



Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental
Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental

Stephani Loren de Menezes

Microalgas nativas no tratamento de efluente suíno

Agosto de 2022, Uberlândia- MG



Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental
Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental

Stephani Loren de Menezes

Microalgas nativas no tratamento de efluente suíno

Dissertação de mestrado
apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Qualidade Ambiental do
Instituto de Ciências Agrárias da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva (UNESP/Bauru)

Agosto de 2022, Uberlândia- MG

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M543m Menezes, Stephani Loren de, 1992-
2022 Microalgas nativas no tratamento de efluente suíno [recurso eletrônico] / Stephani Loren de Menezes. - 2022.

Orientador: Marcio Ricardo Salla.

Coorientador: Gustavo Henrique Ribeiro daSilva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5073>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

I. Qualidade ambiental. I. Salla, Marcio Ricardo, 1976-, (Orient.).II. Silva, Gustavo Henrique Ribeiro da, 1974-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental. IV. Título.

CDU: 574

André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Qualidade Ambiental (PPGMQ) | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, 08/2022, PPGMQ | | | | |
| Data: | 12 de agosto de 2022 | Hora de início: | 14:00 | Hora de encerramento: | 16:30 |
| Matrícula da Discente: | 11912MQA020 | | | | |
| Nome da Discente: | STEPHANI LOREN DE MENEZES | | | | |
| Título do Trabalho: | Microalgas nativas no tratamento de efluente suíno | | | | |
| Área de concentração: | Meio Ambiente e Qualidade Ambiental | | | | |
| Linha de pesquisa: | Processos Ambientais | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Microalgas nativas no tratamento de efluente suíno | | | | |

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla (orientador); Prof.ª Dr.ª Sueli Moura Bertolino (UFU); e Prof.ª Dr.ª Carla Eloísa Diniz dos Santos (UFTM).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, às examinadoras, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/08/2022, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sueli Moura Bertolino, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/08/2022, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carla Eloísa Diniz dos Santos, Usuário Externo**, em 12/09/2022, às 08:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3770151** e o código CRC **7A2EA1B0**.

RESUMO

O novo conceito de saneamento visa a recuperação máxima de energia e de nutrientes, minimizando o uso de água potável e emissões de micropoluentes nas águas superficiais e no solo. Os reatores anaeróbios têm a capacidade de remoção de altas cargas de matéria orgânica, auxiliando no cultivo sequencial de microalgas. Essas microalgas podem efetivamente assimilar nitrogênio, fósforo, CO₂ e outros macro e micronutrientes de águas residuais, convertendo-os em biomassa algal com conseqüente remoção de nutrientes e matéria orgânica do efluente tratado. Neste contexto, utilizando-se efluente bruto de suinocultura, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da luminosidade, da diluição do efluente e da agitação mecânica na capacidade das microalgas nativas em remover os nutrientes fósforo total e nitrogênio total, além de matéria orgânica carbonácea a partir dos parâmetros indiretos como DBO e DQO. Os parâmetros pH, temperatura e sólidos suspensos monitorados auxiliaram na avaliação dos fenômenos físicos e químicos que influenciaram o enriquecimento da biomassa. De maneira geral, o aumento da intensidade luminosa também aumentou a capacidade de remoção de nutrientes. A agitação mecânica e a diluição do efluente de alimentação não foi fator relevante para produzir resultados de remoção de nutrientes entre os tratamentos segundo o método estatístico de comparações múltiplas de Kruskal Wallis com nível de significância de 95%, assim em ambos os casos com um p-valor maior que 0,05. Os tratamentos propostos foram capazes de atingir uma média de 80% de remoção de fósforo para o tratamento com quatro lâmpadas (16000 lux) e 90% de remoção de nitrogênio para o tratamento com três lâmpadas (12000 lux). A DQO chegou ao máximo de 92% de remoção no tratamento com 2 lâmpadas (8000 lux) e a DBO com 99% de remoção nos tratamentos com 2 lâmpadas (8000 lux) e com luz natural.

Palavras-chave: luminosidade, agitação mecânica, efluente diluído

ABSTRACT

The new sanitation concept aims to obtain maximum energy and nutrients, minimizing the use of potable water and micropollutant emissions in fallen water and soil. Anaerobic reactors have the ability to remove high loads of organic matter, helping in the sequential cultivation of microalgae. These microalgae can effectively assimilate particles, phosphorus, CO₂ and other macro and micronutrients from wastewater, converting them into algal biomass with consequent removal of nutrients and organic matter from the treated effluent. In this context, using raw effluent from swine farming, the objective of this study was to evaluate the influence of luminosity, effluent dilution and mechanics on the ability of native microalgae to remove total phosphorus nutrients and develop total phosphorus, in addition to carbonaceous organic matter to from indirect parameters such as BOD and COD. The monitored pH, temperature and suspended solids parameters help in the evaluation of the physical and chemical phenomena that influenced the biomass enrichment. In general, the increase in light intensity also increased the nutrient removal capacity. The mechanics and dilution of the feed effluent was not a relevant factor to produce nutrient removal results between treatments according to the statistical method of multiple comparisons of Kruskal Wallis with a significance level of 95%, so in both cases with a p- value greater than 0.05. Conventional treatments were able to achieve an average of 80% phosphorus removal for the four lamp treatment (16000 lux) and 90% water removal for the three lamp treatment (12000 lux). The COD reached a maximum of 92% removal in the treatment with 2 lamps (8000 lux) and the BOD reached 99% removal in the treatments with 2 lamps (8000 lux) and with natural light.

Keywords: light, mechanical agitation, diluted effluent

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Desenho esquemático de um tanque raceway..... | 10 |
| Figura 2 - Cultivo de microalgas em tanques raceway em Califórnia, EUA | 11 |
| Figura 3 - Desenho esquemático de um fotobiorreator tubular | 12 |
| Figura 4 - Fotobiorreator tubular helicoidal | 13 |
| Figura 5 - Biodigestor na Fazenda Bom Sucesso | 19 |
| Figura 6 - Frascos de inóculos de microalgas ao longo de um ciclo de sete dias | 21 |
| Figura 7 - Introdução da solução na lamínula e quadrantes da Câmara de Neubauer..... | 22 |
| Figura 8 - Aparato experimental..... | 23 |
| Figura 9 - Aparência do efluente após filtração (2) e centrifugação (3) - controle, experimentos 2 e 3..... | 25 |
| Figura 10 - Imagem de microalgas em um dos quadrantes, obtida por meio de celular focado na tela de visualização do microscópio ótico..... | 30 |
| Figura 11 - Experimento 2 e 3 | 33 |
| Figura 12 - Remoção e concentração de fósforo ao longo dos ciclos para os reatores 1 a 3..... | 36 |
| Figura 13 - Remoção e concentração de fósforo ao longo dos ciclos para os reatores 1 a 3, diferenciando o fator iluminação | 37 |
| Figura 14 - Fluxograma para diferença entre os tratamentos 1,2 e 3 | 39 |
| Figura 15 - Dispersão entre sólidos suspensos, pH, remoção de fósforo e nitrogênio para os reatores 4 e 5 | 53 |
| Figura 16 – Média de remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator iluminação | 56 |
| Figura 17 – Média de remoção e concentração de fósforo e nitrogênio diferenciando o fator mistura..... | 57 |
| Figura 18 – Média de remoção e concentração de nitrogênio total diferenciando o fator iluminação..... | 60 |
| Figura 19 – Média de remoção e concentração de fósforo e nitrogênio diferenciando o fator mistura..... | 62 |
| Figura 20 - Temperatura ao longo dos ciclos para as configurações 6 a 9..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - pH vs reatores para as configurações 6 a 9 | 66 |
| Figura 22 - Dispersão dos dados entre temperatura e pH..... | 68 |
| Figura 23 - Dispersão dos dados entre sólidos suspensos e remoções de fósforo e nitrogênio..... | 71 |
| Figura 24 - Dispersão dos dados entre sólidos suspensos e temperatura | 72 |
| Figura 25 - Remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator iluminação para as configurações 10 a 13..... | 75 |
| Figura 26 - Remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator agitação para as configurações 10 a 13..... | 76 |
| Figura 27 - Remoção e concentração de nitrogênio para as configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação | 79 |
| Figura 28 - Remoção e concentração de fósforo e nitrogênio para as configurações 9 a 12 ao longo dos ciclos diferenciando o fator mistura..... | 81 |
| Figura 29 - Temperatura ao longo dos ciclos para as configurações 10 a 13.... | 83 |
| Figura 30 - pH vs reatores para as configurações 10 a 13 | 85 |
| Figura 31 - Dispersão dos dados entre temperatura e pH para as configurações 10 a 13 | 87 |
| Figura 32 - Contagem de células para as configurações 10 a 13..... | 89 |
| Figura 33 - Visão comparativa de sólidos suspensos (colunas) e contagem de células (linha) para as configurações 10 a 13 | 90 |
| Figura 34 - Dispersão entre parâmetros sólidos suspensos, células de microalgas e temperatura para as configurações 10 a 13 | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Métodos para medição dos parâmetros estudados..... | 17 |
| Tabela 2 - Caracterização dos frascos de inoculação..... | 20 |
| Tabela 3 - Matriz de planejamento experimental variando aeração, agitação, luminosidade e diluição do efluente. Sistema em batelada com sete dias cada repetição. | 26 |
| Tabela 4 - Caracterização do efluente de suinocultura aplicado nos experimentos de 1 a 13..... | 28 |
| Tabela 5 - Resultados da contagem de células | 31 |
| Tabela 6 - Nova configuração dos frascos de inoculação..... | 31 |
| Tabela 7 - Resultados da nova configuração dos frascos de inóculos | 32 |
| Tabela 8 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 1, 2 e 3 | 33 |
| Tabela 9 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 1 a 3 | 35 |
| Tabela 10 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 1 a 3 diferenciando o fator iluminação. | 36 |
| Tabela 11 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 1 a 3..... | 38 |
| Tabela 12 – Média de remoção e concentração de DQO para as configurações 2 e 3 | 39 |
| Tabela 13 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 4 e 5 | 40 |
| Tabela 14 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 4 e 5 | 41 |
| Tabela 15 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 4 e 5 diferenciando o fator diluição | 42 |
| Tabela 16 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 4 e 5..... | 43 |
| Tabela 17 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 1 e 5..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Tabela 18 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo entre os reatores controle das configurações 1 e 5 | 44 |
| Tabela 19 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de Nitrogênio para os reatores das configurações 4 e 5..... | 45 |
| Tabela 20 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de Nitrogênio para os reatores das configurações 4 e 5 diferenciando o fator diluição | 46 |
| Tabela 21 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de nitrogênio configurações 4 e 5..... | 48 |
| Tabela 22 - Gráficos de concentração e remoção para DQO e DBO das configurações 4 e 5 | 48 |
| Tabela 23 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 4 e 5 | 49 |
| Tabela 24 - Estatística descritiva da variável sólidos suspensos para os reatores das configurações 4 e 5..... | 50 |
| Tabela 25 - Coeficiente de correlação de Spearman para sólidos suspensos, pH, remoção de fósforo e nitrogênio | 51 |
| Tabela 26 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 6 a 9..... | 53 |
| Tabela 27 - Estatística descritiva da variável Fósforo para os reatores 6 a 9 | 54 |
| Tabela 28 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator iluminação | 55 |
| Tabela 29 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator mistura..... | 56 |
| Tabela 30 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de | 58 |
| Tabela 31 - Estatística descritiva da variável nitrogênio para os reatores 6 a 9 | 59 |
| Tabela 32 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator iluminação | 59 |
| Tabela 33 - Estatística descritiva da variável nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator mistura | 61 |
| Tabela 34 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de nitrogênio | 62 |
| Tabela 35 - Análise descritiva de temperatura para as configurações 6 a 9 | 65 |

| | |
|--|----|
| Tabela 36 - Teste Kruskal – Wallis e comparações múltiplas temperatura vs iluminação para as configurações 6 a 9 | 65 |
| Tabela 37 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 6 a 9 | 66 |
| Tabela 38 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle” e “Microalgas” das configurações 6 a 9 | 67 |
| Tabela 39 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle”, “Aeração” e “Aeração e agitação” para as configurações 6 a 9 | 67 |
| Tabela 40 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “1 Lâmpada” e “3 Lâmpada” das configurações 6 a 9 | 68 |
| Tabela 41 - Coeficiente de correlação de Spearman entre temperatura e pH para as configurações 6 a 9 | 69 |
| Tabela 42 - Estatística descritiva da variável sólidos suspensos para os reatores das configurações 6 a 9 | 69 |
| Tabela 43 - Coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis da configuração 6 a 9 | 70 |
| Tabela 44 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para sólidos suspensos configurações 6 a 9 | 72 |
| Tabela 45 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 10 a 13 | 73 |
| Tabela 46 - Estatística descritiva Fósforo configurações 10 a 13 | 74 |
| Tabela 47 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação | 74 |
| Tabela 48 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator mistura | 75 |
| Tabela 49 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de fósforo para os tratamentos das configurações 10 a 13 | 77 |
| Tabela 50 - Estatística descritiva Fósforo configurações 10 a 13 | 78 |
| Tabela 51 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação | 78 |
| Tabela 52 - Estatística descritiva da variável nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator mistura | 80 |

| | |
|--|----|
| Tabela 53 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de nitrogênio para os tratamentos das configurações 10 a 13 | 81 |
| Tabela 54 - Análise descritiva de temperatura para as configurações 10 a 13 .. | 84 |
| Tabela 55 - Teste Kruskal – Wallis e comparações múltiplas temperatura vs iluminação para as configurações 10 a 13 | 84 |
| Tabela 56 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 10 a 13 | 85 |
| Tabela 57 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle” e “Microalgas” das configurações 10 a 13 | 86 |
| Tabela 58 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle”, “Aeração” e “Aeração e agitação” das configurações 10 a 13 | 86 |
| Tabela 59 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “2 Lâmpadas” e “Luz natural” das configurações 10 a 13 | 87 |
| Tabela 60 - Coeficiente de correlação de Spearman entre temperatura e pH.... | 88 |
| Tabela 61 - Matriz de correlação de Spearman para as variáveis Célula/mL, Sólidos suspensos e Temperatura nos tratamentos de 10 a 13 | 91 |
| Tabela 62 - Matriz de correlação de Spearman para as variáveis célula/mL, sólidos suspensos, temperatura, remoção de fósforo e remoção de nitrogênio nos tratamentos de 10 a 13 | 92 |
| Tabela 63 - Remoção de fósforo para os tratamentos de iluminação | 94 |
| Tabela 64 - Remoção de nitrogênio para os tratamentos de iluminação | 95 |
| Tabela 65 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de fósforo para os tratamentos com aeração e sem aeração | 95 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| | i |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 3 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 3.1 MICROALGAS | 4 |
| 3.2 RELAÇÃO DO CARBONO E NUTRIENTES COM AS MICROALGAS | 5 |
| 3.2.1 <i>Carbono</i> | 5 |
| 3.2.2 <i>Nitrogênio</i> | 7 |
| 3.2.3 <i>Fósforo</i> | 9 |
| 3.3 CULTIVO DE MICROALGAS | 9 |
| 3.3.1 <i>Tanques Raceways</i> | 10 |
| 3.3.2 <i>Lagoa aberta</i> | 11 |
| 3.3.3 <i>Fotobiorreatores</i> | 12 |
| 3.4 FATORES QUE AFETAM O CRESCIMENTO ALGAL | 14 |
| 3.4.1 <i>Fornecimento de energia luminosa</i> | 14 |
| 3.4.2 <i>Mistura</i> | 15 |
| 3.4.3 <i>Temperatura</i> | 16 |
| 3.4.4 <i>pH</i> | 16 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 17 |
| 4.1 EFLUENTE SUÍNO ESTUDADO | 17 |
| 4.2 PREPARO DO INÓCULO DAS MICROALGAS..... | 19 |
| 4.3 CONTAGEM DE CÉLULAS DE MICROALGAS..... | 21 |
| 4.4 APARATO EXPERIMENTAL - FOTOBIORREACTORES | 23 |
| 4.5 CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS..... | 25 |
| 5 RESULTADOS | 27 |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO | 27 |
| 5.2 CONTAGEM DE CÉLULAS | 29 |
| 5.3 OPERAÇÃO DOS BIORREACTORES | 32 |
| 5.3.1 <i>Experimentos 1, 2 e 3</i> | 32 |
| 5.3.1.1 <i>Fósforo</i> | 34 |
| 5.3.1.2 <i>DQO</i> | 39 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3.2 | <i>Experimentos 4 e 5</i> | 40 |
| 5.3.2.1 | Fósforo | 41 |
| 5.3.2.2 | Nitrogênio | 44 |
| 5.3.2.3 | DQO e DBO | 48 |
| 5.3.2.4 | pH e sólidos suspensos | 49 |
| 5.3.3 | <i>Experimentos 6 ao 9</i> | 53 |
| 5.3.3.1 | Fósforo | 54 |
| 5.3.3.2 | Nitrogênio | 58 |
| 5.3.3.3 | DQO e DBO | 63 |
| 5.3.3.4 | Temperatura e pH | 64 |
| 5.3.3.5 | Sólidos suspensos | 69 |
| 5.3.4 | <i>Experimentos 10 ao 13</i> | 73 |
| 5.3.4.1 | Fósforo | 73 |
| 5.3.4.2 | Nitrogênio | 77 |
| 5.3.4.3 | DQO e DBO | 82 |
| 5.3.4.4 | pH e temperatura | 83 |
| 5.3.4.5 | Sólidos suspensos e contagem de células | 88 |
| 5.3.6 | <i>Visão geral dos experimentos 1 a 13</i> | 93 |
| 6. | CONCLUSÃO | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 99 |

1. INTRODUÇÃO

Diversos usos consuntivos da água, tais como: irrigação, abastecimento público e industrial, utilizam grandes quantidades deste recurso, o que resulta em enormes volumes de águas residuais que devem ser tratados. Excessos de nutrientes nas águas residuais, como fósforo e nitrogênio, matéria orgânica e poluentes tóxicos podem causar diversos problemas de poluição ambiental, como eutrofização em lagos e reservatórios, e danos ao equilíbrio do ecossistema aquático. Tais questões requerem soluções que são custosas e desafiadoras. Diante disto, uma abordagem econômica merece atenção especial para a redução dos impactos causados pelos nutrientes e outros contaminantes tóxicos existentes em água residuais (CAI; PARK; LI, 2013).

Ademais, o saneamento básico no Brasil é um assunto bastante negligenciado. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), cerca de 55% dos brasileiros não possuem coleta de esgoto, e destes, somente 79,8% do esgoto é tratado. Percebe-se que há uma grande demanda por tecnologia de baixo custo, para que haja de fato a universalização do saneamento, visto que o investimento governamental nesta área é insuficiente.

Em relação ao nível de tratamento do esgoto no Brasil o que predomina é o tratamento secundário, representando 69,8% do total de esgoto tratado. O tratamento terciário, que é o foco pretendido neste estudo, representa apenas 21,9% do total tratado, o que corrobora com a importância e demanda de pesquisas de tratamento de nutrientes em águas residuais (PNSB, 2017).

Uma alternativa tecnológica para o tratamento de efluentes envolve a recuperação de nutrientes e de carbono a partir do cultivo de microalgas. As microalgas nativas e exóticas, no processo de fotossíntese, utilizam a energia luminosa como fonte de energia, e essencialmente o nitrogênio e o fósforo como fonte de nutriente. A literatura da área traz diversos estudos que utilizaram os mecanismos de crescimento das microalgas na remoção/recuperação de nutrientes de águas residuais (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014). Segundo LI et al. (2011), as microalgas cultivadas em biorreatores alcançaram um potencial de remoção de nitrogênio

total e fósforo total de 89,1% e 80,9%, respectivamente, o que evidencia a competência das microalgas no pós-tratamento de efluente.

