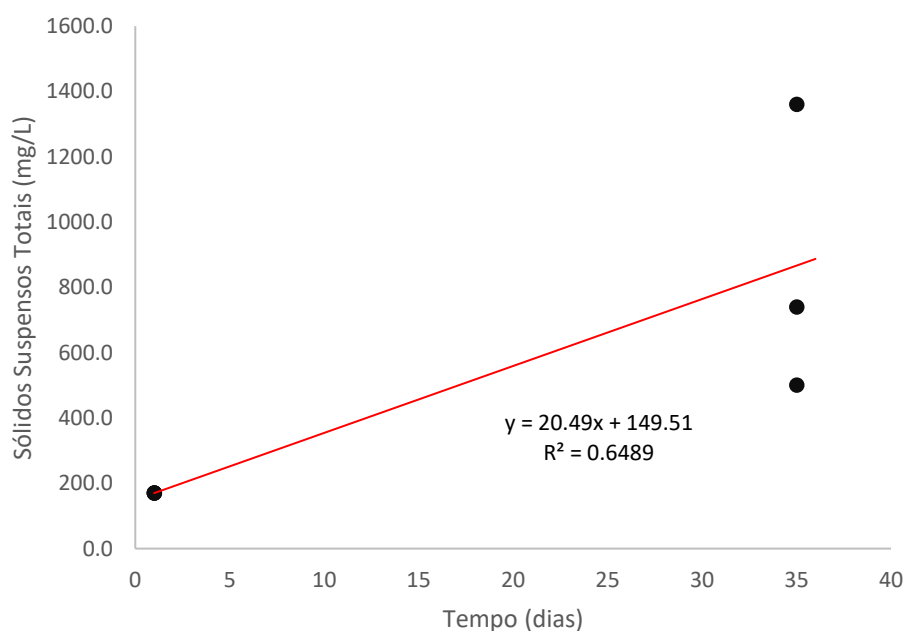


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o parâmetro Sólidos Suspensos Totais, apenas a unidade experimental interna com recirculação (CR) apresentou diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre o tempo.

A Figura 136 apresenta a regressão linear para a caixa com bomba de recirculação interna, para o parâmetro de SST.

Figura 136 - Regressão linear observada para o parâmetro de SST para a unidade experimental CR.

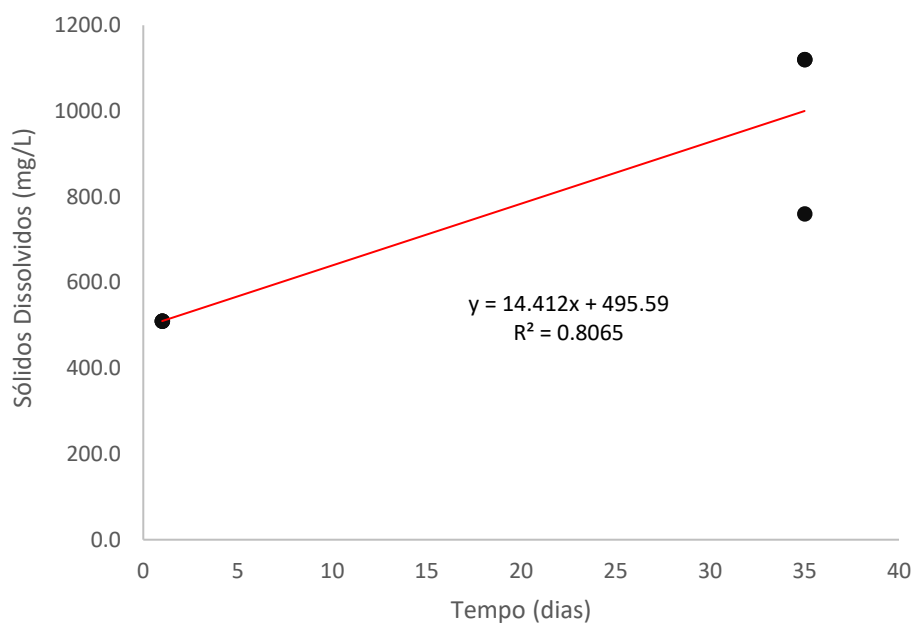


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o parâmetro de Sólidos Dissolvidos, o controle externo e a caixa interna com Wolffia (CW) apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, para o tempo.