A proposta de tratamento, a partir de tecnologias de baixo custo, e reuso de esgoto terciário e biomassa algal provenientes de efluente suíno, contribuiria na diminuição dos déficits e desafios apontados no Plano de Saneamento Básico (PLANSAB) e Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em função de diversos fatores, tais como: redução de morbimortalidade de crianças e idosos relacionadas às doenças de veiculação hídrica, prática do conceito de sustentabilidade em consequência do emprego do resíduo rico em nutrientes no cultivo de diversas culturas, aproveitamento do lodo biológico na adubação do solo, uso de efluente líquido tratado na irrigação de diversas culturas e proveito térmico e energético do biogás gerado, aumento da capacidade produtiva de alimentos nas comunidades carentes e afastadas, e destino sustentável aos resíduos sólidos gerados nas propriedades rurais.

Dentro deste cenário, o foco do estudo é investigar a potencialidade e também limitação de microalgas nativas no tratamento e/ou pós-tratamento de efluente suíno, a fim da promoção de um saneamento sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O projeto teve como objetivo principal remover os nutrientes fósforo total, nitrogênio total e carbono do efluente suíno via crescimento de microalgas nativas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos incluem:

- Avaliar a influência da diluição do efluente suíno na capacidade das microalgas em remover fósforo total, nitrogênio total e carbono do efluente suíno;
- Avaliar a influência da agitação líquida no reator em batelada na capacidade das microalgas em remover fósforo total, nitrogênio total e carbono do efluente suíno;
- Avaliar a influência da intensidade luminosa na capacidade das microalgas em remover fósforo total, nitrogênio total e carbono do efluente suíno.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MICROALGAS

Microalgas são microrganismos unicelulares fotossintetizantes encontrados em todo o mundo. Estão distribuídas principalmente em ambientes aquáticos, mas também são encontradas na superfície de todos os tipos de solos. Constituem o chamado fitoplâncton, e nestes ambientes desempenham o papel de produtor primário. Embora geralmente sejam de vida livre, certo número de microalgas vive em associação simbiótica com uma variedade de outros organismos. Sua importância para este trabalho está no fato de absorver gás carbônico e nutrientes como fósforo e nitrogênio no seu metabolismo, sendo assim, objeto de pesquisas relacionadas ao tratamento de águas residuais (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 1996; RICHMOND, 2004; SINGH; DHAR, 2011).

A maioria das tecnologias convencionais de tratamento de águas residuais é baseada em métodos químicos e físicos. Provou-se que as microalgas são eficientes na remoção de nitrogênio, fósforo e metais tóxicos de uma ampla variedade de águas residuais (CAI; PARK; LI, 2013).

O consumo de carbono pelas microalgas se dá por metabolismo autotrófico, heterotrófico ou mixotrófico.

Os organismos autotróficos obtêm sua energia através da absorção de energia luminosa para redução de CO₂ pela oxidação de substratos, principalmente água, com liberação de O₂. Os organismos fotoautotróficos requerem apenas mineralizações inorgânicas, enquanto os fotoautotróficos obrigatórios são aqueles que não podem crescer no escuro. De longe, a maioria das algas pertence a essa última categoria, embora muitas exijam quantidades mínimas de compostos orgânicos para o crescimento, como as vitaminas (RICHMOND, 2004).

Organismos heterotróficos obtêm suas necessidades materiais e energéticas de compostos orgânicos produzidos por outros organismos. Várias espécies de algas podem ser cultivadas exclusivamente em substratos orgânicos e isso se tornou uma opção viável em

sistemas convencionais de produção de biorreatores fechados para biomassa e biocompostos, produzidos por certas espécies sob condições específicas de crescimento (RICHMOND, 2004).

Os organismos foto-heterotróficos requerem luz como fonte de energia para usar compostos orgânicos como nutrientes; os compostos orgânicos podem também satisfazer os requisitos energéticos das algas. A auxotrofia é o local onde as algas exigem apenas pequenas quantidades de compostos orgânicos essenciais, como vitaminas e aminoácidos. O crescimento mixotrófico ou anfitrófico é equivalente à autotrofia e heterotrofia, onde os compostos orgânicos e o CO₂ são necessários para o crescimento. Uma mudança definitiva entre autotrofia e heterotrofia não se manifesta, e ambos os processos estão presentes, exceto na escuridão total (RICHMOND, 2004).

3.2 RELAÇÃO DO CARBONO E NUTRIENTES COM AS MICROALGAS

3.2.1 Carbono

O carbono em sua forma inorgânica (CO₂) é consumido principalmente por organismos fotossintéticos. Como a maioria das microalgas está em ambientes aquáticos, o carbono presente para assimilação estará dissolvido. A Equação 1 traz a representação do equilíbrio entre a reação do dióxido de carbono e moléculas de água quando o CO₂ é dissolvido em meio aquoso, formando um sistema tampão ácido-base fraco (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).



A reação de equilíbrio esquematizada pela equação 1 depende do pH do meio, logo a quantidade relativa de carbono inorgânico dissolvido (CID) está relacionada ao pH do meio. O

intervalo de pH, para a maioria das microalgas, varia de 6,5 a 10. Neste intervalo, segundo a equação 1, a forma de carbono disponível é bicarbonato - HCO_3^- (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

As microalgas convertem carbono inorgânico a carbono orgânico por meio do Ciclo de Calvin. O primeiro passo do Ciclo de Calvin é a captação do CO_2 e sua junção em um composto com três carbonos. A absorção do dióxido de carbono é catalisada pela enzima Ribulose-1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo). Tal enzima só consegue utilizar carbono na forma CO_2 , assim, o melhor substrato para a fixação de carbono é o CO_2 . Entretanto, as microalgas desenvolveram vários mecanismos de captação de carbono dependendo do ambiente em que estão presentes, visto que a forma do carbono inorgânico dissolvido depende do pH, salinidade e temperatura (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

O consumo de carbono pode se dar de forma passiva ou ativa. O CO_2 é absorvido passivamente por meio de difusão em membrana, ou ativamente por meio de mecanismos de transporte de membrana (diferença de pressão). O bicarbonato somente é assimilado de maneira ativa, entretanto, por intermédio da enzima anidrase carbônica de metaloenzima (CA), a qual converte o HCO_3^- a CO_2 , assim ele pode ser consumido de forma passiva. Foi visto que a absorção ativa de CO_2 é consideravelmente mais rápida e energeticamente favorável quando comparada ao HCO_3^- (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

A atividade da CA é influenciada pela concentração do CID e aparenta ser maior em microalgas e cianobactérias cultivadas em meios com baixa concentração de CO_2 . A presença de CA em microalgas e cianobactérias é considerada como parte do mecanismo de concentração de CO_2 (MCC). O MCC abrange vários processos pelos quais a concentração intracelular de CO_2 em torno da enzima RubisCo é maior que a concentração no ambiente extracelular. Ou seja, o foco principal do MCC é transportar e concentrar ativamente o carbono inorgânico, de modo a ser usado como substrato para sua fixação. Se a concentração intracelular de CO_2 é baixa e a concentração de O_2 é alta, RuBisCo irá responder ao O_2 ao invés de CO_2 e assim irá produzir CO_2 ao invés de fixá-lo (fotorrespiração). Para diminuir a fotorrespiração basta aumentar a relação CO_2/O_2 por meio do MCC (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

Além do crescimento autotrófico das microalgas, algumas espécies são capazes de se desenvolver a partir de moléculas orgânicas, que são usadas como fonte de carbono e/ou energia heterotroficamente ou mixotroficamente. As principais formas de captação de carbono orgânico nas células são difusão, transporte ativo e fosforilação (PEREZ-GARCIA et al., 2011).

3.2.2 Nitrogênio

O nitrogênio é o segundo elemento mais abundante na biomassa de microalgas e pode variar de 1% a 14% - normalmente cerca de 5 a 10% - do peso seco, sendo, portanto, um nutriente essencial na formação de vários compostos bioquímicos da biomassa, como peptídios, ácidos nucleicos (DNA, RNA), aminoácidos (proteínas) e pigmentos como clorofilas e ficocianinas. Pode ser assimilado na forma inorgânica de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2), nitrogênio orgânico (NO), amônia (NH_4) e, em alguns casos, gás nitrogênio (N_2), mas também na forma orgânica, como ureia ou aminoácidos. A via principal na absorção do nitrogênio é por meio do sistema enzimático da glutamina sintetase, pelo qual o glutamato reage com amônio, consumindo energia via ATP – Adenosina trifosfato, para formar o aminoácido glutamina (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

Nitrato é a forma mineral do nitrogênio que é mais comumente utilizada por microalgas e cianobactérias em meios de culturas sintéticas. Para se consumir nitrato é necessário o dispêndio de energia, pois se dá por meio de mecanismos ativos (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014). Porém, a assimilação de nitrogênio por algas eucarióticas também pode utilizar nitrogênio inorgânico nas formas de nitrito e amônio (CAI; PARK; LI, 2013).

O nitrito, NO_2 , é frequentemente encontrado em ambientes naturais como produto intermediário do processo de nitrificação, ou seja, a oxidação de amônia em nitrato. Contudo, o nitrito também é intermediário intracelular do metabolismo do nitrogênio, que é o produto da redução de nitrato em nitrito pelo nitrato redutase, que é então reduzida ainda mais ao amônio por meio da ação do nitrito redutase. A principal maneira de captação de nitrito é através do transporte ativo, mas a difusão também foi relatada para microalgas e cianobactérias verdes.

Embora o nitrito possa ser absorvido e usado como fonte de nitrogênio, tem efeitos tóxicos em altas concentrações (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

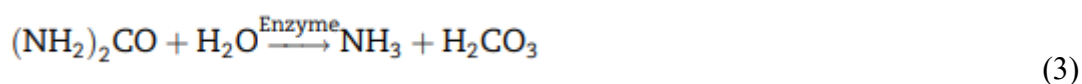
A amônia é uma molécula volátil, porém sua solubilidade é muito alta, sendo encontrada regularmente como uma solução líquida. Quando a amônia é dissolvida na água, ela reage com a água para formar um sistema tampão de amônia/amônio, conforme representado na equação 2.



O equilíbrio entre as formas de amônio (NH_4^+) e amônia livre (NH_3), depende principalmente do pH. Em valores de pH superiores a 9,25, a forma dominante é a amônia livre (NH_3). A temperatura também influencia significativamente no equilíbrio de amônia /amônio; o valor de pK diminui conforme a temperatura aumenta, o que indica que a amônia livre só será dominante em pH baixo se a temperatura for alta.

Amônia/amônio é a fonte de nitrogênio preferida das microalgas, pelo fato de sua absorção consumir menos energia, se comparada com outras fontes de nitrogênio. Entretanto, a taxa de produção ou crescimento da biomassa não é tão afetada, dependendo da fonte de nitrogênio usada. Usar amônia/amônio como fonte de nitrogênio tem uma séria limitação, devido ao seu potencial tóxico. Baixas concentrações de amônia livre já são suficientes para surtir efeitos negativos em microalgas. Porém, alguns estudos demonstram que o fator toxicidade da amônia varia de microrganismo para microrganismo (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

As formas de nitrogênio orgânico utilizado pelas microalgas são ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) e aminoácidos. Eles são transportados de forma ativa para dentro das células e metabolizados intracelularmente. A forma de nitrogênio orgânico mais importante como fonte principal de nitrogênio para microalgas é a ureia. Usualmente a ureia é hidrolisada para amônia e ácido carbônico, conforme esquema da equação 3, que serão utilizados pelas microalgas e cianobactérias.



3.2.3 Fósforo

O fósforo é um nutriente essencial no metabolismo de algas; compõe ácidos nucleicos, lipídios, proteínas e os intermediários do metabolismo de carboidratos. Compreende cerca de 0,05 a 3,3% da biomassa de microalgas. Ao longo do metabolismo das algas, o fósforo é introduzido aos compostos orgânicos por meio da fosforilação usando preferencialmente ácido fosfórico (H_2PO_4) e hidrogenofosfato (HPO_4), conseqüentemente gerando ATP a partir da adenosina difosfato (ADP), junto com uma forma de introdução de energia. Essa energia pode vir da oxidação dos substratos respiratórios, do sistema de transporte de elétrons das mitocôndrias ou, no caso da fotossíntese, da luz. Os fosfatos são transferidos por transporte energizado através da membrana plasmática da célula de algas. Não são apenas as formas inorgânicas de fósforo utilizadas pelas microalgas, mas algumas espécies de algas podem usar o fósforo encontrado nos ésteres orgânicos para seu desenvolvimento (CAI; PARK; LI, 2013; MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

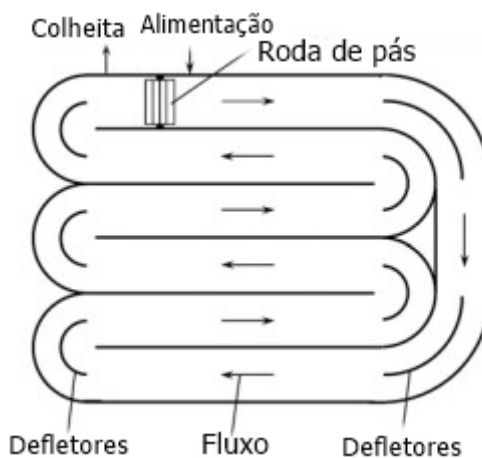
3.3 CULTIVO DE MICROALGAS

Os sistemas de cultivo de microalgas podem ser abertos ou fechados. As algas com produções comerciais são sintetizadas majoritariamente em sistemas abertos, em especial, “*Raceways*” e lagoas circulares, tendo como vantagem o uso da energia luminosa proveniente do sol. Entretanto, o cultivo de algas em sistemas abertos, quando realizado em grande escala, geralmente resultam em baixas densidades de células, o que acaba onerando os procedimentos de colheita, além de dificuldades com o controle de espécies (SUH, 2003).

3.3.1 Tanques Raceways

Um tanque *Raceway* é constituído de um canal de recirculação em circuito fechado que geralmente tem por volta de 0,3 m de profundidade (Figura 1), construído em concreto ou terra batida. A mistura e circulação são promovidas por uma roda de pás, e nas curvas o fluxo é orientado por defletores empregados no canal. A alimentação é feita durante o dia a jusante da roda de pás. Após a conclusão do ciclo de circulação, o caldo é colhido a montante da roda de pás. As pás operam durante todo o processo para evitar a sedimentação de sólidos (CHISTI, 2007).

Figura 1 - Desenho esquemático de um tanque raceway



Fonte: CHISTI, 2007 traduzido

Os tanques *Raceways* são utilizados para cultivo massivo de microalgas há mais de 50 anos. O resfriamento nesse tipo de cultivo é realizado apenas pela evaporação. A temperatura varia conforme as horas do dia e o ciclo solar. O decréscimo por evaporação pode ser significativo e, devido a essa perda para a atmosfera, a síntese de dióxido de carbono pode ser bem menos efetiva que em fotobiorreatores. A produtividade pode ser afetada pela contaminação de outras microalgas menos eficientes e microrganismos que se alimentam de algas. A mistura também pode ser um fator limitante na produção de biomassa, pois não distribui uniformemente energia luminosa resultando em zonas escuras (CHISTI, 2007). Tal fato sugere que estudos mais eficientes na disponibilização da energia luminosa devam ser

realizados para a efetiva produção de biomassa. A Figura 2 mostra um exemplo de cultivo massivo de microalgas através de tanques *Raceway* utilizados pela empresa Earthrise Nutritionals, implantada no Estado da Califórnia, EUA.

Figura 2 - Cultivo de microalgas em tanques *raceway* em Califórnia, EUA



Fonte: Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Open-raceway-type-culture-ponds-of-Earthrise-in-California-US-Source_fig2_263160730.

3.3.2 Lagoa aberta

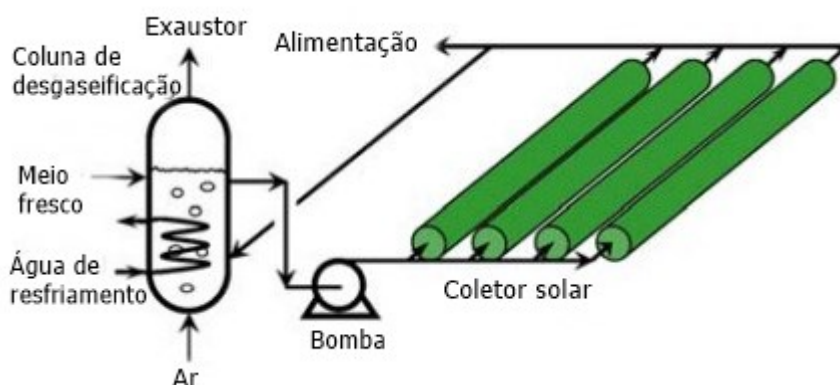
A lagoa aberta é o sistema aberto mais convencional, com aproximadamente 0,3 m de profundidade, propicia o fornecimento de luz solar suficiente para crescimento das microalgas por fotossíntese, e possui baixo custo de implantação e manutenção. Entretanto, alguns parâmetros necessários para um bom desempenho, como temperatura, pH e luminosidade são dependentes das condições ambientais do local (CAI; PARK; LI, 2013).

3.3.3 Fotobiorreatores

Buscando otimizar ainda mais os sistemas de produção de biomassa, e diferente das lagoas abertas e dos tanques *raceways*, os reatores em sistemas fechados caracterizam-se por funcionarem em condições ambientais controladas, por permitirem o cultivo de espécies únicas e selecionadas por um período prolongado, e serem apropriados para aplicações fotoautotróficas, mixotróficas ou heterotróficas, que proporcionam a produção de biomassa algal em larga escala. Embora várias características do processo possam ser alteradas para aumento de produtividade, suas limitações estão no fato do elevado custo de instalação e manutenção dos reatores (CAI; PARK; LI, 2013; CHISTI, 2007).

O fotobiorreator tubular é um exemplo típico. É constituído por um grupo de tubos transparentes retos que normalmente são feitos de plástico ou vidro. É por este agrupamento de tubos, também chamado de coletor solar, que a luz solar penetra e é utilizada como fonte de energia para produção de biomassa. Estes tubos têm em média 0,1 m de diâmetro. Tal medida tem profundidade limitada para que a luz solar consiga penetrar no meio líquido denso, o que é necessário para garantir uma alta produtividade de biomassa. O caldo, massa líquida com alta carga de nutrientes, é circulado de um reservatório para o coletor solar e de volta para o reservatório (Figura 3) (CHISTI, 2007).

Figura 3 - Desenho esquemático de um fotobiorreator tubular



Fonte: CHISTI, 2007 traduzido

O coletor solar é orientado para potencializar a capacidade de absorção da luz, os tubos são sempre posicionados na direção Norte-Sul, e o piso base é pintado de branco, ou coberto por lonas de plástico brancas, para aumentar o albedo e assim a quantidade de luz refletida para os tubos (CHISTI, 2007).

O coletor solar pode também ser feito de um plástico flexível e envolto em uma estrutura suporte, formando assim um fotobiorreator tubular helicoidal (ver Figura 4). Tais reatores são úteis para crescimento de microalgas em pequenos volumes, podendo ser usados para inocular fotobiorreatores de produção maior (CHISTI, 2007).

Figura 4 - Fotobiorreator tubular helicoidal



Fonte: CHISTI, 2007

3.4 FATORES QUE AFETAM O CRESCIMENTO ALGAL

Os principais fatores a serem considerados para que ocorra uma alta produtividade de biomassa algal são: fornecimento de energia luminosa (entrega e distribuição), CO₂, fornecimento de nutrientes, capacidade de mistura líquida no reator e outros parâmetros ambientais - temperatura, pH, etc. - (SUH, 2003). A sequência traz uma descrição sucinta dos fatores considerados neste estudo.