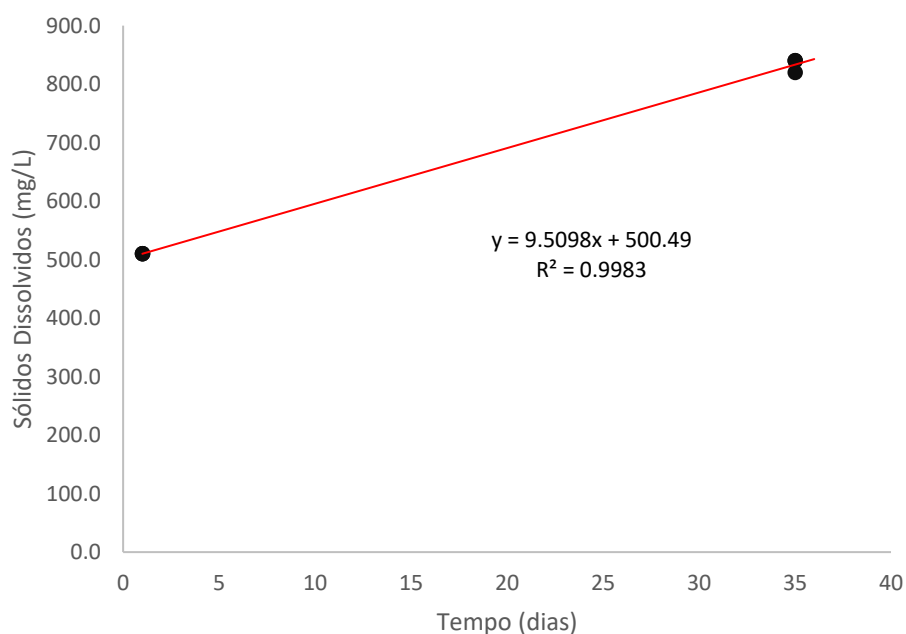
As Figuras 137 e 138 apresenta, respectivamente para as caixas CE e CW, a regressão linear para o parâmetro de Sólidos Dissolvidos.

Figura 137 - Regressão linear observada para o parâmetro de SD para a unidade experimental CE



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 138 - Regressão linear observada para o parâmetro de SD para a unidade experimental CW



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 53 apresenta os valores mensurados para eficiência na remoção do Sólidos Totais de todas as unidades experimentais utilizadas na terceira etapa,

assim como os valores para as três repetições de cada tratamento, a média e o desvio padrão.

Tabela 53 – Eficiências de remoção de ST para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	-64,71	-41,18	-97,06	-67,65	±28,06
CW	-29,41	-23,53	-29,41	-27,45	±3,40
ED	-32,35	0,00	0,00	-10,78	±18,68
CR	-88,24	2,94	-88,24	-101,96	±112,40
CE	-94,12	-102,94	-47,06	-81,37	±30,04
CWE	-2,94	11,76	52,94	20,59	±28,97
EDE	-11,76	-5,88	17,65	0,00	±15,56
CRE	-35,29	-41,18	-38,24	2,94	±2,94

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em ambos os ambientes, não se nota uma diferença significativa entre as unidades experimentais para o parâmetro de Sólidos Totais.

A Tabela 54 apresenta os valores de eficiência obtidos para a remoção de Sólidos Suspensos totais de cada repetição de tratamento, assim como suas médias e desvios.

Tabela 54 – Eficiências de remoção de SST para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	-88,24	-194,12	-170,59	-150,98	±55,60
CW	76,47	88,24	76,47	80,39	±6,79
ED	52,94	76,47	88,24	72,55	±17,97
CR	-700,00	-194,12	-335,29	-409,80	±261,04
CE	-17,65	-52,94	-41,18	-37,25	±17,97
CWE	64,71	52,94	29,41	49,02	±17,97
EDE	-64,71	-64,71	5,88	-41,18	±40,75
CRE	-76,47	-111,76	-52,94	-80,39	±29,61

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As unidades experimentais externas não apresentaram diferença significativa entre si na remoção de Sólidos Suspensos Totais, entretanto, as unidades internas

ED (efluente diluído) e CW (contendo apenas a *Wolffia*) apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre as demais, da mesma forma que a caixa controle apresentou sobre a caixa CR (com recirculação).

A Tabela 55 apresenta os valores de eficiência de remoção de Sólidos Dissolvidos obtidos para todas as unidades experimentais da terceira etapa.

Tabela 55 – Eficiências de remoção de SD para a terceira etapa

Unidades Experimentais	Eficiência (%)			Média (%)	Desvio Padrão
CI	-56,86	9,80	-72,55	-39,87	$\pm 43,73$
CW	-64,71	-60,78	-64,71	-63,40	$\pm 2,26$
ED	-60,78	-25,49	-29,41	-38,56	$\pm 19,34$
CR	-60,78	68,63	-5,88	0,65	$\pm 64,95$
CE	-119,61	-119,61	-49,02	-96,08	$\pm 40,75$
CWE	-25,49	-1,96	60,78	11,11	$\pm 44,60$
EDE	5,88	13,73	21,57	13,73	$\pm 7,84$
CRE	-21,57	-17,65	-33,33	-24,18	$\pm 8,16$

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o parâmetro de Sólidos Dissolvidos, as unidades experimentais externas que contém a *Wolffia* como forma de cultivo apresentaram diferença significativa em 1%, com $p < 0,01$, sobre o controle, por outro lado as internas não apresentaram diferença significativa entre si.

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados observados no primeiro e segundo ciclo da primeira etapa, pode-se considerar que a lâmpada utilizada (lâmpada fluorescente de 30 W e 6400 K) não oferece a *Wolffia* a quantidade de luz que ela necessita para seu desenvolvimento, tendo em vista que é considerada uma lâmpada de cor fria, não atingindo os mesmos resultados que a lâmpada de luz amarela do terceiro e quatro ciclos.

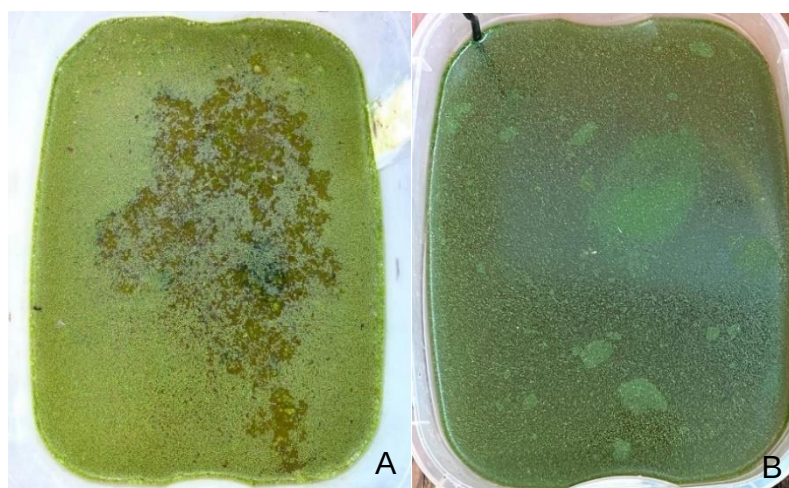
Nos ciclos três e quatro da primeira etapa, nota-se um comportamento semelhante para a caixa de cultivo com a *Wolffia*, os quais podem aumentar a validação das eficiências obtidas, tendo em vista que as condições oferecidas foram as mesmas.

Para o quarto ciclo, nota-se uma eficiência maior de autodepuração para os parâmetros de DBO e turbidez na caixa controle, o que pode ser explicado pela presença da bomba submersa para recirculação contínua. De acordo com Shelef; Kanarek (1995), a recirculação melhora as condições de oxigenação na lagoa, além disso, a recirculação pode quebrar a possível estratificação termal, contribuindo diretamente no aumento da eficiência.

Além disso, com a primeira etapa, pode-se determinar algumas das condições viáveis para o desenvolvimento da *Wolffia* e o adensamento de estabilização para as condições propostas, utilizadas na segunda etapa, além de validar a possibilidade de polimento com a macrófita.

O pH obtido em ambos os ciclos da segunda etapa e na terceira etapa mostra-se maior para as unidades experimentais externas, as quais apresentaram maior quantidade de algas durante as duas etapas, como mostra a Figura 139. De acordo com Nuvolari (2011), as algas consomem o CO durante o dia, o que resulta na elevação do pH, podendo atingir valores superiores a 9. Segundo Nascimento (2001), o pH torna-se maior devido ao consumo do dióxido de carbono pelas algas, principalmente nas horas claras do dia.

Figura 139 – Caixa externa contendo a *Wolffia* com elevada quantidade de algas (A), em comparação com caixa interna que contém a *Wolffia* (B)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As unidades experimentais retratadas na Figura 139 foram utilizadas no primeiro ciclo da segunda etapa, entretanto, mantiveram o comportamento durante o segundo ciclo e durante a terceira etapa.

O pH médio encontrado para a segunda etapa foi de 8,31 para as unidades internas e 9,74 para as externas. Para a terceira etapa obtém-se 7,83 para o ambiente interno e 9,81 para o externo. Nuvolari (2011) confirmou em pesquisa que o pH alcalino pode afetar o desenvolvimento das plantas. De acordo com Skillicorn *et al.* (1993), para o desenvolvimento ideal da *Wolffia* em relação ao pH, a faixa ideal seria de 7,00 a 8,00. No decorrer desta pesquisa, houve queda no desenvolvimento na macrófita nos dias de elevada temperatura externa, em que ocorreu também a elevação do pH.

A temperatura média interna obtida para a segunda etapa foi de 22°C, para ambos os ciclos, e a externa 17°C para o primeiro ciclo e 22°C para o segundo. Para a terceira etapa, obtém-se uma média interna de 24°C e externa de 30°C. De acordo com Gaigher; Short (1986), a *Wolffia* requer uma temperatura de 17,5°C até 30°C para seu desenvolvimento, entretanto, no decorrer deste trabalho, observou-se um melhor desenvolvimento das plantas localizadas na parte externa ao laboratório nos dias de menores temperaturas, sendo eles no primeiro ciclo da segunda etapa.

Além disso, o parâmetro Oxigênio Dissolvido mostrou-se superior em ambos os ciclos da segunda etapa e no decorrer na terceira etapa, o que pode ser gerado, assim como para o parâmetro pH, pela maior concentração de algas. De acordo com Abdel-Razik (1991), as algas podem produzir cerca de 15 vezes mais oxigênio do que consomem. Segundo Nuvolari (2011), a presença de algas nos tanques acarreta no aumento da produção de oxigênio.

Para o parâmetro de Nitrogênio Total, todas as unidades experimentais dos dois ciclos da segunda etapa e da terceira etapa apresentam maior valor de eficiência em comparação as unidades internas. De acordo com Rajasulochana; Preethy (2016), as algas necessitam dos nutrientes contidos nas águas residuárias para o seu desenvolvimento. Diante disso, identifica-se que esse valor elevado na eficiência no ambiente externo é possivelmente causado pela quantidade elevada de algas quando em comparação com o ambiente interno.

O maior valor para eficiência de Nitrogênio Total obtida nesse trabalho foi de 100%. De acordo com Cheng; Stomp (2009), as macrófitas podem usar uma reserva interna de nutrientes para seu crescimento por um longo período, quando o Nitrogênio e o Fósforo são completamente removidos da água.