3.4.1 Fornecimento de energia luminosa

Para o crescimento fototrópico de algas é necessária a energia luminosa, que é uma preocupação especial em implementações no setor industrial. Portanto, a demanda por esta fonte de energia é um fator importante no momento de projetar um fotobiorreator eficiente e econômico. É importante considerar a qualidade e intensidade espectral no momento de escolha da fonte de luz. Microalgas absorvem comprimentos de luz no intervalo de 400 a 700 nm, e a eficiência fotossintética é dependente desse intervalo espectral fornecido pela fonte de luz. Os tipos de fontes luminosas disponíveis são: lâmpadas incandescentes (tungstênio ou lâmpadas halógenas), lâmpadas de descarga (mercúrio e fluorescentes), LEDs e lasers (SUH, 2003).

A iluminação pode ser artificial ou natural, todavia a configuração do aparato experimental ou da estação piloto deve ser otimizada para propiciar a entrada de luz em todo o sistema (ZHOU et al., 2017). LI et al. (2011) verificaram que a baixa disponibilidade de luz resultante do auto sombreamento, devido à alta densidade de algas e outras partículas presentes no concentrado bruto, adiantou a fase de declínio das microalgas. Por isso são importantes os mecanismos de aeração para promover a mistura do cultivo, evitando a sedimentação das microalgas, permitindo que todas as células recebam a mesma quantidade de luz.

A produção de biomassa aumenta conforme a intensidade luminosa também exacerba. Porém, existe uma intensidade de saturação na qual a produção de biomassa decai rapidamente

a partir da superação da repleção luminosa. Aparentemente, luz de alta intensidade estimula um processo chamado foto-oxidação, que danifica o fotossistema. Esse processo de deterioração das células causado por excesso de luz é chamado de “fotoinibição”, que é função da temperatura (SUH, 2003).

Conforme a luz penetra no efluente, sua intensidade é consideravelmente diminuída à medida que é absorvida pelas partículas sólidas do meio. Desta forma, a intensidade da fonte luminosa deve aumentar para superar essa barreira, e assim a energia chegar até as células. Entretanto, como foi discutido anteriormente, excesso de luz pode levar à fotoinibição e ao declínio da produção de biomassa. Uma solução para esta questão é o uso de luzes intermitentes (SUH, 2003).

3.4.2 Mistura

O sistema de mistura das culturas é um fator econômico importante no projeto de cultivo de microalgas, pois pode aumentar consideravelmente o custo de implantação.

Manter o meio líquido em constante mistura é essencial para manter as células em suspensão e aumentar a distribuição de energia luminosa e conseqüentemente a eficiência com que esta é capturada. A mistura auxilia nas trocas gasosas, o que ajuda a conter a estratificação térmica e também a oferta de nutrientes em todo o volume. Quando não há uma liga eficiente, a sedimentação pode ocorrer e o acúmulo de células em zonas mortas (anaeróbias). Entretanto, a agitação mecânica e aeração podem aumentar o *stress* de cisalhamento, o que pode restringir o metabolismo e crescimento das células (SUH, 2003).

3.4.3 Temperatura

A temperatura ótima para crescimento algal gira em torno de 15°C a 30°C; algumas cepas podem tolerar temperaturas mais altas. Regiões tropicais têm uma alta incidência solar, o que pode ser vantajoso no quesito iluminação natural, porém deve-se atentar para o aumento de temperatura do sistema (ZHOU et al., 2017).

3.4.4 pH

Em culturas de microalgas autotróficas, o pH tende a aumentar continuamente devido à diminuição de carbono durante o processo de fotossíntese. O pH do meio afeta a polaridade dos compostos e a disponibilidade de alguns nutrientes essenciais no desenvolvimento das microalgas, como o dióxido de carbono, ferro e ácidos orgânicos. Variações no pH também alteram o sistema de transporte de íons da membrana plasmática das microalgas. Assim, faz-se necessário o uso de soluções para correção de pH, mantendo o intervalo ótimo de pH para o crescimento das microalgas (SUH, 2003). Essa faixa de pH ótimo varia de acordo com a espécie de microalga, por exemplo, para *Chlorella* não superior a 9,0, já para *Spirulina* é de 9,5 a 10,5 (TREVISAN, 2013; ANDRADE; COSTA, 2008).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EFLUENTE SUÍNO ESTUDADO

O efluente estudado foi coletado na Fazenda Bom Sucesso, localizada na BR 455, próxima às margens da rodovia que interliga Uberlândia (MG) a Campo Florido (MG). A propriedade possui um criadouro de suínos e uma estação de tratamento do efluente suíno, constituída por biodigestor, seguido por uma lagoa de sedimentação, ambos revestidos com lona impermeabilizante. Em função da dinâmica de operação na estação de tratamento do efluente suíno, as amostragens ocorreram nas proximidades da superfície líquida do biodigestor e da lagoa. A coleta diretamente na lagoa de sedimentação ocorreu apenas quando, em função da inativação provisória no biodigestor para manutenção, os efluentes brutos provenientes da lavagem das baias de porcos foram direcionados diretamente para a lagoa de sedimentação. A partir de 04 de outubro de 2020, em função da descontinuidade do biodigestor, o efluente foi coletado diretamente na lagoa de sedimentação.

O efluente foi coletado com o auxílio de baldes e um funil plástico, armazenado em bombonas de 25 e 50 litros e preservados em refrigerador no Laboratório de Saneamento – LABSAN, da Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU. O efluente foi caracterizado ao início de cada ciclo experimental, incluindo as análises de pH, sólidos suspensos, demanda química de oxigênio – DQO, demanda bioquímica de oxigênio – DBO, fósforo total e série de nitrogênio (nitrogênio total, amônia, nitrito e nitrato). A Tabela 1 informa os métodos utilizados para medição de cada parâmetro.

Tabela 1 - Métodos para medição dos parâmetros estudados

| Método | Parâmetro |
|---|------------------|
| Método Standard - 4500-P C. Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method | Fósforo |

| | |
|--|-------------------|
| NBR 12620 | Nitrogênio Total |
| Método Standard - 4500-NH3 F. Phenate Method | Amônia |
| Método Standard - 4500-NO2 B. Colorimetric Method18 | Nitrito |
| NBR 12620 | Nitrato |
| NBR 10664 | Sólidos suspensos |
| NBR 10357 | DQO |

A Figura 5 mostra o biodigestor de concreto armado revestido com lona impermeabilizante.

Figura 5 - Biodigestor na Fazenda Bom Sucesso



Fonte: Autora, 2020

4.2 PREPARO DO INÓCULO DAS MICROALGAS

Para preparar os inóculos de microalgas foi feito o crescimento das microalgas nativas presentes no efluente suíno previamente tratado. Foram coletadas amostras do efluente e condicionadas em frascos de 500 mL. Foram realizadas diluições do efluente variando de 10^0 a 10^{-10} para testar o potencial de crescimento das microalgas. Os frascos foram enumerados de 1 a 9 para facilitar no tratamento dos dados - o frasco 1 corresponde ao efluente bruto sem os repiques. A Tabela 2 demonstra como foram distribuídos os outros oito frascos de inoculação.

Alguns frascos possuíram a mesma configuração para a obtenção de um volume suficiente para inoculação dos biorreatores.

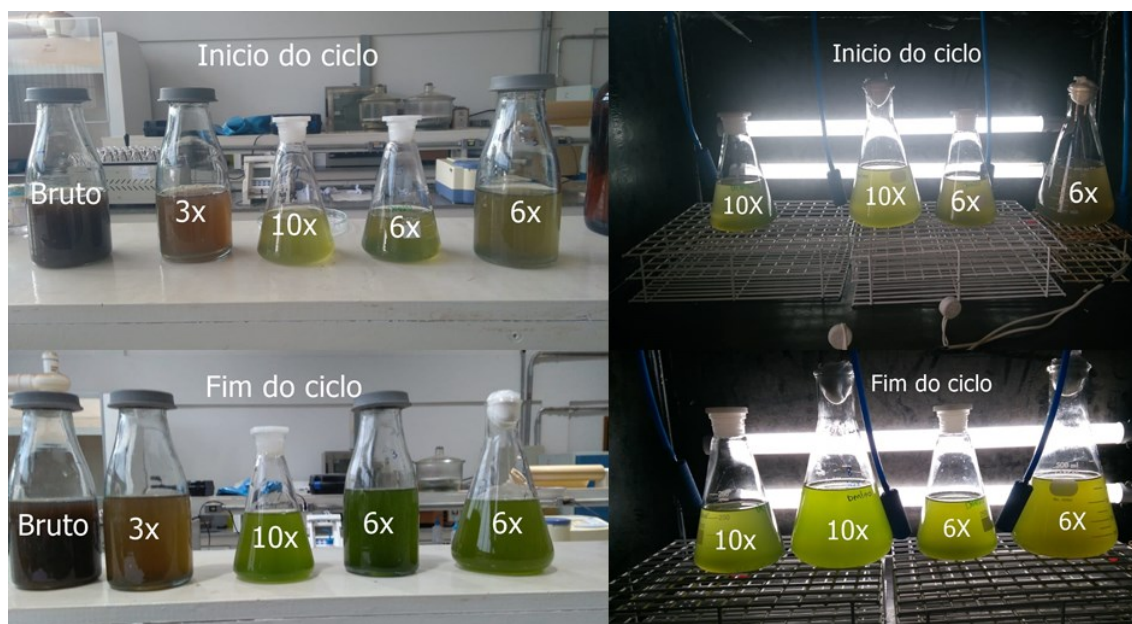
Tabela 2 - Caracterização dos frascos de inoculação

| Frasco | Diluição | Condição experimental |
|---------------|-----------------|---|
| 1 | 10^0 | Iluminação natural |
| 2 | 10^{-3} | Iluminação natural |
| 3 | 10^{-6} | Iluminação natural |
| 4 | 10^{-10} | Iluminação natural |
| 5 | 10^{-6} | Iluminação artificial (2 lâmpadas – 24horas) |
| 6 | 10^{-10} | Iluminação artificial (2 lâmpadas - 24horas) |
| 7 | 10^{-6} | Iluminação artificial (2 lâmpadas - 24horas) |
| 8 | 10^{-10} | Iluminação artificial (2 lâmpadas - 24horas) |

Para promover o crescimento das espécies de microalgas presentes, as amostras tiveram iluminação com lâmpadas LED com foto no período de 24 horas. Também foi testado o crescimento com iluminação natural do LABSAN/UFU, onde as lâmpadas do laboratório não foram ligadas, a fim de não causarem interferência no experimento. A partir de amostragens no tempo zero e vinte dias, foi possível avaliar o potencial de crescimento das microalgas, com a utilização de microscópio óptico (SLOMPO, 2018).

Para renovar a carga de nutrientes e manter o crescimento das microalgas, foi feito um repique a cada sete dias. O repique foi feito utilizando uma proveta de 500 mL, em que foi utilizado 10% do volume da amostra que ficou em crescimento por uma semana e 90% de efluente fresco. Ao longo dos dias, com a realização dos repiques, houve o aumento gradual da coloração esverdeada do efluente. A Figura 6 evidencia a alteração na coloração esverdeada do efluente em frascos de inóculo de microalgas ao longo de um ciclo de sete dias.

Figura 6 - Frascos de inóculos de microalgas ao longo de um ciclo de sete dias



Fonte: Autora, 2020

4.3 CONTAGEM DE CÉLULAS DE MICROALGAS

O controle do crescimento foi feito por contagem de células, por meio de um microscópio óptico (SLOMPO, 2018). Após vinte dias de crescimento, foi realizada a contagem das células de microalgas. Esta etapa ocorreu no Laboratório de Entomologia Médica e Veterinária da UFU, sendo utilizada a câmara de Neubauer, lamínula e microscópio óptico.

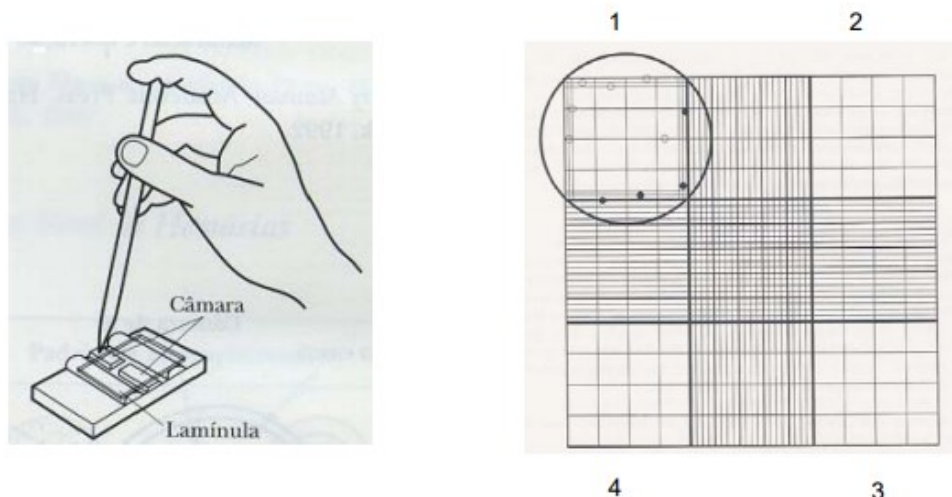
De acordo com o Departamento de Microbiologia da Universidade Federal de São Paulo, os critérios de contagem de microalgas utilizando a Câmara de Neubauer são:

- contar as células que tiverem o núcleo bem visível;
- as células isoladas serão contadas como uma célula;
- contar grumos constituídos por células facilmente distinguíveis por seus núcleos e citoplasmas como grupos de células isoladas e contar cada célula;

- grumos, cujas células são difíceis de serem distinguidas umas das outras, devem ser contados como um único grupo (c).

A Figura 7 apresenta como é introduzido a solução na câmara e visualização dos quadrantes em que é realizada a contagem.

Figura 7 - Introdução da solução na lamínula e quadrantes da Câmara de Neubauer



Fonte: Disponível em: https://www.ufrgs.br/labvir/material/contagem_celulas.pdf.

Cada quadrante tem 1 mm^2 de área. Ao ser colocada, a distância da lamínula até a lâmina (profundidade) mede $0,1 \text{ mm}$, o que permite obter um volume igual a $0,1 \text{ mm}^3$ em cada quadrante. Para obter o número de células/mL, deve-se multiplicar o valor obtido por 10.000, pois:

$$1 \text{ ml} = 1 \text{ cc}$$

$$1 \text{ cc} = 10 \times 10 \times 10 \text{ mm} = 1.000 \text{ mm}^3.$$

Multiplicando esse valor por $0,1$ que é o volume do quadrante têm-se 10.000. Desta forma, o número de células por mL é obtido a partir da equação 3.

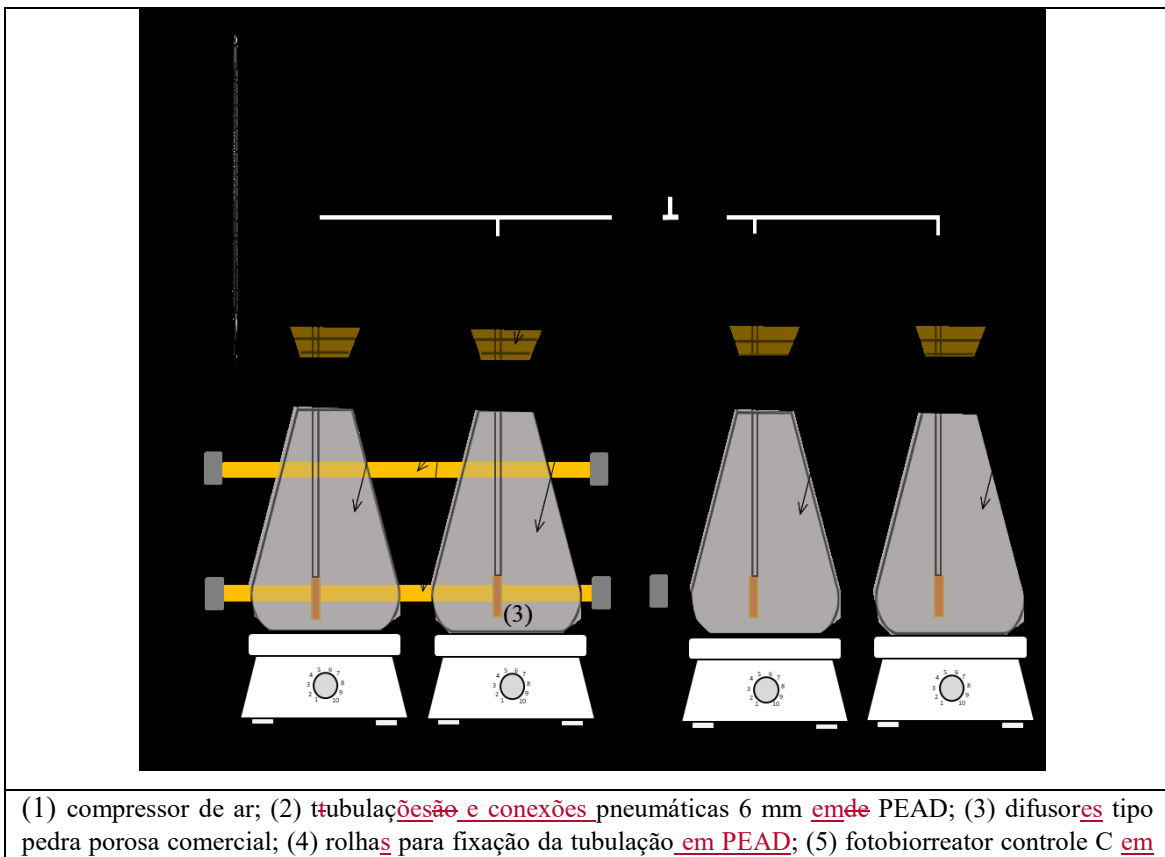
$$n^\circ \text{ cel/mL} = \frac{n^\circ \text{ total de células}}{n^\circ \text{ de quadrantes contados}} \times \text{fator de diluição} \times 10000 \quad (4)$$

As microalgas são contadas em cada parte do quadrante, cada quadrante é dividido em dezesseis partes. Somadas as dezesseis partes, o resultado é utilizado na Equação 3.

4.4 APARATO EXPERIMENTAL - FOTOBIORREADORES

Foram construídos dois caixotes idênticos, em formato retangular prismático, cujas paredes são constituídas com madeirite na espessura de 10 mm. O caixote tem a dimensão externa igual a 0,58 m x 0,80 m na base e 0,50 m na altura. Entre a portinhola de acesso à parte interna e as paredes do caixote foram fixados oringers de borracha ao longo de todo o perímetro da abertura, a fim de permitir a vedação do aparato, ou seja, evitar troca de calor com o meio externo. As quatro lâmpadas LED, aproximadamente 4000 luxes cada lâmpada, foram posicionadas na parte interna de cada caixote, e o termômetro foi posicionado no caixote para monitoramento de temperatura ambiente (ver Figura 8). A construção de dois caixotes objetivou testar diferentes intensidades luminosas. Os estudos foram realizados em sistema fechado de batelada ou fluxo descontínuo. Nos experimentos foram mantidos, no máximo, três fotobiorreatores por caixote em função das dimensões dos frascos tipo kitasato de dois litros.

Figura 8 - Aparato experimental



(1) compressor de ar; (2) tubulações e conexões pneumáticas 6 mm em PEAD; (3) difusores tipo pedra porosa comercial; (4) rolhas para fixação da tubulação em PEAD; (5) fotobiorreator controle C em

frascos tipo erlenmeyer de 2 litroseom-efluente-suíno; (6) fotobiorreator de involução I em frascos tipo erlenmeyer de 2 litroseom-efluente-suíno; (7) Termômetro; (8) botoeira Liga/Desliga das lâmpadas LED; s(9) Lâmpadas LED; (10) agitador mecânicoambiente.

Os fotobiorreatores - Kitasatos de dois litros - foram inoculados com o consórcio de microalgas na proporção 10% v/v. No reator controle não houve a adição de microalgas.