Assim como o NT, para o parâmetro de Fósforo Total nota-se uma maior capacidade de remoção nas caixas externas, quando em comparação com as caixas

internas, para a segunda e terceira etapa, possivelmente causado pela presença maior de algas nas unidades experimentais externas, tendo em vista que as algas consomem nutrientes como o fósforo para seu crescimento (Rajasulochana; Preethy, 2016). O maior valor para a eficiência de remoção de Fósforo Total obtida nesse trabalho foi de 100%.

Para os parâmetros de DBO e DQO, os maiores valores de eficiência obtidos nesse trabalho são respectivamente 99% e 86%.

Para o parâmetro de Sólidos Totais, nota-se uma elevação na concentração final em todas as unidades experimentais, o que pode ser causado pela presença de algas. De acordo com Dalu; Ndamba (2003), com a decomposição de algas no sistema, a concentração de sólidos tende a aumentar.

O valor máximo obtido nesse trabalho para eficiência na remoção de Sólidos Totais foi de 61%, entretanto, a média dos valores para as unidades experimentais resultam na elevação da concentração inicial.

A caracterização da biomassa produzida em pesquisa apresenta resultados satisfatórios para a concentração de proteínas com valor máximo igual a 30,87%. Zanetoni Filho (2019) obteve o valor de 33,57% para a *Landoltia Punctata*. Appenroth et al. (2018) realizou a caracterização de onze espécies do gênero *Wolffia*, sendo elas a *Angusta*, *Arrhiza*, *Australiana*, *Borealis*, *Brasiliensis*, *Columbiana*, *Cylindracea*, *Elongata*, *Globosa*, *Microscopica* e *Neglecta* e obteve valores de 20 a 30% para proteína total. Outro estudo desenvolvido por Appenroth et al. (2017) realizou análises para os gêneros *Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* e *Wolffia* e obteve valores de 20% a 35% de proteína total.

A Tabela 56 apresenta os valores máximos de eficiência para remoção da DQO, DBO, NT, PT e ST obtidos nesse trabalho, em comparação a outros trabalhos realizados com macrófitas aquáticas. Diante do exposto, a maior eficiência na remoção de nutrientes obtida nesse trabalho, quando em comparação a outros estudos, pode ser explicada pela menor quantidade de efluente utilizada nas caixas de cultivo, pela quantidade de algas nas unidades externas, o que influencia diretamente na remoção dos nutrientes e pelas condições artificiais favoráveis ao seu desenvolvimento.

Tabela 56 – Eficiências máximas obtidas para os parâmetros estudados em comparação a outras pesquisas

Referências	Meio de cultivo	Espécie utilizada	Eficiência máxima (%)				
			DQO	DBO	NT	PT	ST
(Xu; Shen, 2011)	Efluentes suinícolas	<i>Spirodela Polyrhiza</i>	nc	nc	83,7	89,4	nc
(Chen <i>et al.</i> , 2018)	Efluente de wetland	<i>Landoltia Punctata</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Lemna Minor</i>	nc	nc	99,1	90,8	nc
(Valderrama <i>et al.</i> , 2002)	Águas residuais da produção de etanol	<i>Wolffia</i> sp. e <i>Chlorella Vulgaris</i>	61	nc	71,6	28	nc
(Zanetoni Filho, 2019)	Efluente ETE de Ilha Solteira – SP	<i>Landoltia Punctata</i>	59,1	66,3	26,8	6,8	40,1
(Kotowska <i>et al.</i> , 2018)	Águas residuais urbanas	<i>Wolffia arrhiza</i>	90	91	90	83	nc
		<i>L. minor</i>	88	81	78	77	
(Zhang <i>et al.</i> , 2011)	Águas residuárias	<i>Wolffia arrhiza</i>	69,1	76,9	46,1	84,3	nc
(Garcia, 2015)	Efluente ETE de Ilha Solteira – SP	<i>Landoltia Punctata</i>	88,12	91,14	74	67	48,90
(Tavares <i>et al.</i> , 2008)	Efluentes suinícolas	<i>Lemna Valdiviana</i>	94,8	nc	89	66,5	77
Este trabalho	Efluente ETE de Ilha Solteira – SP	<i>Wolffia brasiliensis</i>	86	99	100	100	61

Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota: nc=não contém

6 CONCLUSÃO

- Com a análise dos resultados, determina-se que a macrófita necessita de alta luminosidade para sua sobrevivência, além de temperatura adequada.
- As condições ambientais, como luminosidade e temperatura, apresentaram interferência direta no desenvolvimento da planta e na eficiência desta como forma de polimento.
- Nota-se que as diferentes formas de cultivo (CW, ED e CR) internas, não apresentaram interferência relevante nos resultados, tendo em vista que todas elas apresentaram comportamento semelhante.
- A análise dos resultados mostra que a *Wolffia brasiliensis* apresenta considerável eficiência como forma de polimento de efluentes. Os maiores valores apresentados na remoção de DQO, DBO, turbidez, NT, PT, ST, SST e SD foram, respectivamente, 86%, 99%, 99%, 100%, 100%, 61%, 95% e 13%. Diante disso, observa-se elevada influência da macrófita na remoção de matéria orgânica e nutrientes.
- As unidades experimentais externas, apresentaram elevada quantidade de algas, o que influenciou diretamente no resultado de todos os parâmetros, tanto na caixa controle, quanto na caixa de cultivo de *Wolffia*.
- A biomassa da planta produzida durante a pesquisa apresenta elevado valor nutricional pela quantidade de proteína disponível em sua biomassa (30,87%).
- Os resultados obtidos para os parâmetros analisados na segunda e terceira etapa apresentaram oscilação causada pela reposição semanal do efluente.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o observado nesta pesquisa, o efluente coletado na saída da lagoa facultativa primária da ETE de Ilha Soltiera – SP apresenta valores baixos de nutrientes, quando em comparação a meios de cultivo utilizados e recomendados para o cultivo da *Wolffia brasiliensis*. Recomenda-se a utilização de outro meio de cultivo para avaliação das taxas de crescimento e produção de biomassa, além de verificar a eficiência nessa situação.

Recomenda-se avaliar a eficiência do polimento com a *Wolffia* em mesocosmos, a fim de avaliar os custos gerados pelo processo e a manutenção necessária, como a possível necessidade da coleta temporária da biomassa.

Recomenda-se para trabalhos futuros, no caso de aparecimento de algas, realizar a análise da espécie e o quantitativo, visando avaliar sua influência no processo de polimento.

Recomenda-se analisar a influência da densidade inicial da *Wolffia brasiliensis* no aparecimento de algas. De acordo com a literatura, a cobertura total da superfície da água com macrófitas aquáticas pode inibir o aparecimento de algas.

Por fim, recomenda-se o cultivo da *Wolffia brasiliensis* em situação desfavorável a seu desenvolvimento, como em efluentes com baixa concentração de nutrientes, visando avaliar a influência das condições de cultivo na concentração de proteína total, carboidrato total e amido na biomassa da planta.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAZIK, M.H. **Dynamic modelling of facultative waste stabilization ponds**. 1991. 303 f. PhD Thesis - Imperial College, London, 1991.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de Esgotamento Sanitário Municipal**. Brasília: ANA, 2020.
- ALAERTS, G. J.; MAHBUBAR, R.; KELDERMAN, P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon. **Water Research**, Grã-Bretanha, v. 30, n. 4, p. 843–852, 1996.
- ALMEIDA, N.C.C.; SANTOS JÚNIOR, C.F.; NUNES, A.; LIZ, M.S.M. Educação ambiental: a conscientização sobre o destino de resíduos sólidos, o desperdício de água e o de alimentos no município de Cametá/PA. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, [s. l.], v. 100, n. 255, p. 481–500, 2019.
- AMARAL, I.C. **Reutilização de águas residuais tratadas na rega de espaços verdes: efeito de salinidade nos solos e nas plantas**. 2019. 117 f. Dissertação (mestrado) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/12317>. Acesso em: 14 jul. 2023.
- APHA. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 23^aed. Washington DC: Associação Americana de Saúde Pública: Washington DC: Associação Americana de Saúde Pública, 2017.
- APPENROTH, K.J.; SREE, K.S.; BOHM, V.; HAMMANN, S.; VETTER, W.; LEITERER, M.; JAHREIS, G. Nutritional value of duckweeds (Lemnaceae) as human food. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 217, p. 266–273, 2017.
- APPENROTH, K.J.; SREE, K.S.; BOG, M.; ECKER, J.; SEELIGER, C.; BOHM, V.; LORKOWSKI, S.; SOMMER, K.; VETTER, W.; TOLZIN-BANASCH, K.; KIRMSE, R.; LEITERER, M.; DAWCZYNSKI, C.; LIEBISCH, G.; JAHREIS, G. Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus Wolffia (Lemnaceae) as Human Food. **Frontiers in Chemistry**, [s. l.], v. 6, 2018.
- ARCEIVALA, S.J. Wastewater treatment and disposal. **Engineering and ecology in pollution control**. New York, Marcel Dekker. 892 p., 1981.
- BAKER, K.; COOK, R..J. Biological control of plant pathogens. [s. l.], v. 11, n. 2, p. 159, 1974.
- BARÉA, L. C.; ALÉM SOBRINHO, P. **Comportamento de lagoa de polimento na Região Metropolitana de Curitiba e possibilidade de uso de lentilhas d'água para melhoria da qualidade do efluente**. 2005. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001476532>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- BARROSO JUNIOR, J.C.A. **AVALIAÇÃO DE LAGOAS DE TRATAMENTO COM PRESENÇA DE MACRÓFITAS FLUTUANTES E MICROALGAS APLICADAS AO**

PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM CONDIÇÕES DE CLIMA SUBTROPICAL. 2020. 168 f. Dissertação (DOUTORADO) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2020.

BENJAWAN, L.; KOOTTATEP, T. Nitrogen removal in recirculated duckweed ponds system. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 55, n. 11, p. 103–110, 2007.

BHANTHUMNAVIN, K.; MCGARRY, M.G. Wolffia arrhiza as a Possible Source of Inexpensive Protein. **Nature**, [s. l.], v. 232, n. 5311, p. 495–495, 1971.

BIELESKI, R.L.; TURNER, N.A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 278–293, 1966.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 248–254, 1976.

BRASIL. **Decreto-lei nº 152/97**: nº 139/1997, n. 152/97, 19 jun. 1997.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2015. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2023.

BUSS, M.V.; NUNES, E. de O.; MENEZES, J.C.S. dos S. Avaliação dos níveis de fertilização das águas residuárias em duas lagoas de polimento com ocorrência de macrófitas do gênero Wolffia. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, [s. l.], n. 28, p. 7, 2015.

CASARIN, F.; SANTOS, M. dos. **Água: o ouro azul: Usos e abusos dos recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Editora Garamond, 2011. (Coleção desafios do século XXI). v. 1

CEMIG. Macrófitas Aquáticas: Caracterização e importância em reservatórios hidrelétricos. Belo Horizonte, n. 1, 96p, 2021.

CHEN, G.; FANG, Y.; HUANG, J.; ZHAO, Y.; LI, Q.; LAI, F.; XU, Y.; TIAN, X.; HE, K.; JIN, Y.; TAN, L.; ZHAO, H. Duckweed systems for eutrophic water purification through converting wastewater nutrients to high-starch biomass: comparative evaluation of three different genera (Spirodela polyrhiza, Lemna minor and Landoltia punctata) in monoculture or polyculture. **RSC Advances**, [s. l.], v. 8, n. 32, p. 17927–17937, 2018.

CHENG, J.; BERGMANN, B.A.; CLASSEN, J.J.; STOMP, A.M.; HOWARD, J.W. Nutrient recovery from swine lagoon water by Spirodela punctata. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 81, p. 81–85, 2002.

CHENG, J.J.; STOMP, A.M. Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed. **CLEAN – Soil, Air, Water**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 17–26, 2009.

COSTA, D.B. **Uso de processos físico e físico-químico na separação de lodo de lagoas de estabilização da ETE de Ilha Solteira - SP e diferentes processos de secagem.** 2015. 114 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

CROSS, J.W. **THE CHARMS OF DUCKWEED.** Missouri Botanical Garden: [s. n.], 2006.

DALU, J.M.; NDAMBA, J. Duckweed based wastewater stabilization ponds for wastewater treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe). **Physics and Chemistry of the Earth**, [s. l.], v. 28, p. 1147–1160, 2003.

EKPERUSI, A.O.; SIKOKI, F.; NWACHUKWU, E.O. Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. **Elsevier BV**, [s. l.], v. 223, p. 285–309, 2019.

EPSTEIN, E. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. **Silicon**, [s. l.], v. 50, p. 641–664, 1999.

EPSTEIN, E. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. **J. Wiley and Sons**, New York, 1972. p. 68–82.

ESTEVES, F. de A. Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ). **Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**, Rio de Janeiro, 1998. p. 442–442.

FAO. **AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture.** [S. l.], 2015. Disponível em: Acesso em: 23 jun. 2023.

FAO. **AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture.** [S. l.], 2018. Disponível em: Acesso em: 23 jun. 2023.

FAO, F. and A. O. of the U. N. **O Estado da Pesca e Aquicultura Mundial 2022:** Em direção à transformação azul. Roma: FAO, 2022.

FARRELL, J. B. **Duckweed Uptake of Phosphorus and Five Pharmaceuticals: Microcosm and Wastewater Lagoon Studies.** 2012. 193 f. Thesis (MASTER) - UTAH STATE UNIVERSITY, Utah, 2012.

FASKIN, E. A. Differential sensitivity of four Lemnaceae species to zinc sulphate. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 62, p. 185–187, 1999.

FOUROUTJIAN, P.; FAKHOORIAN, T.; CAO, X. H. Importance of Duckweeds in Basic Research and Their Industrial Applications. *In*: **THE DUCKWEED GENOMES.** Cham: Springer International Publishing, p. 1–17, 2020.

GAIGHER, I.G.; SHORT, R. An evaluation of duckweed (Lemnaceae) as a candidate for aquaculture in South Africa. *In*: **AQUACULTURE 1980 REPORT SERIES.** 15. ed. Canberra: Wamsley R. D., Wan J. G., 1986. p. 81–90.

GARCIA, D.C.D.O. **Avaliação de lagoas de lemnáceas no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa**. 2015. 78 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

HASAN, M.R.; CHAKRABARTI, R. **Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture: a review**. Rome: FAO, 2009. (FAO fisheries and aquaculture technical paper, v. 531).

IKEHATA, K.; JODEIRI, N.; EL-DIN, M.G. Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review. **Ozone: Science and Engineering**, v. 28, n. 6, p. 353-414, 2006.

JONES, E.R.; VLIET, M.V.; QADIR, M.; BIERKENS, M.F.P. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 237–254, 2021.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. Tratamento de esgotos domésticos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 6–6, 2006.

KC, B.K.; POLPRASERT, C. An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed-based wastewater treatment (DUBWAT) system. **Ecological Engineering**, [s. l.], p. 243–250, 2013.

KÖRNER, S.; LYATUU, G.B.; VERMAAT, J.E. The influence of *Lemna gibba* L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater. **Water Research**, [s. l.], v. 32, n. 10, p. 3092–3098, 1998.