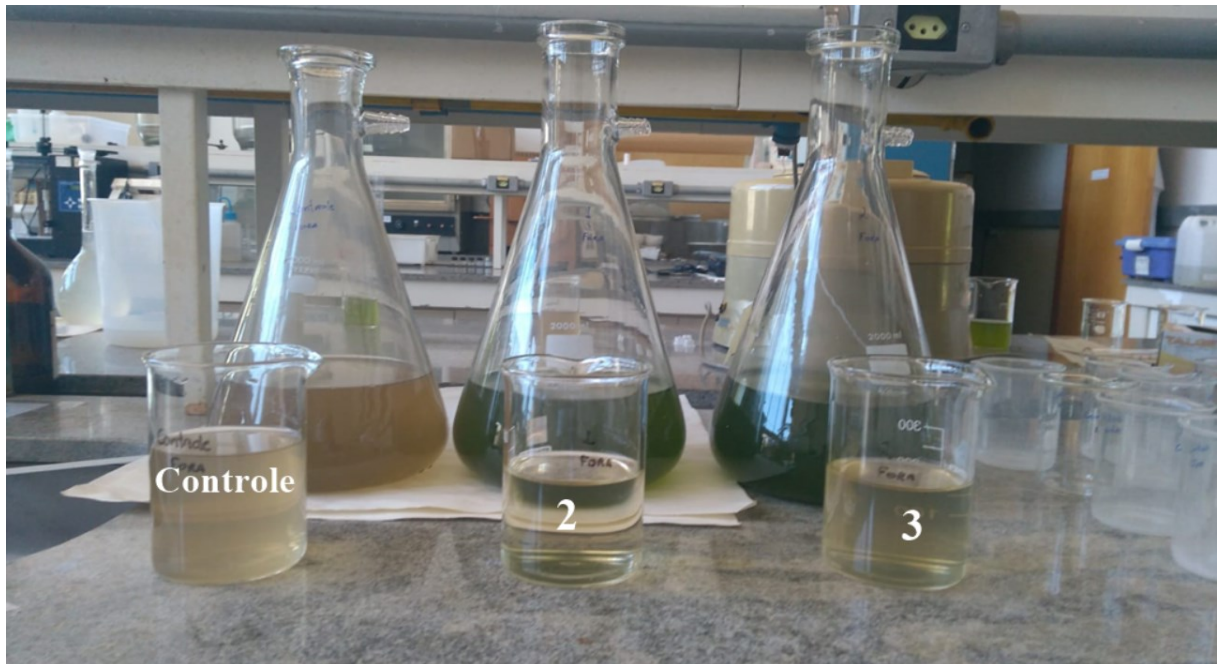
Cada batelada de cultivo teve em média sete dias, englobando a inoculação no dia zero e o descarte do efluente gerado no sétimo dia. Uma parcela do próprio efluente (10%) da batelada anterior foi utilizada como inóculo para o início de uma nova batelada, e o restante do volume foi completado com o esgoto coletado. Foi realizado 3 bateladas – repetição – para cada configuração experimental afim de validar estatisticamente a performance do sistema. A temperatura do ambiente foi apenas monitorada, uma vez que o sistema operou sob condições ambientais reais.

Em cada batelada foram coletadas amostras de efluente do sistema de cultivo de microalgas no primeiro e sétimo dia, para determinação da remoção de nutrientes. A concentração de sólidos suspensos do esgoto foi avaliada para não comprometer a distribuição de energia luminosa (SLOMPO, 2018).

Com a intenção de promover a agitação das culturas e, conseqüentemente, evitar a sedimentação da biomassa algal, foi injetado ar comprimido, por meio de um compressor de vazão aproximada de 3 L/min na parte interna do kitasato, por meio de difusores porosos comerciais e também posicionado um agitador magnético para agitação mecânica (SLOMPO, 2018).

Ao fim de cada batelada, foi feita a separação das microalgas do efluente por centrifugação, seguida de filtração em membrana de 0,47 µm., e o efluente foi separado para as análises físico-químicas. A Figura 9 mostra a aparência do efluente (nos béqueres) após a separação.

Figura 9 - Aparência do efluente após filtração (2) e centrifugação (3) - controle, experimentos 2 e 3



Fonte: Autora, 2021

4.5 CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS

A Tabela 3 traz as configurações experimentais que foram testadas neste estudo. Tentou-se avaliar as influências da agitação líquida dentro do biorreator em função da aeração por micro difusor comercial e agitação magnética, a influência da intensidade luminosa em função da luminosidade natural e artificial (com quantidade variável de lâmpadas ligadas), e a influência da diluição do efluente suíno. Envidou-se padronizar o volume útil no biorreator, com variações mais acentuadas nos primeiros experimentos.

Apenas os experimentos 1, 2 e 3 foram realizados em duplicata. Experimentos únicos foram adotados em todas as outras configurações. Nos experimentos 1, 2 e 3, sem aeração e sem agitação magnética, foi avaliada somente a interferência da intensidade luminosa na capacidade da microalga de remover/recuperar os nutrientes e o carbono. Nos experimentos 4 e 5, mantendo a aeração e agitação magnética e fixando a quantidade de lâmpadas, foi avaliada

a influência do fator de diluição na capacidade da microalga de remover/recuperar os nutrientes e o carbono. Já nos experimentos de 6 a 13, mantendo o fator de diluição e aeração fixos, avaliou-se a influência conjunta da agitação magnética e da intensidade luminosa na capacidade da microalga de remover/recuperar os nutrientes e o carbono.

Tabela 3 - Matriz de planejamento experimental variando aeração, agitação, luminosidade e diluição do efluente. Sistema em batelada com sete dias cada repetição.

| Experimento | Aeração | Agitação magnética | Quantidade de lâmpadas | Efluente diluído | Volume útil do reator (mL) |
|--------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | - | - | 4 | 10^{-5} | 1500 |
| 2 | - | - | iluminação natural | 10^{-6} | 1500 |
| 3 | - | - | 2 | 10^{-6} | 1500 |
| 4 | sim | sim | 4 | Bruto | 400 |
| 5 | sim | sim | 4 | 10^{-5} | 800 |
| 6 | sim | - | 3 | 10^{-5} | 800 |
| 7 | sim | sim | 3 | 10^{-5} | 800 |
| 8 | sim | - | 1 | 10^{-5} | 800 |
| 9 | sim | sim | 1 | 10^{-5} | 800 |
| 10 | sim | - | Iluminação natural | 10^{-5} | 800 |
| 11 | sim | sim | Iluminação natural | 10^{-5} | 800 |
| 12 | sim | - | 2 | 10^{-5} | 800 |
| 13 | sim | sim | 2 | 10^{-5} | 800 |

5 RESULTADOS

Trazer mais comparações com a literatura

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO

Neste estudo, foi usado como fonte de nutrientes para o crescimento das microalgas apenas as quantidades naturalmente presentes no efluente de suinocultura. Desta forma, todas as formas de nitrogênio que estarão presentes para o desenvolvimento das microalgas serão provenientes do processo de nitrificação, visto que a quantidade predominante de nitrogênio do efluente bruto está na forma de amônia (OBAJA,2002).

O efluente foi coletado no dia 26 de setembro de 2020, para preparação dos inóculos, e nos dias 18 de fevereiro de 2021 e 01 de outubro de 2021 para os experimentos nos fotobiorreatores. Nas datas de 26 de novembro de 2020 e 18 de fevereiro de 2021, o efluente foi coletado no biodigestor. Já a partir de 04 de outubro de 2021, o efluente foi coletado diretamente da lagoa de sedimentação, uma vez que o biodigestor se encontrava inoperante.

Diversos experimentos foram realizados a partir de uma mesma amostragem de efluente. Este efluente ficou armazenado em refrigerador no LABSAN/UFU. A Tabela 4 traz a caracterização do efluente de suinocultura no início de cada experimento. De uma forma geral, percebe-se uma grande variação para os parâmetros nitrogênio total e sólidos suspensos. A forma de manuseio da bombona no momento da coleta de amostra pode ter influenciado no ressurgimento de material de fundo, interferindo significativamente nos parâmetros sólidos suspensos. Eventualmente, a depender das quantidades de nutrientes e material orgânico carbonáceo adsorvidas em sólido inorgânico, pode impactar também nos parâmetros fósforo, nitrogênio, DQO e DBO.

Tabela 4 - Caracterização do efluente de suinocultura aplicado nos experimentos de 1 a 13

| Parâmetros | Experimentos 1,2 e 3 | | Experimentos 4 e 5 | |
|--------------------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| | 26/11/2020 | 18/02/2021 | 04/10/2021 | 10/11/2021 |
| Fósforo (mg/L) | 65,5 | 37,5 | 91,5 | 50,3 |
| DQO (mg/L) | 983 | 1428 | 2214 | 2133 |
| pH | 8,0 | 7,5 | 8,2 | 8,1 |
| Amônia (mg/L) | - | - | 683,5 | 39,6 |
| Nitrito (mg/ L) | - | - | 0,05 | 0,005 |
| Nitrato (mg/L) | - | - | 1,8 | 1,1 |
| Nitrogênio total (mg/L) | - | - | 423 | 483 |
| DBO (mg/L) | - | - | 450 | 227 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 620 | 200 | 771 | 930 |
| Parâmetros | Experimentos 6 a 9 | | Experimentos 10 a 13 | |
| | 07/02/2022 | | 04/03/2022 | |
| Fósforo (mg/L) | 59,7 | | 58,5 | |
| DQO (mg/L) | 2289 | | 2610 | |
| pH | 7,9 | | 7,8 | |
| Amônia (mg/L) | 2,3 | | 27,5 | |
| Nitrito (mg/ L) | 0 | | 0 | |
| Nitrato (mg/L) | 1,8 | | 1,5 | |
| Nitrogênio total (mg/L) | 998 | | 728 | |
| DBO (mg/L) | 295 | | 630 | |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 400 | | 1880 | |

Não foi possível realizar as análises de série de nitrogênio nos experimentos 1, 2 e 3 devido a dificuldades com a metodologia e problemas técnicos no laboratório. De acordo com a Tabela 3, o pH do efluente de suinocultura variou entre 7,5 e 8,2. Silva (2015), observou uma variação de pH em efluentes de suinocultura de 5,9 até 8,4. O pH tem influência direta na produção de enzimas e também na toxicidade de compostos químico para os microrganismos, além de influenciar no equilíbrio de amônio/amônia (MARKOU; VANDAMME; MUYLAERT, 2014).

Em função da amostragem do efluente na estação de tratamento ter ocorrido em datas distintas e em reatores distintos, associado ao tempo de armazenamento em refrigerador no laboratório, existem algumas discrepâncias nos valores dos parâmetros. A DQO variou entre 983 e 2610 mg/L. Alguns estudos alcançaram valores de DQO entre 1190 e 5200 mg/L após os digestores, o que corrobora com os resultados aqui alcançados (SILVA, 2015; OBAJA, 2002).

Da Silva (2012), obteve uma relação DQO/DBO de 1,5 para efluente de suinocultura. Já Obaja (2002), chegou à uma relação DQO/DBO de 2,2 para efluente de dejetos suínos. A relação DQO/DBO obtida neste estudo variou entre 4,1 e 9,4, o que evidencia que o efluente possui uma biodegradabilidade baixa (BRAGA et al., 2012).

O fósforo é um macronutriente utilizado por organismos fotossintetizantes, as microalgas, em particular. A concentração de fósforo total no estudo variou entre 37,5 e 91,5 mg/L, valores estes na mesma ordem de grandeza de valores encontrados na literatura para efluente de suinocultura tratado (KOZEN, 2005; OBAJA,2002; DA SILVA, 2012).

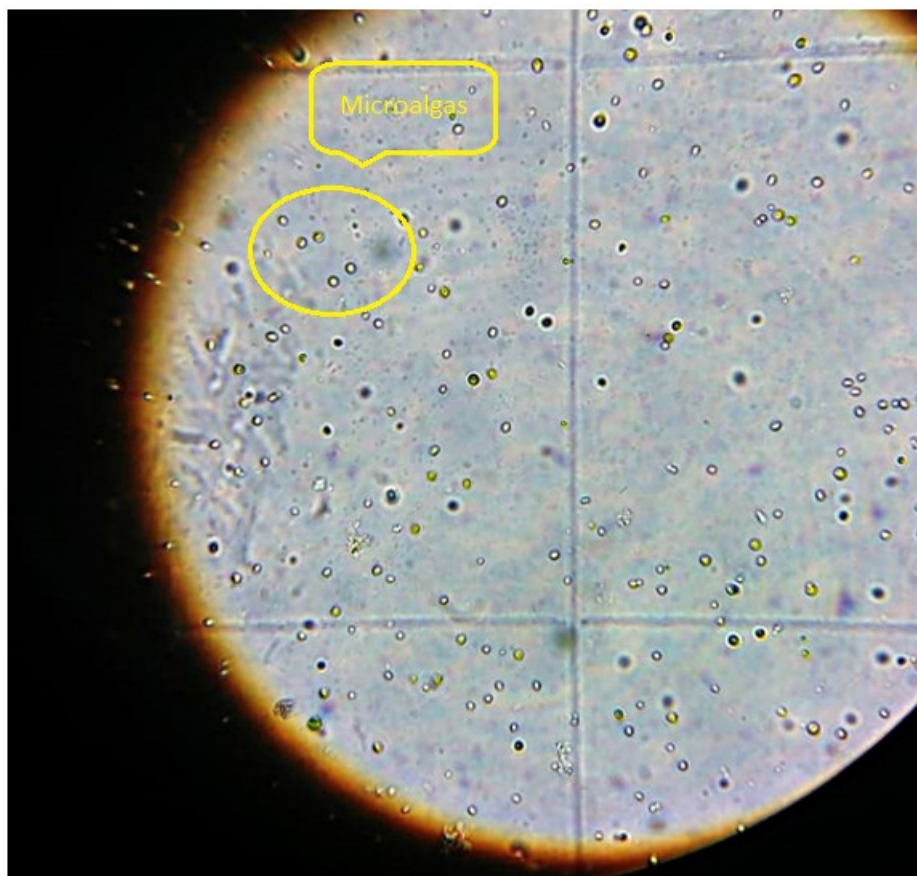
Os valores de nitrato e nitrito para o efluente bruto são uma parcela pequena do nitrogênio total, visto que essa é uma característica de efluentes brutos. Como esperado, a partir de comparações com a literatura, amônia e nitrogênio orgânico são a maior fatia do nitrogênio total (OBAJA,2002; DA SILVA, 2012). A concentração de nitrogênio total no estudo variou entre 423 e 998 mg/L, de amônia entre 2,3 e 683,5 mg/L, e de nitrato entre 1,1 e 1,8 mg/L.

A concentração de sólidos suspensos do efluente de suinocultura variou entre 200 e 1880 mg/L. Este parâmetro influencia na penetração da luminosidade dentro do biorreator, impactando diretamente no crescimento das microalgas e na sua capacidade de remover/recuperar os nutrientes e o carbono.

5.2 CONTAGEM DE CÉLULAS

Foi realizada a contagem de células de microalgas para se ter um padrão de qualidade dos inóculos. A Figura 10 mostra uma imagem, obtida por meio de celular focado na tela de visualização do microscópio ótico, de microalgas em um dos quadrantes. Na figura, cada objeto com formato próximo a um círculo corresponde a uma biomassa.

Figura 10 - Imagem de microalgas em um dos quadrantes, obtida por meio de celular focado na tela de visualização do microscópio ótico.



Fonte: Autora, 2021

A contagem de células foi realizada no dia 09 de dezembro de 2020, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4. Devido a imprevistos, não foi possível realizar a contagem do frasco 6. Os frascos com maior quantidade de sólidos (bruto e diluição 3x) tiveram um desempenho menor, tal qual a constatação obtida por Li et al. (2011).

Verifica-se também que os frascos com diluição de dez vezes tiveram um número menor de células por mL, o que permitiu definir uma quantidade ótima de diluição para o crescimento de microalgas. Diluições maiores aumentam a energia luminosa difundida no líquido, porém diminuem a carga de nutrientes, o que limita seu crescimento (LI et al., 2011).

Outro importante fator a se considerar, foi a iluminação - artificial e natural. Os frascos que tiveram iluminação artificial (Tabela 5), tiveram um desempenho menor que aqueles sujeitos à iluminação natural. Possivelmente, as duas lâmpadas fluorescentes tubulares não forneceram energia luminosa suficiente para o crescimento adequado. Siranee e Pakpain

(2007), verificaram que lotes de microalgas com crescimento sob iluminações naturais obtiveram os melhores resultados de produção de biomassa algal (390 mg/L), enquanto que aquelas cultivadas sob iluminação artificial, de 8000 lux, atingiram até 356 mg/L de biomassa.

Tabela 5 - Resultados da contagem de células

| | Quantidade de células por frasco | | | | | |
|-------------------------------------|---|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| | Iluminação natural | | | | Iluminação artificial | |
| | (bruto) | (3x) | (6x) | (10x) | (6x) | (10x) |
| Total de Células | 58 | 15 | 1358 | 606 | 686 | 672 |
| Quantidade de células por mL | $5,8 \cdot 10^5$ | $1,5 \cdot 10^5$ | $1,35 \cdot 10^7$ | $6,0 \cdot 10^6$ | $6,8,0 \cdot 10^6$ | $6,7 \cdot 10^6$ |

Considerando a quantidade de células produzidas inicialmente, a fim de otimizar o processo de inoculação, foram descartados as diluições “bruto” e “3x”. Optou-se por mais frascos da mesma diluição, para evitar acidentes e perda dos inóculos, e também para ter volume suficiente para inocular os biorreatores nas próximas etapas, cujas novas configurações dos frascos de inoculação estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Nova configuração dos frascos de inoculação

| Frasco | Diluição | Condição experimental |
|---------------|-----------------|--|
| 1 | 6x | Iluminação natural |
| 2 | 6x | Iluminação natural |
| 3 | 6x | Iluminação natural |
| 4 | 10x | Iluminação natural |
| 5 | 6x | Iluminação artificial (2 lâmpadas – 24 horas) |
| 6 | 10x | Iluminação artificial (2 lâmpadas – 24 horas) |
| 7 | 6x | Iluminação artificial (2 lâmpadas – 24 horas) |
| 8 | 10x | Iluminação artificial (2 lâmpadas – 24 horas) |

Foi realizada outra contagem de células no dia 23 de fevereiro de 2021, para avaliar a nova configuração dos frascos de inóculos, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da nova configuração dos frascos de inóculos

| | Quantidade de células por frasco | | | |
|-------------------------------------|---|------------|-----------------------|------------|
| | Iluminação natural | | Iluminação artificial | |
| Divisões Quadrante 1 | (6x) | (10x) | (6x) | (10x) |
| Total de Células | 1060 | 536 | 1009 | 633 |
| Quantidade de células por mL | 1.10^7 | $5,3.10^6$ | 1.10^7 | $6,3.10^6$ |

A iluminação natural utilizada neste trabalho é limitada, pois os reatores e frascos de inóculos foram posicionados dentro de um recinto com janelas e portas, desta forma, a quantidade de fótons é menor que aquelas ao ar livre. Possivelmente, este foi o motivo pelo qual a iluminação artificial de 8000 lux (duas lâmpadas) ocasionou uma produção de células similar à produzida na iluminação natural (SIRANEE; PAKPAIN, 2007).

5.3 OPERAÇÃO DOS BIORREADORES

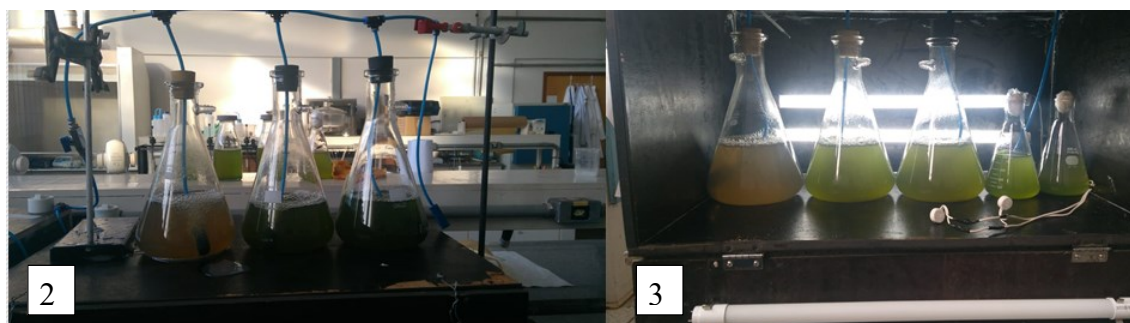
Nesta etapa do trabalho foram testadas e discutidas as configurações apresentadas na Tabela 2. A quantidade de células inoculadas utilizadas nos treze experimentos variou entre 7.10^6 até $1,86.10^7$.