KOTOWSKA, U.; KARPINSKA, J.; KAPELEWSKA, J.; KOWEJSZA, E.M.; PIOTROWSKA-NICZYPORUK, A.; PIEKUTIN, J.; KOTOWSKI, A. Removal of phthalates and other contaminants from municipal wastewater during cultivation of *Wolffia arrhiza*. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 120, p. 268–277, 2018.

LACOU, P.; FREEDMAN, B. Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. **Environmnetal Reviews**, [s. l.], v. 14, p. 89–136, 2006.

LANDESMAN, L.; PARKER, N.C.; FEDLER, C.B.; KONIKOFF, M. Modeling duckweed growth in wastewater treatment systems. **Livestock Research for Rural Development**, [s. l.], v. 17, n. 6, Livestock Research for Rural Development, p. 9, 2005.

LANDOLT, E. (org.). **Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae)**. Zürich: Elias Landolt, 1986. v. 2

LANDOLT, E.; KANDELER, R. **The Family of Lemnaceae: A Monographic Study**. Zürich: Geobotanischen Institutes der ETH, 1987. v. 2

LU, D.; BAI, H.; KONG, F.; LISS, S.N.; LIAO, B. Recent advances in membrane aerated biofilm reactors. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 51, n. 7, p. 649–703, 2021.

LUCENA, C.Y.D.S.; SANTOS, D.J.R; SILVA, P.L.S; COSTA, E.D; LUCENA, R.L. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, [s. l.], v. 4, p. 1–17, 2018.

MADALÃO, J. C.; PIRES, F.R; CARGNELUTTI FILHO, A.; NASCIMENTO, A.F; CHAGAS, K.; ARAUJO, R.S.; PROCÓPIO, S.O; BONOMO, R. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. Portal Embrapa. **Embrapa Soja**, [s. l.], 2013.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARQUES, M.B.L. **Bioindicadores de ambientes aquáticos contaminados pelo inseticida clorpirifós**. 2019. 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

METCALF; EDDY, Inc. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse**. 3º ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1991.

MITCHELL, D.S. **Aquatic vegetation and its use and control**. Paris: D. S. Mitchel, 1974.

MOHEDANO, R.A. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL. [s. l.], 2010.

MONTE, H.M; SANTOS, M.T; BARREIROS, A.M; ALBUQUERQUE, A. **TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS: OPERAÇÕES E PROCESSOS DE TRATAMENTO FÍSICO E QUÍMICO**. Lisboa: ERSAR, 2016. Disponível em: Acesso em: 14 jul. 2023.

MONTE, H.M.; ALBUQUERQUE, A. **Reutilização de Águas Residuais**. Lisboa, Portugal: ERSAR, 2010.

NASCIMENTO, J.R.D.S.D. **LAGOAS DE ALTA TAXA DE PRODUÇÃO DE ALGAS PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS**. 2001. 166 f. Dissertação (mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2001.

NECKLES, H.A.; WETZEL, R.L.; ORTH, R.J. Relative effects of nutrient enrichment and grazing on epiphyte-macrophyte (*Zostera marina* L.) dynamics. **Oecologia**, [s. l.], v. 93, n. 2, p. 285–295, 1993.

NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

OBASA, J.O. **Utilization of biomass (water hyacinth, phragmites karka and cow dung) in the production of biogas**. 2010. 50 f. - University of Agricultures, Abeokuta, Nigéria, 2010.

ORTIZ, I.A.S.; MATSUMOTO, T. Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. **Engenhheiro de desenvolvimento**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 199–222, 2012.

PAGIORO, T.A.; THOMAZ, S.M. Decomposition of *Eichhornia azurea* from limnologically different environments of the Upper Paraná River floodplain. **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 411, n. 0, p. 45–51, 1999.

PEDRALLI, G. Macrófitos aquáticos: técnicas e métodos de estudos. **Estudos de Biologia**, [s. l.], v. 26, p. 5–24, 1990.

PEREIRA, P.C.; BRUNETTI, I.A.; CASTRO, K.S; CHIAROTTI, L.F; SANTOS, B.E; MORAES, J.C; CRUZ, C. Acute Toxicity of Herbicides and Sensibility of Aquatic Plant *Wolffia brasiliensis* as a Bioindicator Organism. **Planta Daninha**, [s. l.], v. 37, n. 019201636, p. 9, 2019.

PORATH, D.; POLLOCK, J. Ammonia stripping by duckweed and its feasibility in circulating aquaculture. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 13, Growth Regulators in Aquatic Plants, p. 125–131, 1982.

POTT, V.; CERVI, C.A família Lemnaceae Gray no Pantanal (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 153–174, 1999.

POTT, V.J.; LOURENÇO, A.R. *Wolffia Horkel ex Schleid*. [s. l.], 2020.

POTT, V.J.; POTT, A. **Plantas Aquáticas do Pantanal**. 1. ed. EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal (CORUMBA, MS): Embrapa, 2000.

QASIM, S.R. Wastewater treatment plants: planning, design and operation. New York: **Rinehart and Winston**, 1985.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 175–184, 2016.

ROMANO, L.E.; ARONNE, G. The World Smallest Plants (*Wolffia* Sp.) as Potential Species for Bioregenerative Life Support Systems in Space. **Plants**, [s. l.], p. 11, 2021.