5.3.1 Experimentos 1, 2 e 3

Os experimentos 1, 2 e 3 não possuem aeração ou outro tipo de mistura contínua, desta forma, optou-se por usar o efluente diluído em seis vezes para alimentar os biorreatores, para que os sólidos não limitassem o crescimento das microalgas, como foi observado no inóculo bruto (Tabela 4) (SUH, 2003). Como apresentado na Tabela 2 e Figura 11, o experimento 2 traz

os biorreatores sujeitos à iluminação natural, enquanto o experimento 3 traz os biorreatores dentro da câmara com duas lâmpadas LED.

Figura 11 - Experimento 2 e 3



Fonte: Autora, 2021

A Tabela 8 apresenta os resultados de fósforo total, pH, DQO, amônia, nitrito e nitrato. Optou-se por utilizar a letra “C” para designar os reatores controle e a letra “R” para designar os reatores inoculados com microalgas, além da numeração para indicar o experimento. Nos primeiros ensaios não foi possível analisar série de nitrogênio, devido às falhas operacionais na diluição, dificuldades com a metodologia, além de variáveis imprevisíveis como, por exemplo, ausência de cor ou extrapolação ao limite da curva de diluição para o método colorimétrico no fim de um ciclo. Outra limitação, foi a necessidade de usar vários espectrofotômetros em laboratórios diferentes. A curva do fósforo é bem estável e a cor desenvolvida nas amostras é estável por dias, o que permite uma constância nas análises.

Tabela 8 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 1, 2 e 3

| | Efluente de alimentação | Iluminação natural | | 2 lâmpadas (8000lux) | |
|----------------------|----------------------------|--------------------|-------|-------------------------|-------|
| | | C2 | R2 | C3 | R3 |
| Fósforo(mg/L) | 41,9 | 31,4 | 31,8 | 33,0 | 22,0 |
| pH | 7,6 | 7,4 | 8,6 | 7,2 | 8,7 |
| DQO | 1062,7 | 1053,5 | 488,8 | 870,6 | 722,0 |
| Amônia(mg/L) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Nitrito(mg/L) | 0,0 | 0,2 | 1,4 | 0,0 | 1,1 |

| | | | | | |
|----------------------|----------------------------|------|------|------|-----|
| Nitrato(mg/L) | 0,3 | 6,2 | 14,6 | 12,4 | 9,2 |
| 4 lâmpadas | | | | | |
| | Efluente de alimentação | C1 | R1 | | |
| Fósforo(mg/L) | 51,1 | 40,4 | 29,7 | | |

5.3.1.1 Fósforo

Os frascos que foram inoculados com microalgas (R1 e R3) tiveram maiores quedas nas concentrações de fósforo, variando entre 22 e 29,7 mg/L. O Controle, que é somente efluente de alimentação, teve concentrações de fósforo variando entre 31,4 e 40,4 mg/L. Microalgas tem o potencial de remover nutrientes de águas residuárias pois utilizam fósforo/nitrogênio/carbono para seu crescimento; desta forma, é esperado que os frascos inoculados tenham desempenho melhor (USHA et al., 2016).

Os frascos que tiveram iluminação artificial foram os que mais tiveram redução nas concentrações de fósforo, chegando ao mínimo de 19,57 mg/L. A atividade fotossintética tende a aumentar conforme é aumentando a intensidade luminosa (excluindo cenários de foto inibição e falta de nutrientes), logo, a remoção de nutrientes também é afetada pela fonte luminosa (SU, 2021).

De acordo com a Tabela 8, os resultados para a configuração 1, que utilizou quatro lâmpadas com efluente diluído sem agitação, registrou valores que variaram entre 27 – 33,3 mg/L.

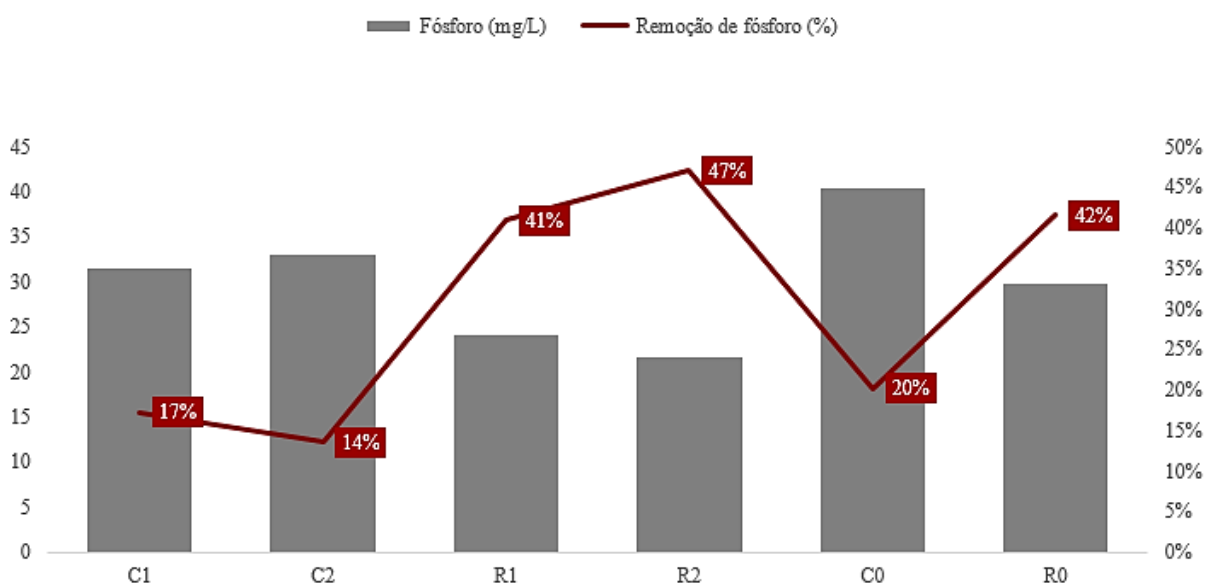
Pela Tabela 9 avalia-se o comportamento dos dados, e verifica-se que os reatores inoculados com microalgas tiveram uma porcentagem de remoção de fósforo maior que os controles, sendo o valor máximo de remoção - 59% - atingido pelo R3 – duas lâmpadas. A amplitude dos reatores Controle foi maior que dos outros, e também seus dados mais dispersos e heterogêneos, demonstrando que a remoção de fósforo no Controle variou mais ao longo dos ciclos (MAGALHÃES; LIMA, 2002).

Tabela 9 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 1 a 3

| Remoção de Fósforo | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|------|------|-------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coeficiente de variação |
| C1 | 20% | 17% | 41% | 1% | 82% |
| R1 | 42% | 9% | 49% | 27% | 23% |
| C2 | 17% | 17% | 41% | 5% | 98% |
| R2 | 41% | 13% | 53% | 16% | 32% |
| C3 | 14% | 11% | 30% | 5% | 82% |
| R3 | 47% | 10% | 59% | 35% | 21% |
| Fósforo (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coeficiente de variação |
| C1 | 40,4 | 6,5 | 47,0 | 31,7 | 16% |
| R1 | 29,7 | 3,1 | 34,4 | 26,5 | 10% |
| C2 | 31,4 | 3,8 | 35,3 | 26,3 | 12% |
| R2 | 24,1 | 3,1 | 31,5 | 21,7 | 13% |
| C3 | 33,0 | 1,4 | 34,8 | 31,6 | 4% |
| R3 | 21,7 | 2,2 | 24,8 | 18,2 | 10% |

A Figura 12 expõe o comportamento da concentração de fósforo (barras) e remoção de fósforo (linha) para cada reator. Os reatores inoculados com microalgas seguiram uma tendência de concentrações menores de fósforo.

Figura 12 - Remoção e concentração de fósforo ao longo dos ciclos para os reatores 1 a 3



Já a Tabela 10 especifica os resultados da análise estatística descritiva por tratamento - variável iluminação. A média de remoção de fósforo foi maior no tratamento de duas lâmpadas e também o valor máximo atingido. Todos os tratamentos tiveram médias de remoção maiores que o Controle, e também apresentaram dados mais homogêneos, visto que o coeficiente de variação do controle foi bem maior, o que acaba justificando a variabilidade da curva de remoção dos controles (GOMES, 1990).

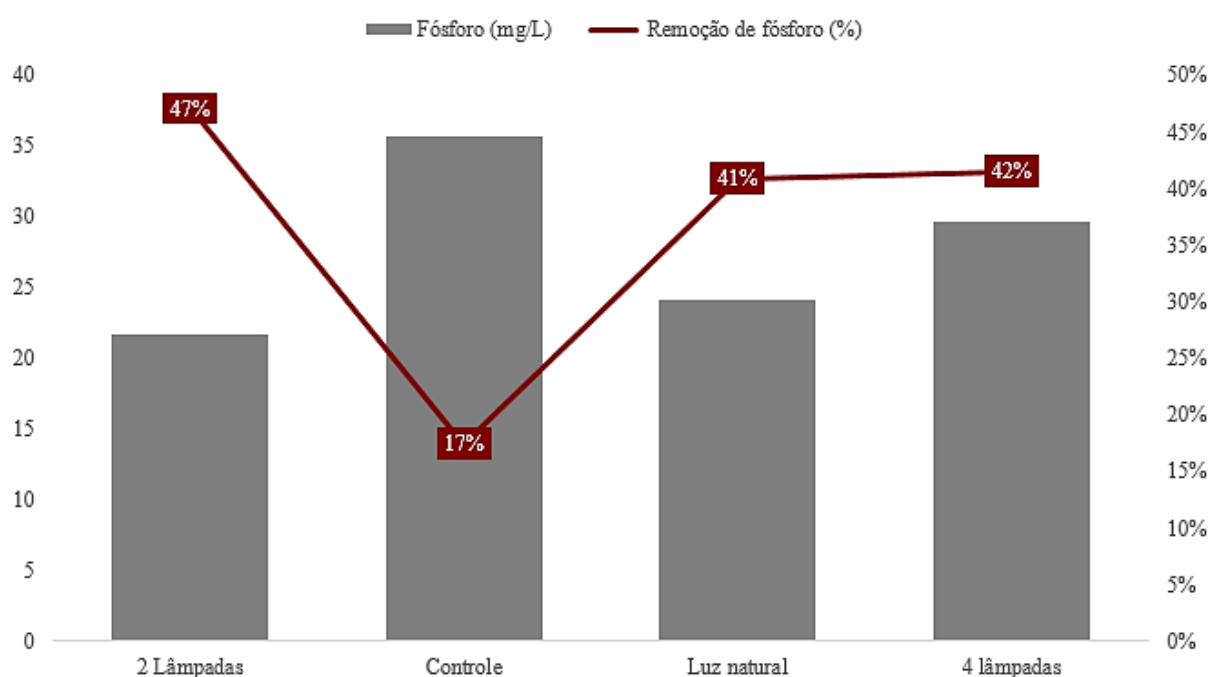
Tabela 10 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 1 a 3 diferenciando o fator iluminação.

| | Remoção de Fósforo | | | | |
|--------------------|--------------------|--------|-----|-----|-------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coeficiente de variação |
| Controle | 15% | 13% | 41% | 5% | 87% |
| Luz Natural | 41% | 13% | 53% | 16% | 32% |
| 2 lâmpadas | 47% | 10% | 59% | 35% | 21% |
| 4 Lâmpadas | 42% | 9% | 49% | 27% | 23% |

| Fósforo (mg/L) | | | | | |
|--------------------|-------|--------|------|------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| Controle | 32,2 | 2,8 | 35,3 | 26,3 | 9% |
| Luz Natural | 24,1 | 3,1 | 31,5 | 21,7 | 13% |
| 2 lâmpadas | 21,7 | 2,2 | 24,8 | 18,2 | 10% |
| 4 Lâmpadas | 29,7 | 3,1 | 34,4 | 26,5 | 10% |

A Figura 13 demonstra o comparativo entre os tratamentos para concentração de fósforo e sua remoção.

Figura 13 - Remoção e concentração de fósforo ao longo dos ciclos para os reatores 1 a 3, diferenciando o fator iluminação



Para analisar se houve diferença estatística entre os tratamentos e a variável Remoção de fósforo, foi necessário validar a normalidade dos dados. Pela análise de normalidade dos resíduos, verificou-se que, apesar de os dados serem quantitativos, não foi possível utilizar o

teste de variância, pois os resíduos não seguiram distribuição normal. Assim, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-wallis (OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014; RYAN; JOINER, 1976).

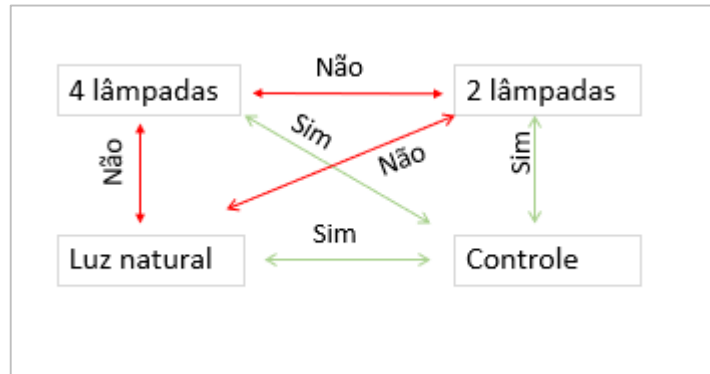
A Tabela 11 informa o resultado do teste de Kruskal-Wallis, e pode-se avaliar que todas as variações luminosas trouxeram resultados diferentes quando comparadas com o Controle, com significância p-valor < 0,05. Porém, quando analisados e comparados os tratamentos entre si, não foi possível perceber diferença estatisticamente significativa (OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 11 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 1 a 3

| Comparações Múltiplas - Remoção de fósforo | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| 4 lâmpadas - Controle | 8,3 | 5,7 | Sim | 0,004 |
| 2 Lâmpadas - 4 lâmpadas | 2,3 | 4,4 | Não | 0,3 |
| 4 lâmpadas - Luz natural | 1,8 | 4,4 | Não | 0,4 |
| 2 Lâmpadas - Luz natural | 3,0 | 4,7 | Não | 0,2 |
| 2 Lâmpadas - Controle | 9,0 | 5,6 | Sim | 0,002 |
| Controle - Luz natural | 8,1 | 5,6 | Sim | 0,005 |

A Figura 14 ilustra os resultados de comparações múltiplas pelo método de Kruskal – Wallis. Possível verificar que não houve distinção com a variação da Luz, porém a adição de microalgas impactou nos resultados de remoção de fósforo.

Figura 14 - Fluxograma para diferença entre os tratamentos 1,2 e 3



5.3.1.2 DQO

As concentrações de DQO para os reatores inoculados com microalgas variaram de 331 até 680,85 mg/L para iluminação natural, e 485,36 até 848,9 mg/L para iluminação artificial. O Controle obteve concentrações de DQO variando entre 276,16 e 1586,27 mg/L. As microalgas consomem carbono na forma de CO₂, ou seja, produto do metabolismo de microrganismos presentes no efluente (SU, 2021; CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

Tabela 12 – Média de remoção e concentração de DQO para as configurações 2 e 3

| Remoção de DQO (%) | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|------|------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| C2 | 21% | 18% | 41% | 5% | 88% |
| R2 | 54% | 16% | 69% | 35% | 29% |
| C3 | 17% | 52% | 75% | -27% | 299% |
| R3 | 32% | 18% | 55% | 19% | 57% |
| DQO (mg O ₂ /L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| C2 | 1054 | 512 | 1586 | 564 | 49% |
| R2 | 489 | 159 | 681 | 331 | 32% |

| | | | | | |
|-----------|-----|-----|------|-----|-----|
| C3 | 871 | 538 | 1326 | 276 | 62% |
| R3 | 722 | 183 | 849 | 485 | 25% |

A remoção de DQO - Tabela 12 -, para os reatores inoculados com microalgas tiveram resultados semelhantes tanto na iluminação natural quanto na artificial, porém atingiu o máximo de 69% de remoção, resultado inferior aos 75% obtidos pelo Reator Controle. Usha et. al, (2016), chegaram ao máximo de 89% de remoção de DQO em cultivos de microalgas em lagoas livres, ou seja, com exposição natural ao sol. De acordo com Suh, (2021), o crescimento das microalgas é diretamente vinculado à intensidade luminosa, e em consórcios de microrganismos, microalgas e outros microrganismos como bactérias, essa luminosidade pode favorecer o crescimento das microalgas e limitar outros microrganismos, afetando o consumo de matéria orgânica no meio biológico.

5.3.2 Experimentos 4 e 5

Nesta etapa é discutida a influência da diluição do efluente na capacidade de recuperação/remoção de nutrientes pela microalga, cujo Experimento 4 utilizou quatro lâmpadas + aeração e agitação com efluente bruto, enquanto o Experimento 5 utilizou quatro lâmpadas + aeração e agitação com efluente diluído. A Tabela 13 informa os resultados das análises físico-químicas obtidos para as configurações 4 e 5.

Tabela 13 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 4 e 5

| | Efluente Bruto | | | Efluente diluído | | |
|------------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|--------|--------|
| | Efluente de alimentação | C4 | R4 | Efluente de alimentação | C5 | R5 |
| Fósforo (mg/L) | 91,5 | 17,2 | 16,1 | 50,3 | 35,5 | 11,3 |
| DQO (mg/L) | 2214,0 | 926,3 | 676,9 | 2133,0 | 1276,4 | 1275,8 |
| pH | 8,2 | 10,1 | 10,2 | 8,1 | 9,8 | 9,7 |
| Amônia (mg/L) | 683,5 | 0,8 | 0,0 | 39,6 | 1,2 | 0,0 |
| Nitrito (mg/ L) | 0,1 | 0,5 | 0,9 | 0,0 | 19,3 | 0,1 |

| | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Nitrato (mg/L) | 1,8 | 1,5 | 2,1 | 1,1 | 1,2 | 1,5 |
| Nitrogênio total (mg/L) | 423,0 | 310,4 | 20,1 | 483,0 | 314,5 | 15,3 |
| DBO (mg/L) | 450,0 | 160,0 | 65,0 | 227,0 | 100,0 | 35,0 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 771,0 | 905,6 | 580,0 | 930,0 | 543,3 | 4325,0 |

5.3.2.1 Fósforo

Os resultados da análise estatística descritiva do fósforo e da remoção do fósforo para os reatores 4 e 5 estão dispostos na Tabela 14. A remoção de fósforo alcançou seu máximo no reator R5, e seu mínimo no reator C5. A amplitude de remoção foi mais alta no reator C5, bem como seu coeficiente de variação, indicando dados mais heterogêneos com maior desvio da média. Com relação à concentração de fósforo, foi avaliada uma dispersão maior dos dados, indicando que seus valores variaram (MAGALHÃES; LIMA, 2002; GOMES, 1990).

Tabela 14 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 4 e 5

| Remoção de Fósforo | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
| C4 | 81% | 9% | 88% | 70% | 12% |
| R4 | 82% | 8% | 89% | 74% | 9% |
| C5 | 29% | 55% | 68% | -10% | 188% |
| R5 | 78% | 24% | 95% | 60% | 31% |
| Fósforo (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
| C4 | 17,2 | 8,7 | 27,2 | 11,2 | 50% |

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|
| R4 | 16,1 | 6,9 | 23,6 | 10,0 | 43% |
| C5 | 35,5 | 27,8 | 55,1 | 15,8 | 78% |
| R5 | 11,3 | 12,1 | 19,9 | 2,7 | 107% |

A partir da Tabela 15, verifica-se a remoção e a concentração de fósforo em cada tratamento. A remoção máxima de fósforo foi percebida no tratamento com diluição, e a mínima, no Controle. As informações de remoção para o Controle variaram bastante, já o tratamento com efluente bruto não foi verificado alta variação (GOMES, 1990).

A média de remoção de fósforo para o tratamento com efluente bruto foi de 82%, a média de remoção de fósforo encontrada na literatura foi de 32 a 85% para efluente não diluído. A média encontrada na Tabela 15 se encontra dentro deste intervalo, apresentando bons resultados de remoção para um efluente não diluído (CHOI; LEE, 2012; WANG et al., 2016).

Tabela 15 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 4 e 5 diferenciando o fator diluição

| Remoção de Fósforo | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 60% | 40% | 88% | -10% | 66% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 82% | 8% | 89% | 74% | 9% |
| 4 lâmpadas - diluído AA | 78% | 24% | 95% | 60% | 31% |
| Fósforo (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 24,5 | 18,2 | 55,1 | 11,2 | 74% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 16,1 | 6,9 | 23,6 | 10,0 | 43% |

| | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|-----|------|
| 4 lâmpadas - diluído AA | 11,3 | 12,1 | 19,9 | 2,7 | 107% |
|--------------------------------|------|------|------|-----|------|

Para avaliação da diferença estatística, para remoção de fósforo, entre os tratamentos apresentados nas configurações em questão, foram confeccionadas as Tabelas 16,17 e 18. A Tabela 16 demonstra o resultado do teste de Kruskal-Wallis, onde é possível verificar que todos os tratamentos abordados pelas configurações 4 e 5 não apresentaram diferenças entre si, com significância de 5%, quanto a remoção de fósforo (MCKIGHT; NAJAB,2010; OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 16 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 4 e 5

| Comparações Múltiplas - Remoção de fósforo | | | | |
|---|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Controle - Microalgas | 4,5 | 5,4 | Não | 0,1 |
| Bruto - Controle | 2,1 | 5,3 | Não | 0,6 |
| Bruto - Diluído | 0,7 | 6,6 | Não | 0,6 |
| Controle - Diluído | 1,4 | 6,1 | Não | 0,6 |

Avaliando a configuração 1 e 5, percebe-se que ambas tiveram iluminação com quatro lâmpadas, porém com o fator agitação distinto. Desta forma, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis para averiguar se o fator agitação trouxe resultados diferentes de remoção de fósforo entre estes tratamentos. Pela Tabela 17, é possível inferir que a agitação é um fator altamente significativa para remoção de fósforo (OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 17 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo configurações 1 e 5

| Comparações Múltiplas | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
|------------------------------|--|--|--|--|

| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Com agitação - Sem agitação | 5,5 | 3,9 | Sim | 0,006 |

Utilizando a mesma lógica para verificar a diferença da agitação no Controle, a Tabela 18 informa que estatisticamente não houve diferença - na remoção de fósforo - entre os reatores Controle que tiveram agitação e aqueles que não tiveram.

Tabela 18 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de fósforo entre os reatores controle das configurações 1 e 5

| Comparações Múltiplas | | | | |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Com Agitação - Sem agitação | 4,0 | 6,4 | Não | 0,21 |

5.3.2.2 Nitrogênio

Analisando os dados de amônia, nitrito e nitrato da Tabela 14, verifica-se que a amônia foi quase totalmente removida, principalmente dos reatores inoculados, e tanto nitrito quanto nitrato têm um aumento de concentração em relação ao efluente de alimentação. Principalmente nitrito que tem um aumento de 7000%, chegando a 37,82 mg/L, na configuração 5.

A aeração tem impacto direto na acumulação de nitrato e nitrito, desta forma, o oxigênio dissolvido influencia na produção de nitrito ou nitrato. BAZAUL e ANDRES (2007), verificaram os impactos do oxigênio dissolvido no acúmulo de nitrito no decorrer do tratamento de um efluente contendo 500 mgN-NH₄/L. Os resultados apresentados indicaram que em OD

de 1,4 mg/L ocorreu o acúmulo de nitrito. Tal acúmulo foi apresentado e estável em mais de 170 dias de operação. Deste modo, pode-se avaliar que a produção de nitrito (Tabela 13) nos reatores se dá principalmente pela aeração contínua, e nas configurações em que não houve aeração, o acúmulo de nitrito ocorre a partir do oxigênio dissolvido proveniente dos processos metabólicos das microalgas (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2022).

Deste modo, não houve remoção significativa de nitrito pelas microalgas, isso também pode ser devido à produção de nitrito no processo de redução do nitrato a nitrogênio amoniacal, e pode ser que parte do nitrito produzido seja excretado no meio (BURHENNE; TISCHNER, 2000). Paralelamente, Kiran (2014), também observou baixas remoções de nitrito, chegando a 11% de remoção.

A remoção de nitrogênio/amônia, tanto no controle quanto no reator inoculado com microalgas, pode se dar pela desnitrificação, visto que, aliado ao pH, temperatura, aeração e agitação, a evaporação da amônia é facilitada. A desnitrificação ocorre em zonas anóxicas, onde microrganismos oxidam matéria orgânica a partir do oxigênio do nitrato liberando gás N₂ (OBAJA, 2003; BURHENNE; TISCHNER, 2000). Assim, comparando a remoção de nitrogênio entre o controle e o reator inoculado, percebe-se que a diferença seria a carga de nutrientes utilizada para o crescimento de microalgas.

Os resultados da análise estatística descritiva do nitrogênio e da remoção de nitrogênio para os reatores 4 e 5 estão dispostos na Tabela 19. A remoção de nitrogênio alcançou seu máximo no reator R5, e seu mínimo no reator C4. A amplitude de remoção foi mais alta no reator C4, bem como seu coeficiente de variação, indicando dados mais heterogêneos com maior desvio da média. Todos os reatores, com exceção do R5, apresentaram coeficientes de variação extremamente altos, indicando alta variabilidade para a remoção de nitrogênio. Com relação a concentração de nitrogênio, foi verificado uma maior dispersão dos dados no reator R4 (MAGALHÃES; LIMA, 2002; GOMES, 1990).

Tabela 19 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de Nitrogênio para os reatores das configurações 4 e 5

Remoção de nitrogênio

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| C4 | -28% | 119% | 78% | -157% | -428% |
| R4 | 61% | 59% | 96% | -6% | 96% |
| C5 | -15% | 40% | 13% | -44% | -261% |
| R5 | 97% | 0% | 97% | 97% | 0% |

| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| C4 | 540,7 | 504,4 | 1086,7 | 92,2 | 93% |
| R4 | 162,9 | 248,6 | 450,0 | 17,0 | 153% |
| C5 | 556,7 | 193,3 | 693,3 | 420,0 | 35% |
| R5 | 15,3 | 1,6 | 16,4 | 14,1 | 11% |

A partir da Tabela 20, verifica-se a remoção e a concentração de nitrogênio em cada tratamento. A remoção máxima de nitrogênio foi percebida no tratamento com diluição, e a mínima no Controle. Confere-se, a partir do coeficiente de variação, que o controle teve maior heterogeneidade dos dados, porém o tratamento com efluente bruto também apresentou alta variabilidade em seus resultados (GOMES, 1990).

A média de remoção de nitrogênio obtida pelo tratamento sem diluição foi igual a 61%, alguns estudos conseguiram remover cerca de 89% de nitrogênio em reatores com efluente de suinocultura não diluído. A remoção abaixo do esperado se deve ao fato de microalgas terem dificuldades de se desenvolverem sob alta carga orgânica, o que acaba tendo remoções abaixo daquelas atingidas pelos tratamentos diluídos (CHOI; LEE, 2012; WANG et al., 2016).

Tabela 20 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de Nitrogênio para os reatores das configurações 4 e 5 diferenciando o fator diluição

| Remoção de nitrogênio | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|--|
|------------------------------|--|--|--|--|--|

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| Controle | -23% | 87% | 78% | -157% | -380% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 61% | 59% | 96% | -6% | 96% |
| 4 lâmpadas - diluído AA | 97% | 0% | 97% | 97% | 0% |

| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 547,1 | 369,6 | 1086,7 | 92,2 | 68% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 162,9 | 248,6 | 450,0 | 17,0 | 153% |
| 4 lâmpadas - diluído AA | 15,3 | 1,6 | 16,4 | 14,1 | 11% |

O tempo de retenção tem um efeito significativo na capacidade de absorção de nutrientes das microalgas, pois, com o aumento do tempo, a biomassa de microalgas exige mais nutrientes para o crescimento. Desta forma, Narkthon (1996), observou a remoção de 77-86% de nitrogênio, e 53-75% de fósforo de águas residuais de suínos usando *Chlorella vulgaris* no período de 8 dias. Já Kiran et al. (2014), encontraram níveis de remoção de amônia e nitrato no quarto e décimo dia de inoculação de microalgas, e concluíram que a remoção máxima de amônia e nitrato ocorreu no décimo dia, 96.8–98.4% para a amônia, 94.2–97.8% para o nitrato, e para o fósforo de 89% também no décimo dia.

As comparações múltiplas para remoção de nitrogênio estão dispostas na Tabela 21. Avalia-se que o tratamento com microalgas e o controle, trouxeram resultados distintos de remoção de nitrogênio, porém, quando analisadas as correlações entre os tratamentos com microalgas, não são apresentadas diferenças estatisticamente significativas, indicando que alterar a diluição do efluente não trouxe, estatisticamente, resultados distintos (MCKIGHT; NAJAB,2010; OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 21 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de nitrogênio configurações 4 e 5

| Comparações Múltiplas - Remoção de nitrogênio | | | | |
|--|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Controle - Microalgas | 3,8 | 3,8 | Sim | 0,0 |
| Bruto - Controle | 2,4 | 5,3 | Não | 0,1 |
| Bruto - Diluído | 3,5 | 6,6 | Não | 0,1 |
| Controle - Diluído | 5,9 | 6,1 | Não | 0,1 |

5.3.2.3 DQO e DBO

Pode-se avaliar que, de maneira geral, as concentrações de DBO foram lineares, atingindo seu valor mínimo no reator R5, no segundo ciclo. Os reatores inoculados com microalgas tiveram concentrações de DBO menores que os controles, sendo a remoção de carga biodegradável maior no tratamento com efluente diluído.

Tabela 22 - Gráficos de concentração e remoção para DQO e DBO das configurações 4 e 5

| Remoção de DQO (%) | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| C4 | 58% | 1% | 59% | 57% | 2% |
| R4 | 69% | 14% | 78% | 53% | 21% |
| C5 | 40% | 18% | 53% | 28% | 44% |
| R5 | 40% | 25% | 58% | 23% | 61% |

| DQO (mg O₂/L) | | | | | |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|
|---------------------------------|--|--|--|--|--|

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| C2 | 926 | 21 | 944 | 904 | 2% |
| R2 | 580 | 125 | 700 | 450 | 22% |
| C3 | 1276 | 380 | 1545 | 1007 | 30% |
| R3 | 1276 | 524 | 1647 | 905 | 41% |

Com relação a DQO, verifica-se variabilidade maior nos dados, com exceção no reator C4, que manteve uma concentração mais homogênea. A DQO atingiu seu mínimo no reator R4. Pode-se inferir, a partir da análise dos dados, que a remoção máxima de DQO no reator R4 de 78% e mínima 23% no reator R5(SU, 2021; CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

5.3.2.4 pH e sólidos suspensos

A Tabela 23 demonstra os resultados de pH para os reatores das configurações 4 e 5. O ph variou de 9,5 a 10,2, tendo baixo coeficiente de variação em todos os reatores, demonstrando homogeneidade dos dados. Pelo desvio padrão, é possível verificar que em todos os reatores os dados de pH não desviaram muito da média (GOMES, 1990).

Tabela 23 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 4 e 5

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| C4 | 10,1 | 0,1 | 10,2 | 10,0 | 1% |
| R4 | 10,2 | 0,0 | 10,2 | 10,2 | 0% |
| C5 | 9,8 | 0,5 | 10,2 | 9,5 | 5% |
| R5 | 9,7 | 0,0 | 9,7 | 9,6 | 1% |
| Controle | 10,0 | 0,3 | 10,2 | 9,5 | 3% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 10,2 | 0,0 | 10,2 | 10,2 | 0% |

| | | | | | |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|
| 4 lâmpadas - diluído AA | 9,7 | 0,0 | 9,7 | 9,6 | 1% |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|

AA – Aeração + agitação

O pH não variou muito quando comparado entre os tratamentos com diluição e sem diluição, estando ligeiramente menor no reator com diluição, sendo o máximo de 9,7 e seu mínimo de 9,6. Já no reator sem diluição, o pH permaneceu em 10,2.

Os resultados da avaliação estatística descritiva para os sólidos suspensos, dentro das configurações 4 e 5, estão consolidados na Tabela 24. Observa-se que o Reator R5, com diluição, obteve os maiores valores de sólidos suspensos, atingindo o máximo de 4600 mg/L, enquanto os outros reatores tiveram médias bem menores. Os valores mínimos de Sólidos suspensos foram obtidos pelo Controle C5 (393 mg/L). De maneira geral, a partir do coeficiente de variação, os dados de sólidos suspensos foram mais dispersos e heterogêneos nos reatores Controle e com o tratamento sem diluição, e mais homogêneos no tratamento com diluição (GOMES, 1990).

Tabela 24 - Estatística descritiva da variável sólidos suspensos para os reatores das configurações 4 e 5

| Sólidos suspensos | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
| C3 | 906 | 159 | 1087 | 790 | 18% |
| R3 | 580 | 125 | 700 | 450 | 22% |
| C4 | 543 | 212 | 693 | 393 | 39% |
| R4 | 4325 | 389 | 4600 | 4050 | 9% |
| Controle | 760,7 | 251,4 | 1086,7 | 393,3 | 33% |
| 4 lâmpadas - Bruto AA | 580 | 125 | 700 | 450 | 22% |
| 4 lâmpadas - diluído AA | 4325 | 389 | 4600 | 4050 | 9% |

AA – Aeração + agitação

De forma geral, a configuração 5, que utiliza o efluente diluído em cinco vezes, obteve os melhores resultados de remoção de fósforo e nitrogênio, e produção de sólidos. A produção de sólidos é esperada, já que a diluição aumenta a dispersão luminosa no meio líquido, pois reduz a quantidade de sólidos suspensos, e a produção de biomassa algal é incentivada. Aumentando a produção de biomassa, intensifica também o consumo de nutrientes. Porém essa configuração pode levar a maiores custos, pois aumenta o volume a ser tratado (LI et al., 2011).

Foi verificado que as variáveis Sólidos suspensos, remoção de fósforo e nitrogênio não seguem a distribuição normal, desta forma, foi utilizado o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar se entre tais variáveis existe alguma correlação estatística. A Tabela 25 informa o resultado da matriz de correlação de Spearman, e partir desta, com intervalo de confiança igual a 0,05, é possível verificar correlação estatisticamente significativa (inversa) apenas entre as variáveis sólidos suspensos e pH (RYAN; JOINER,1976; COHEN,1992).

Tabela 25 - Coeficiente de correlação de Spearman para sólidos suspensos, pH, remoção de fósforo e nitrogênio

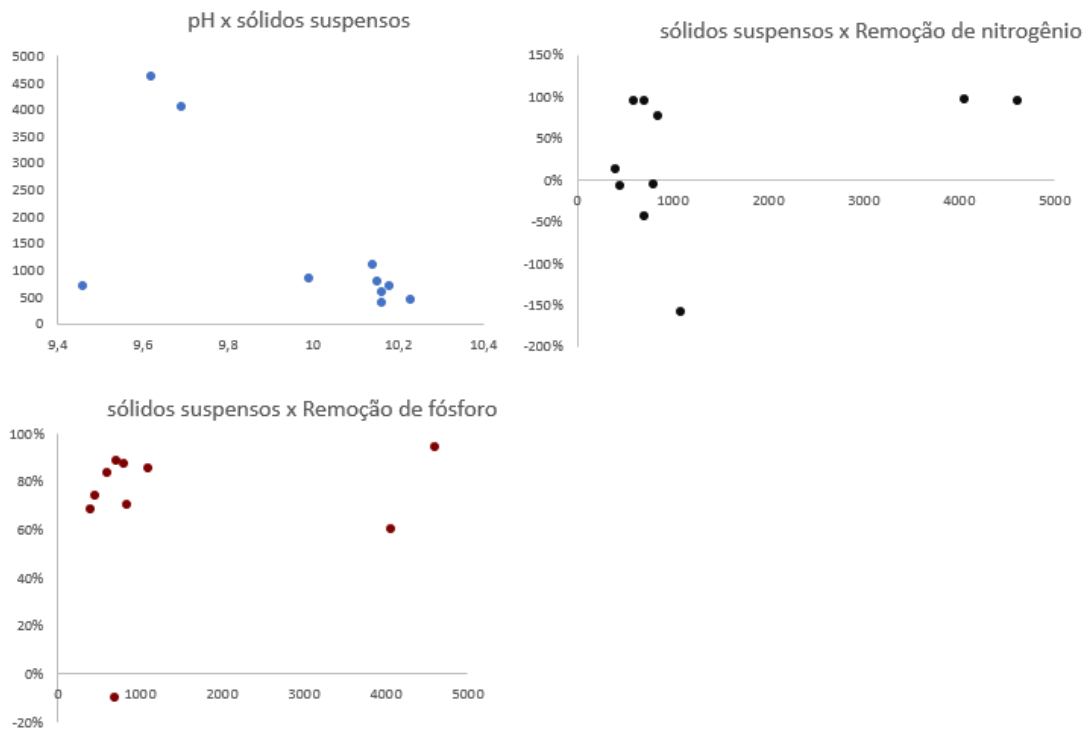
| Matriz de Correlação: Spearman | | | | |
|---------------------------------------|-------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| | pH | Sólidos suspensos (mg/L) | Remoção de fósforo | Remoção de nitrogênio |
| pH | 1,00 | -0,64 | 0,27 | -0,11 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | -0,64 | 1,00 | 0,33 | 0,36 |
| Remoção de fósforo | 0,27 | 0,33 | 1,00 | 0,16 |
| Remoção de nitrogênio | -0,11 | 0,36 | 0,16 | 1,00 |

| Matriz de P-valores | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|
|----------------------------|--|--|--|--|

| | pH | Sólidos suspensos (mg/L) | Remoção de fósforo | Remoção de nitrogênio |
|---------------------------------|-------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| pH | 1,00 | 0,047 | 0,45 | 0,76 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 0,047 | 1,00 | 0,35 | 0,31 |
| Remoção de fósforo | 0,45 | 0,35 | 1,00 | 0,66 |
| Remoção de nitrogênio | 0,76 | 0,31 | 0,66 | 1,00 |

A partir da Figura 15, pode-se avaliar a tendência dos dados e verificar algum grau de relação. Comparando sólidos suspensos com o pH, é possível verificar uma tendência linear inversa, tendência verificada na Tabela 25. Já para os outros dados, não é possível verificar uma relação de regressão (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Figura 15 - Dispersão entre sólidos suspensos, pH, remoção de fósforo e nitrogênio para os reatores 4 e 5



5.3.3 Experimentos 6 ao 9

Os resultados das análises físico-químicas para as configurações 6 e 7 estão consolidados na Tabela 26.