SATYA, A.; SATYA, I.A.; CHRISMADHA, T. Nitrogen uptake competition between minute duckweed (*Lemnaperpusilla*Torr) and microalgae under various nutrient composition. **International Conference on Tropical Limnology**, [s. l.], v. 535, n. 1, p. 15, 2020.

SCRIPTORE, J.S.; TONETO JÚNIOR, R. A estrutura de provisão dos serviços de saneamento básico no Brasil: uma análise comparativa do desempenho dos provedores públicos e privados. **Revista de Administração Pública**, [s. l.], v. 6, n. 46, p. 1479–1504, 2012.

SHELEF, G.; KANAREK, A. Stabilization ponds with recirculation. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 31, n. 12, Waste Stabilisation Ponds and the Reuse of Pond Effluents, p. 389–397, 1995.

SILVA, S.S.L. **Caracterização ecológica e estrutural de macrófitas em reservatórios no estado de Pernambuco**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural Pernambuco, [s. l.], 2011.

SKILLICORN, P.; SPIRA, W.; JOURNEY, W. **Duckweed aquaculture: a new aquatic farming system for developing countries**. Washington DC/USA: World Bank, 1993. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/138350>. Acesso em: 19 jul. 2023.

SODA, S.; KAWAHATA, Y.; TAKAI, Y.; MISHIMA, D.; FUJITA, M.; IKE, M. Kinetics of nutrient removal and biomass production by duckweed *Wolffia arrhiza* in continuous-flow mesocosms. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 57, p. 210–215, 2013.

SOUZA, W. A. **TRATAMENTO DE ÁGUA**. Natal: CEFET-RN, 2007.

SUPPADIT, T.; PHOOCHINDA, W.; PHUTTHILERPHONG, S.; NIEOBUBPA, C. Treatment of effluent from shrimp farms using watermeal (*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.). **ScienceAsia**, [s. l.], v. 34, p. 163–168, 2008.

TAVARES, F.A.; BOSCO, J.; RODRIGUES, R. Desempenho da macrófita *Lemna valdiviana* no tratamento terciário de efluentes de suinocultura e sua contribuição para a sustentabilidade da atividade. **Biotemas**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 17–27, 2008.

TELES, C.C. **Avaliação de lagoas de lemnas para o polimento de esgoto doméstico com foco na microbiota associada**. 2016. 135 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TONON, G. **Avaliação de lagoas de lemnas para o polimento de esgoto doméstico: emissões de GEE e valorização de biomassa na produção de biometano**. 2016. 154 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TRINDADE, C.R.T.; PEREIRA, S.A.; ALBERTONI, E.F.; SILVA, C.P. Caracterização e importância das macrófitas aquáticas com ênfase nos ambientes límnicos do campus Carreiros - FURG, Rio Grande, RS. [s. l.], v. 5, n. 2, **Cadernos de Ecologia Aquática**, p. 22, 2010.

UCHIDA, R. **Essential Nutrients for Plant Growth: Nutrient Functions and Deficiency Symptoms**. University of Hawaii at Manoa, Honolulu: Silva, J.A. and Uchida, R., 2000. (Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils). v. 4

UMBREIT, W.W.; KINGSLEY, G.R.; SCHAFFERT, R.R. A colorimetric method for transaminase in serum or plasma. **The Journal of Laboratory and Clinical Medicine**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 454–459, 1957.

UNEP, I.L.E.C.F. **Guidelines of lake management**. Manitoba/Canada: International Lake Environment Committee, UNEP, 1990. v. 4

UYSAL, Y. Removal of chromium ions from wastewater by duckweed, *Lemna minor* L. by using a pilot system with continuous flow. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 263, p. 486–492, 2013.

VALDERRAMA, L. T.; DEL CAMPO, C.M.; de BASHAN, L.E.; BASHAN, Y. Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalga *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minuscula*. **Water Research**, [s. l.], v. 36, n. 17, p. 4185–4192, 2002.

VALENTIM, M. **Desempenho de leitos cultivados (“constructed wetland”) para tratamento de esgoto : contribuições para concepção e operação** / . 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, Campinas/SP, 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte-MG: DESA, 2005. v. 1

VON SPERLING, M. **LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO**. 2. ed. Belo Horizonte-MG: SEGRAC, 2002. v. 3

WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). **Wastewater: The Untapped Resource**. Paris: UNESCO: [s. n.], 2017. (The United Nations World Water Development Report). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153>. Acesso em: 14 jul. 2023.

XU, J.; ZHAO, H.; STOMP, A.M.; CHENG, J.J. The production of duckweed as a source of biofuels. **Biofuels**, [s. l.], v. 3, p. 589–601, 2012.

XU, J.; SHEN, G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 848–853, 2011.

YEMM, E.W.; WILLIS, A.J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 508–514, 1954.

ZANETONI FILHO, J.A. **CULTIVO DE LANDOLTIA PUNCTATA NA REMOÇÃO DE DESREGULADORES ENDÓCRINOS E NO POLIMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM LAGOA COM RECIRCULAÇÃO**. 2019. 118 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

ZHANG, Y.; GUIFANG, Y.; FEIFEI, L. Purification of water of wastewater pond by *Wolffia arrhiza*. **Journal of Xinyang Normal University Natural Science Edition**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 473–475, 2011.