Tabela 26 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 6 a 9

| | Efluente de alimentação | 3 lâmpadas e aeração | | 3 lâmpadas AA | | 1 lâmpadas e aeração | | 1 lâmpadas e AA | |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------|------|------------------|------|-------------------------|------|--------------------|------|
| | | C6 | R6 | C7 | R7 | C8 | R8 | C9 | R9 |
| Fósforo (mg/L) | 59,7 | 43,2 | 36,3 | 43,2 | 38,3 | 25,0 | 39,4 | 25,0 | 34,7 |

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| pH | 7,9 | 9,7 | 9,2 | 9,7 | 9,3 | 9,4 | 7,1 | 9,4 | 7,5 |
| DQO (mg/L) | 2289 | 885 | 890 | 885 | 780 | 1510 | 420 | 1510 | 505 |
| Amônia (mg/L) | 2,3 | 6,3 | 0,0 | 11,6 | 13,8 | 16,1 | 1,2 | 16,1 | 12,1 |
| Nitrito (mg/L) | 0 | 24,8 | 18,3 | 24,8 | 11,8 | 7,3 | 18,2 | 7,3 | 10,5 |
| Nitrato (mg/L) | 1,8 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,4 | 3,6 | 3,4 | 3,6 | 3,5 |
| Nitrogênio Total (mg/L) | 998 | 282 | 119 | 282 | 81 | 322 | 383 | 322 | 418 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 400 | 637 | 3467 | 637 | 3150 | 643 | 2267 | 643 | 2233 |
| DBO (mg/L) | 295 | <10 | 110 | <10 | 50 | 100,0 | 30,0 | 100,0 | 70,0 |

AA – Aeração + agitação

5.3.3.1 Fósforo

A Tabela 27 destaca o resultado da análise estatística descritiva da variável fósforo para os reatores das configurações 6 a 9. A concentração máxima foi percebida no Reator R8, e a concentração mínima no C8 e 9. De maneira geral, os dados de fósforo por reator desviaram bastante da média, indicando oscilação desta variável ao longo dos ciclos (GOMES, 1990).

Tabela 27 - Estatística descritiva da variável Fósforo para os reatores 6 a 9

| | Fósforo (mg/L) | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| C6 e 7 | 43,2 | 28,6 | 66,8 | 11,4 | 66% |
| R6 | 36,3 | 28,7 | 67,6 | 11,2 | 79% |
| R7 | 38,3 | 29,8 | 71,7 | 14,5 | 78% |
| C8 e 9 | 25,0 | 21,7 | 49,4 | 8,0 | 87% |
| R8 | 39,4 | 35,5 | 80,4 | 16,8 | 90% |

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|-----|
| R9 | 34,7 | 26,8 | 65,7 | 17,6 | 77% |
|-----------|------|------|------|------|-----|

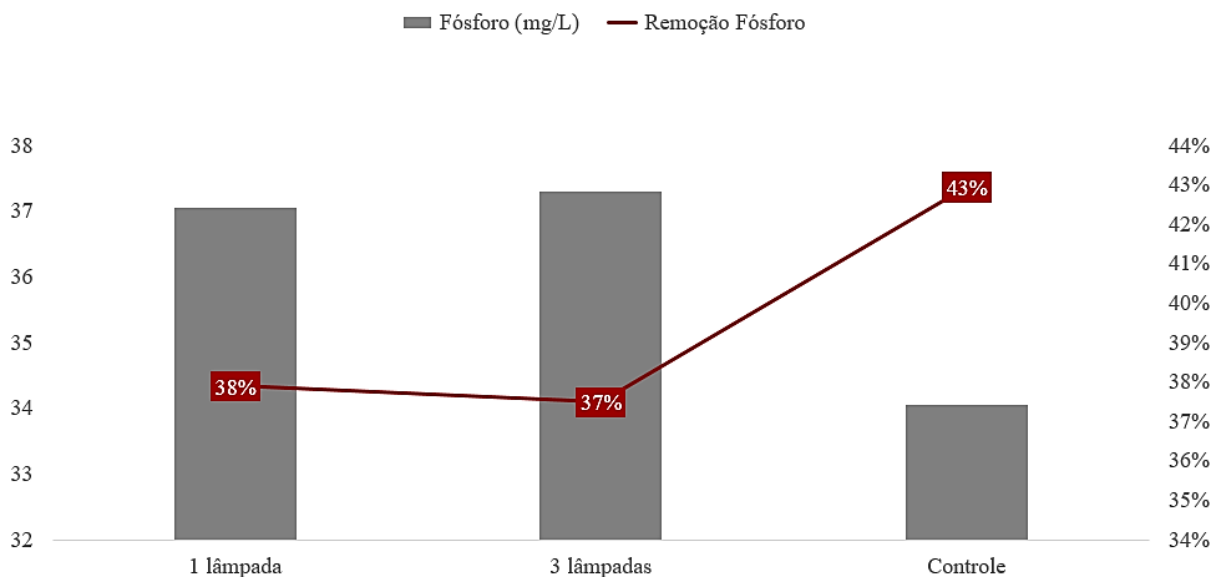
Avaliando a remoção de fósforo por tratamento apresentada na Tabela 28,, nota-se médias relativamente próximas entre os tratamentos, sendo a remoção maior no Controle. Os tratamentos apresentaram alta amplitude, dados dispersos e heterogêneos, confirmando variação da remoção (GOMES, 1990)

Tabela 28 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator iluminação

| Remoção de Fósforo | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
| Controle | 43% | 41% | 87% | -12% | 97% |
| 3 Lâmpadas | 37% | 44% | 81% | -20% | 117% |
| 1 lâmpada | 38% | 47% | 72% | -35% | 125% |
| Fósforo (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
| Controle | 34,1 | 24,8 | 66,8 | 8,0 | 73% |
| 3 Lâmpadas | 37,3 | 26,2 | 71,7 | 11,2 | 70% |
| 1 lâmpada | 37,1 | 28,3 | 80,4 | 16,8 | 76% |

A Figura abaixo define o comportamento da concentração – barras - em contraste com a remoção – linha - de fósforo, diferenciando os tratamentos pelo fator iluminação. Ilustrando que os tratamentos com microalgas tiveram médias de remoção inferiores.

Figura 16 – Média de remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator iluminação



A Tabela abaixo exibe os dados por tratamento com ou sem aeração. Avaliando a média de remoção e concentração de fósforo por tratamento, não é percebido grande desvio, sendo maior no controle (43%) e menor no tratamento com apenas aeração (37%), porém analisando os dados entre si, é notado alto desvio de suas médias, resultando em alta amplitude e dispersão dos dados ao longo dos ciclos (MAGALHÃES; LIMA, 2002).

Tabela 29 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator mistura

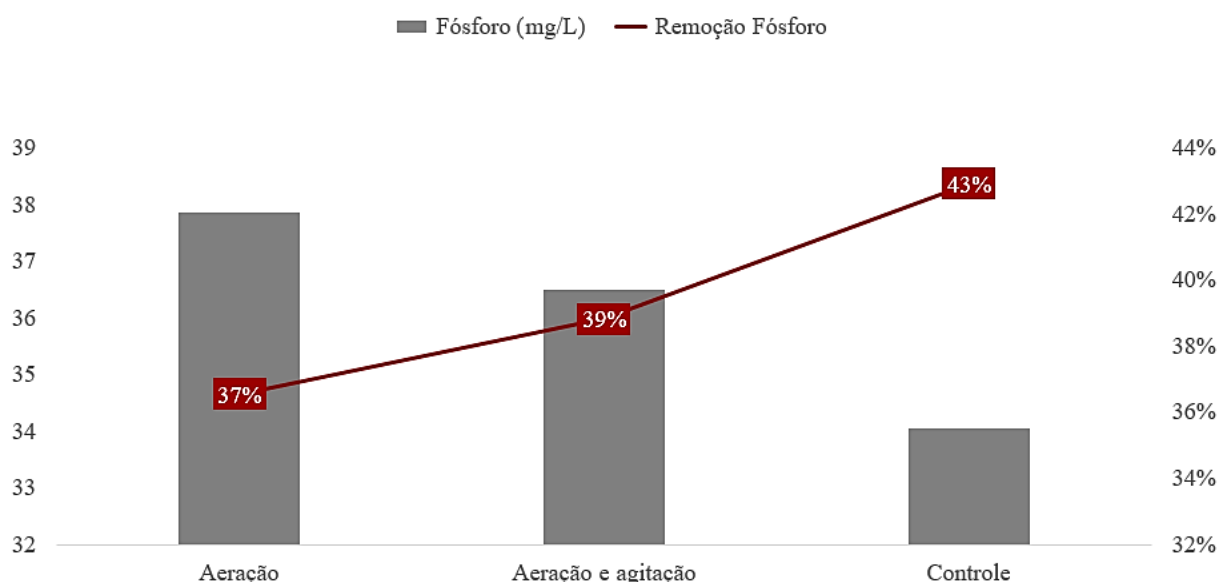
| Remoção de Fósforo | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 43% | 41% | 87% | -12% | 97% |
| Aeração | 37% | 48% | 81% | -35% | 133% |
| Aeração + Agitação | 39% | 43% | 76% | -20% | 110% |

| Fósforo (mg/L) | | | | | |
|----------------|--|--|--|--|--|
|----------------|--|--|--|--|--|

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| Controle | 34,1 | 24,8 | 66,8 | 8,0 | 73% |
| Aeração | 37,9 | 28,9 | 80,4 | 11,2 | 76% |
| Aeração + Agitação | 36,5 | 25,4 | 71,7 | 14,5 | 70% |

A Figura 17 exibe o comportamento da concentração e remoção de fósforo diferenciando os tratamentos pelo fator agitação.

Figura 17 – Média de remoção e concentração de fósforo e nitrogênio diferenciando o fator mistura



Para inferir se houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos para a remoção de fósforo, foi utilizado o método de comparações múltiplas de Kruskal-Wallis demonstrado na Tabela 30, e pode-se inferir que realmente não houve diferença estatística - para remoção de fósforo - entre os tratamentos apresentados pelas configurações desta seção (OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 30 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de

| Comparações Múltiplas - Remoção de fósforo | | | | |
|---|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Controle - Microalgas | 1,8 | 5,2 | Não | 0,5 |
| Aeração - Aeração e agitação | 0,2 | 7,4 | Não | 0,8 |
| Aeração - Controle | 1,8 | 7,4 | Não | 0,8 |
| Aeração e agitação - Controle | 1,7 | 7,4 | Não | 0,8 |
| 1 lâmpada - 3 lâmpadas | 0,2 | 7,4 | Não | 0,8 |
| 1 lâmpada - Controle | 1,8 | 7,4 | Não | 0,8 |
| 3 lâmpadas - Controle | 1,7 | 7,4 | Não | 0,8 |

5.3.3.2 Nitrogênio

Analisando os dados da Tabela 26 nota-se que a amônia foi totalmente removida no reator R6. No geral, os outros reatores não tiveram sucesso em remover 100% de amônia, em alguns casos obtendo concentrações superiores à do efluente de alimentação. Tanto o nitrito quanto o nitrato, principalmente o nitrito, tiveram um aumento de concentração em relação ao efluente de alimentação.

Nestas configurações, também foi observado acumulação de nitrito nos reatores R6 e R8, tal acúmulo se dá principalmente pela aeração contínua (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2022).

Já avaliando as configurações 8 e 9 da Tabela 26, é possível inferir que diferentemente das configurações anteriores (6 e 7), nesta (8 e 9) não houve 100% de remoção de amônia em

nenhum reator. O reator R7 obteve as menores concentrações de amônia. Os reatores Controle não conseguiram obter concentrações menores que a do efluente de alimentação, ou seja, nestes reatores houve produção de amônia. Tanto o nitrito quanto o nitrato, principalmente o nitrito, tiveram um aumento de concentração em relação ao efluente de alimentação.

Para o nitrogênio total, segundo a Tabela 31, o valor máximo foi alcançado pelo reator R9, e o mínimo pelo R7. Os dados, dos “R” principalmente, indicam alta amplitude e dispersão (MAGALHÃES; LIMA, 2002).

Tabela 31 - Estatística descritiva da variável nitrogênio para os reatores 6 a 9

| | Nitrogênio (mg/L) | | | | |
|---------------|-------------------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| C6 e 7 | 282,2 | 86,7 | 332,7 | 182,1 | 31% |
| R6 | 118,8 | 53,7 | 180,3 | 81,7 | 45% |
| R7 | 81,3 | 42,4 | 129,3 | 48,9 | 52% |
| C8 e 9 | 322,5 | 81,6 | 385,5 | 230,3 | 25% |
| R8 | 383,5 | 226,3 | 581,0 | 136,5 | 59% |
| R9 | 417,7 | 236,0 | 678,6 | 219,1 | 56% |

Avaliando a remoção de nitrogênio por tratamento exposta na Tabela 32, observa-se média maior no tratamento com três lâmpadas, alcançando o máximo de 95% de remoção. O tratamento controle obteve resultados de remoção de nitrogênio mais satisfatórios que o tratamento com uma lâmpada, porém atingiu valor máximo ligeiramente maior que o controle. Os tratamentos, com exceção de uma lâmpada, desviaram pouco da média, apresentando dados homogêneos (GOMES, 1990).

Tabela 32 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator iluminação

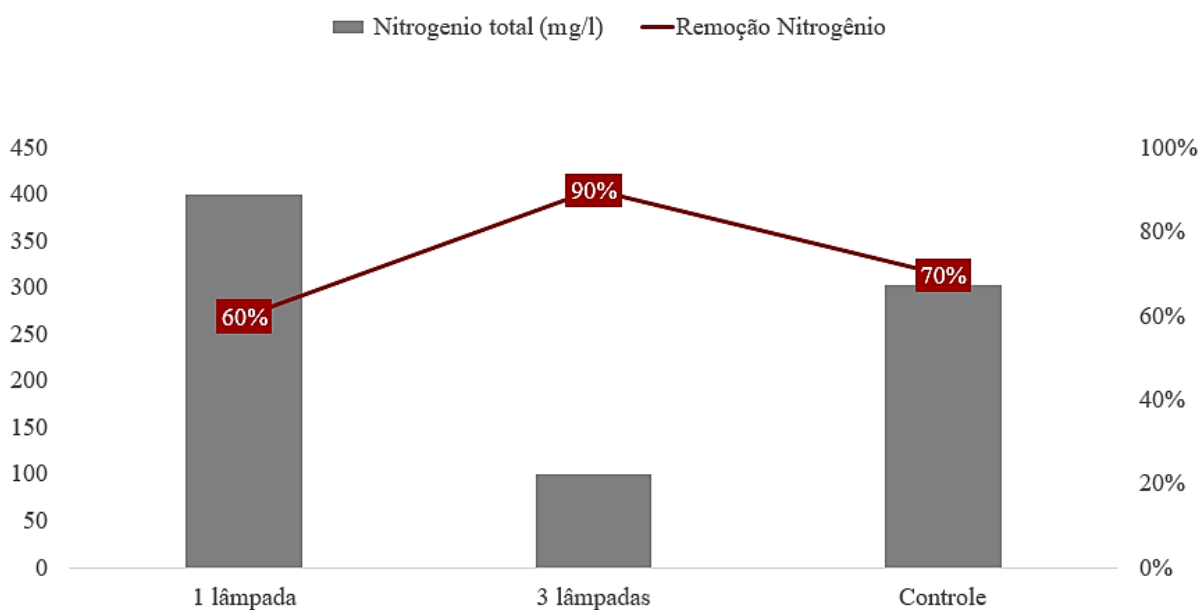
| Remoção de Nitrogênio |
|-----------------------|
|-----------------------|

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| Controle | 70% | 8% | 82% | 61% | 11% |
| 3 Lâmpadas | 90% | 5% | 95% | 82% | 5% |
| 1 lâmpada | 60% | 21% | 86% | 32% | 35% |

| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 302,3 | 78,5 | 385,5 | 182,1 | 26% |
| 3 Lâmpadas | 100,1 | 47,9 | 71,7 | 48,9 | 48% |
| 1 lâmpada | 400,6 | 207,6 | 678,6 | 136,5 | 52% |

A Figura 18 ilustra o comportamento da concentração – barras - em contraste com a remoção – linha - de nitrogênio, diferenciando os tratamentos pelo fator iluminação. Pela Figura é possível visualizar que o tratamento com 3 lâmpadas teve a melhor performance.

Figura 18 – Média de remoção e concentração de nitrogênio total diferenciando o fator iluminação



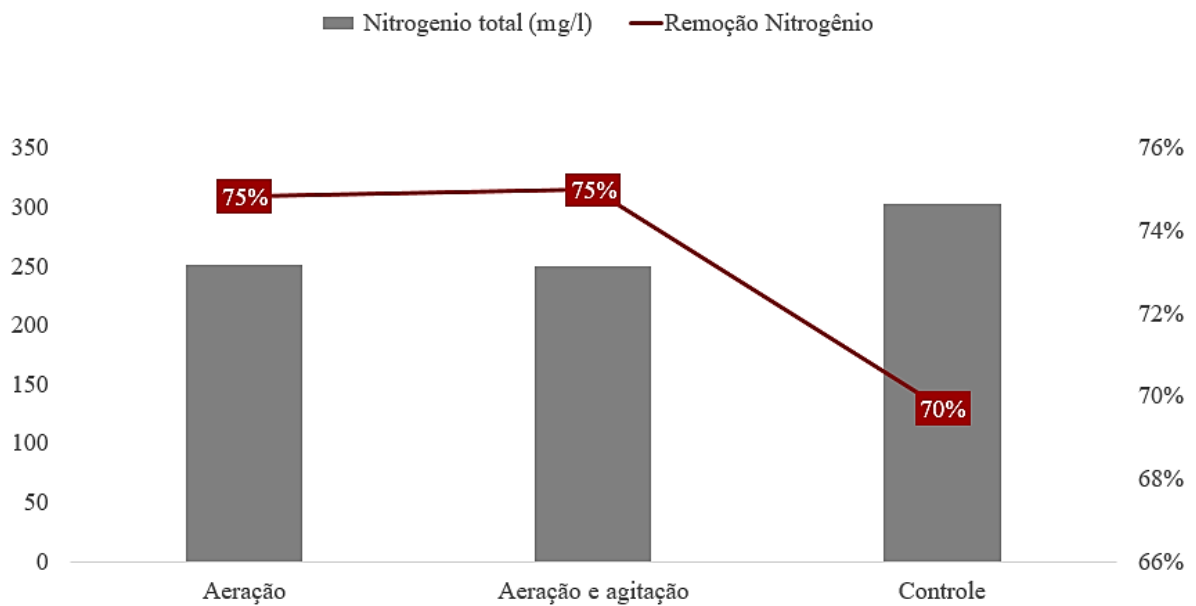
Agora, analisando as médias para nitrogênio, nota-se que a média do tratamento com aeração e com aeração + agitação foram iguais a 75% (Tabela 33), possivelmente a agitação magnética não teve contribuição significativa para a remoção de nitrogênio. Os dados para remoção de nitrogênio apresentaram baixa variabilidade para o Controle (GOMES, 1990).

Tabela 33 - Estatística descritiva da variável nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 6 a 9 diferenciando o fator mistura

| Remoção de Nitrogênio | | | | | |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 70% | 8% | 82% | 61% | 11% |
| Aeração | 75% | 21% | 92% | 42% | 28% |
| Aeração + Agitação | 75% | 24% | 95% | 32% | 32% |
| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 302,3 | 78,45 | 385,5 | 182,1 | 26% |
| Aeração | 251,1 | 206,5 | 581 | 81,6 | 82% |
| Aeração + Agitação | 249,5 | 238,5 | 678,5 | 48,9 | 96% |

A Figura 19 exibe o comportamento da concentração e remoção de nitrogênio total ao para os tratamentos com agitação. Verificado que ambos os tratamentos com agitação tiveram performances iguais para remoção de nitrogênio.

Figura 19 – Média de remoção e concentração de fósforo e nitrogênio diferenciando o fator mistura



A Tabela 34 destaca os resultados das comparações múltiplas de Kruskal – Wallis para remoção de nitrogênio. Quando são comparados os tratamentos aeração e aeração + agitação, não são percebidas diferenças estatisticamente significativas. Ou seja, os dois tratamentos produziram resultados aproximados. Os tratamentos com uma lâmpada, e com três lâmpadas, quando comparados com o Controle pelo teste de Kruskal-Wallis apresentaram diferença significativa (OSTERTAGOVÁ; OSTERTAG; KOVÁČ3, 2014).

Tabela 34 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para remoção de nitrogênio

| Comparações Múltiplas - Remoção de nitrogênio | | | | |
|---|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Controle - Microalgas | 3,0 | 5,2 | Não | 0,3 |
| Aeração - Aeração e agitação | 0,7 | 7,4 | Não | 0,5 |
| Aeração - Controle | 2,7 | 7,4 | Não | 0,5 |

| | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-------|
| Aeração e agitação - Controle | 3,3 | 7,4 | Não | 0,5 |
| 1 lâmpada - 3 lâmpadas | 9,7 | 7,4 | Sim | 0,004 |
| 1 lâmpada - Controle | 1,8 | 7,4 | Não | 0,004 |
| 3 lâmpadas - Controle | 7,8 | 7,4 | Sim | 0,004 |

5.3.3.3 DQO e DBO

A partir da Tabela 26, verifica-se que as concentrações de DQO (configurações 6 e 7) para os reatores inoculados com microalgas variaram 890 (R6) a 780 mg/L (R7), ambas concentrações bem inferiores ao efluente de alimentação. O Controle obteve concentração de DQO 885 mg/L, também inferior ao efluente de alimentação. A redução de DQO é esperada, já que as microalgas consomem carbono na forma de CO₂, ou seja, produto do metabolismo de microrganismos presentes no efluente (SU, 2021; CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

Já avaliando as configurações 8 e 9, a partir da Tabela 26, as concentrações de DQO para os reatores inoculados com microalgas variaram 420 (R8) a 505 mg/L (R9) ambas concentrações bem inferiores ao efluente de alimentação. O Controle obteve concentração de DQO 1510 mg/L, também inferior ao efluente de alimentação.

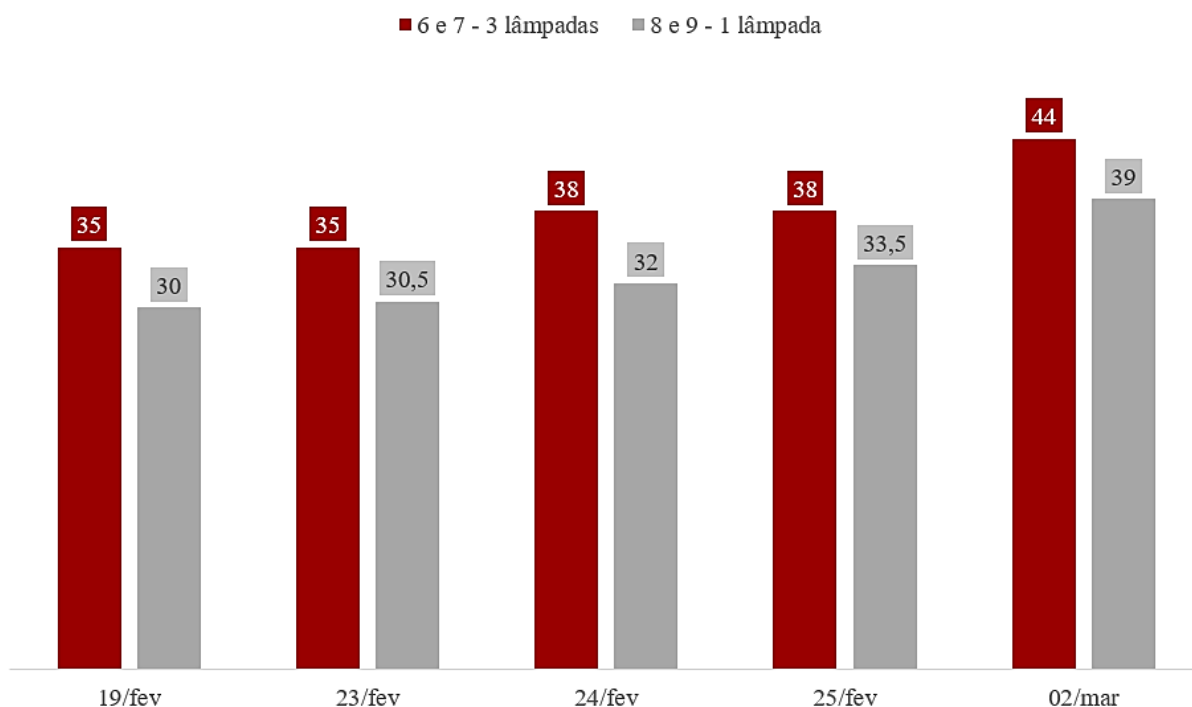
A remoção de DQO atingiu seu máximo de 82% no tratamento com uma lâmpada - R8 -, e mínimo de 34% nos controles das configurações 8 e 9. Já a remoção de DBO, obteve como valor máximo 97% para os controles das configurações 6 e 7 e mínimo de 63% para o tratamento com três lâmpadas - R6.

A remoção de DQO para os tratamentos com microalgas variou entre 61% (R6) a 82% (R8), e a remoção de DBO variando entre 63% (R6) e 90% (R8).

5.3.3.4 Temperatura e pH

Conforme a Figura 20, a temperatura tendeu a ser maior na configuração com mais lâmpadas. Chegando a 44°C nas configurações 6 e 7 (três lâmpadas), 5 °C maior que o máximo atingido pela configuração 8 e 9 (uma lâmpada).

Figura 20 - Temperatura ao longo dos ciclos para as configurações 6 a 9



Pela avaliação da Tabela 35, nota-se que o valor máximo de temperatura foi atingido pelas configurações 6 e 7 (três lâmpadas), alcançando 44°C em seu pico. E o valor mínimo foi obtido pelas configurações 8 e 9 (uma lâmpada). Os dados de temperatura, de maneira geral, não mostraram variação significativa da média, e apresentaram dados homogêneos (GOMES, 1990).

Tabela 35 - Análise descritiva de temperatura para as configurações 6 a 9

| | Média | Variância | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|--------------|--------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| 6 e 7 | 38°C | 13,5 | 3,7 | 44 | 35 | 10% |
| 8 e 9 | 33°C | 13,1 | 3,6 | 39 | 30 | 11% |

Avaliando estatisticamente a relação da temperatura com a variação de iluminação pelo teste do Qui-quadrado, obteve-se um p-valor de 0,035 e um coeficiente de contingência igual a 0,7, logo, houve relação estatística significativa entre a temperatura e a variação de iluminação para as configurações em questão (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

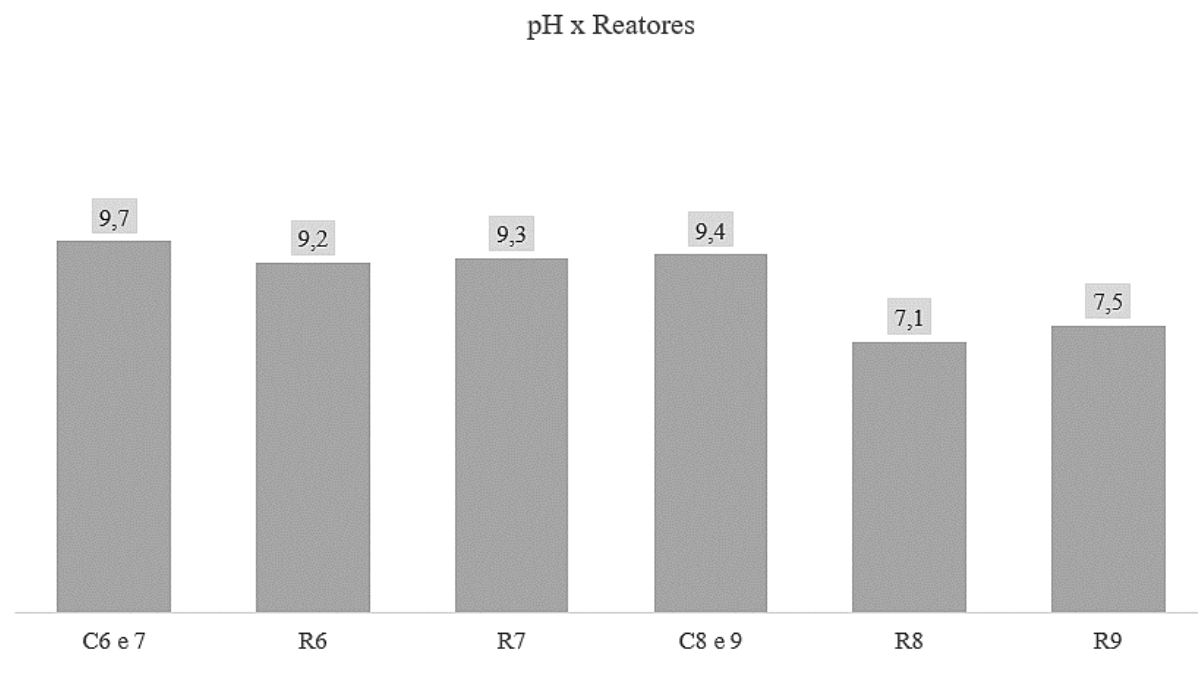
Pelo teste de Kruskal-Wallis, Tabela 36, observa-se que houve diferença significativa entre os tratamentos quando se compara a variação de iluminação e os resultados de temperatura. Pelo quadro de comparações múltiplas é possível verificar que, entre os tratamentos com lâmpadas, houve diferença estatística nos resultados de temperatura com um nível de significância de 5% (MCKIGHT; NAJAB,2010).

Tabela 36 - Teste Kruskal – Wallis e comparações múltiplas temperatura vs iluminação para as configurações 6 a 9

| Comparações Múltiplas | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| 1 lâmpada - 3 lâmpadas | 5 | 4,9 | Sim | 0,04 |

A Figura 21 informa o pH médio dos reatores referentes a configuração 6 a 9. Verifica-se uma tendência de o pH ser menor nos reatores inoculados com microalgas e maior nos controles.

Figura 21 - pH vs reatores para as configurações 6 a 9



A Tabela 37 informa o resultado da análise estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 6 a 9. O pH máximo foi verificado no Reator Controle da configuração 6 e 7 - três lâmpadas -, e o pH mínimo registrado no Reator 9 - uma lâmpada. De maneira geral, os dados de pH por reator variaram pouco. Os reatores que mais tiveram variação de pH, segundo o coeficiente de variância, foram o R9 e R8 - uma lâmpada (GOMES, 1990).

Tabela 37 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 6 a 9

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|---------------|-------|-----------|---------------|--------|--------|---------------------------|
| C6 e 7 | 9,7 | 0,1 | 0,3 | 10,1 | 9,3 | 4% |
| R6 | 9,1 | 0,05 | 0,2 | 9,4 | 9,0 | 2% |
| R7 | 9,2 | 0,04 | 0,1 | 9,4 | 9,0 | 2% |
| C8 e 9 | 9,3 | 0,3 | 0,5 | 10,0 | 9 | 6% |
| R8 | 7,0 | 1,4 | 1,2 | 8,4 | 6,3 | 17% |
| R9 | 7,5 | 2,7 | 1,6 | 9,3 | 6,3 | 22% |

Percebe-se que, de forma geral, o pH no Reator Controle é maior que os reatores inoculados com microalgas. Em culturas de microalgas autotróficas, o pH tende a aumentar continuamente devido à diminuição de carbono durante o processo de fotossíntese (SUH, 2003).

Pelo teste do Qui-quadrado obteve-se um p-valor de 0,38, logo, não houve relação estatística significativa entre o pH e a inoculação de microalgas para os tratamentos em questão (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

A partir da estatística descritiva verificada na Tabela 38, constata-se que os dados de pH para os reatores Controle variaram menos quando comparado com os reatores inoculados com microalgas, além de terem uma média 14% maior.

Tabela 38 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle” e “Microalgas” das configurações 6 a 9

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|-------------------|-------|-----------|---------------|--------|--------|---------------------------|
| Controle | 9,5 | 0,2 | 0,5 | 10,1 | 9 | 5% |
| Microalgas | 8,3 | 1,8 | 1,3 | 9,4 | 6,3 | 16% |

A partir da estatística descritiva verificada na Tabela 39, constata-se que, da mesma forma, os dados de pH para os reatores Controle variaram menos quando comparado com os reatores inoculados com agitação, além de terem uma média maior que os demais. Pelo teste do Qui-quadrado obteve-se um p-valor de 0,37, logo, não houve relação estatística significativa entre o pH e a agitação (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Tabela 39 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle”, “Aeração” e “Aeração e agitação” para as configurações 6 a 9

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|-----------------|-------|-----------|---------------|--------|--------|---------------------------|
| Controle | 9,5 | 0,2 | 0,5 | 10,1 | 9,0 | 5% |

| | | | | | | |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Aeração | 8,1 | 1,9 | 1,4 | 9,4 | 6,4 | 17% |
| Aeração e agitação | 8,4 | 2,0 | 1,4 | 9,4 | 6,3 | 17% |

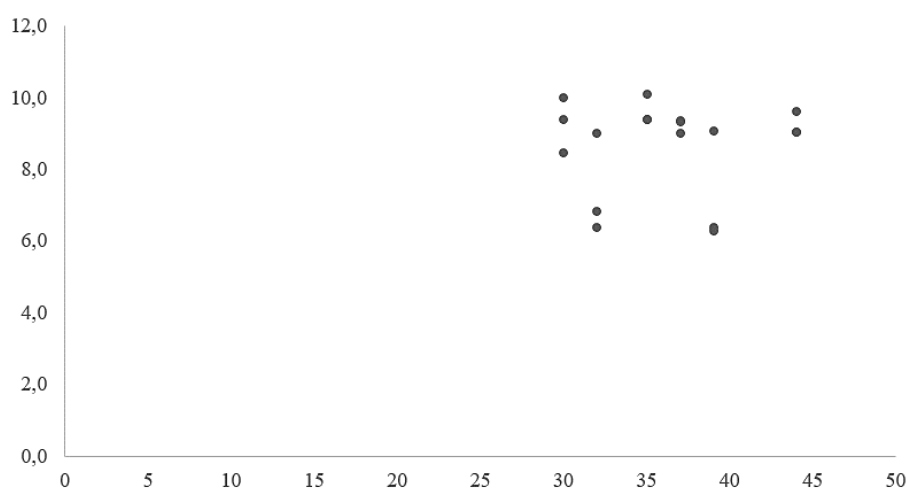
Segundo a Tabela 40, o tratamento com três lâmpadas atingiu o valor máximo de pH, e o mínimo foi percebido no tratamento com uma lâmpada. O tratamento com três lâmpadas teve baixa variação dos dados em relação à média (GOMES, 1990). Pelo teste do Qui-quadrado obteve-se um p-valor de 0,36, logo não houve relação estatística significativa entre o pH e a variação de iluminação (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Tabela 40 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “1 Lâmpada” e “3 Lâmpada” das configurações 6 a 9

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|-------------------|--------------|------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------------------|
| 1 lâmpada | 8,0 | 2,2 | 1,5 | 10,0 | 6,3 | 19% |
| 3 lâmpadas | 9,4 | 0,1 | 0,4 | 10,1 | 9,0 | 4% |

Avaliando a relação entre pH e temperatura, têm-se a Figura 22 e a Tabela 41. A partir da figura abaixo, pode-se avaliar a tendência dos dados e verificar algum grau de relação. Não é possível identificar uma relação de regressão entre a temperatura e o pH (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Figura 22 - Dispersão dos dados entre temperatura e pH



Pela análise de correlação apresentada pela Tabela 41, não é possível verificar correlação estatisticamente significativa, considerando a significância de 0,05, entre as variáveis temperatura e pH (COHEN,1992).

Tabela 41 - Coeficiente de correlação de Spearman entre temperatura e pH para as configurações 6 a 9

| Matriz de Correlação: Spearman | | |
|---------------------------------------|-------------|-------|
| | Temperatura | pH |
| Temperatura | 1 | -0,07 |
| pH | -0,07 | 1 |

| Matriz de P-valores | | |
|----------------------------|-------------|-----|
| | Temperatura | pH |
| Temperatura | 1 | 0,8 |
| pH | 0,8 | 1 |

5.3.3.5 Sólidos suspensos

A Tabela 42 informa os resultados da análise estatística descritiva para a variável sólidos suspensos. Possível avaliar os valores máximos de sólidos suspensos nos reatores R7 e R6, ambos inoculados com microalgas. Todos os reatores apresentaram coeficientes altos de variação, indicando heterogeneidade dos dados (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Tabela 42 - Estatística descritiva da variável sólidos suspensos para os reatores das configurações 6 a 9

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coeficiente de variação |
|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| C6 e 7 | 1063 | 679 | 1600 | 300 | 64% |
| R6 | 3133 | 1569 | 4300 | 1350 | 50% |

| | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|-----|
| R7 | 2817 | 1446 | 4450 | 1700 | 51% |
| C8 e 9 | 2057 | 1190 | 3250 | 870 | 58% |
| R8 | 2217 | 1447 | 3150 | 550 | 65% |
| R9 | 2350 | 1361 | 3600 | 900 | 58% |

Nas configurações anteriores também foi avaliado maiores valores de sólidos suspensos nos reatores inoculados com microalgas, indicando que a produção de biomassa algal tem relação direta com a concentração de sólidos suspensos (ABDULSADA, 2014).

A Tabela 43 apresenta o coeficiente de correlação de Spearman juntamente com a significância de p-valor para as variáveis sólidos suspensos, pH, remoção de fósforo e nitrogênio. Sólidos suspensos indicou correlação estatisticamente significativa com remoção de fósforo e temperatura. Assim como temperatura também apresentou com remoção de fósforo (COHEN,1992).

Tabela 43 - Coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis da configuração 6 a 9

| Matriz de Correlação: Spearman | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|
| | Remoção Fósforo | Remoção Nitrogênio | Sólidos suspensos(mg/L) | Temperatura |
| Remoção Fósforo | 1,00 | -0,19 | -0,71 | 0,64 |
| Remoção Nitrogênio | -0,19 | 1,00 | 0,39 | 0,28 |
| Sólidos suspensos(mg/L) | -0,71 | 0,39 | 1,00 | -0,61 |
| Temperatura | 0,64 | 0,28 | -0,61 | 1,00 |

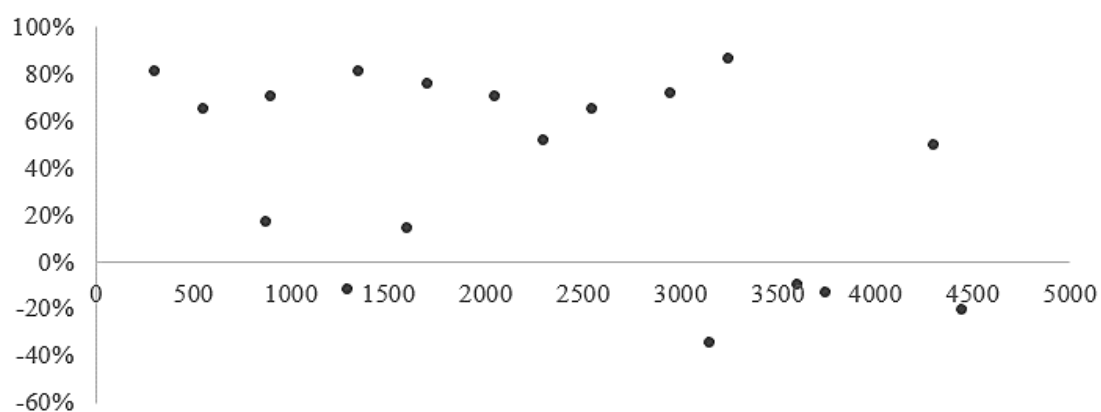
| Matriz de P-valores | | | | |
|----------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|
| | Remoção Fósforo | Remoção Nitrogênio | Sólidos suspensos(mg/L) | Temperatura |
| Remoção Fósforo | 1,00 | 0,56 | 0,01 | 0,03 |

| | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| Remoção Nitrogênio | 0,56 | 1,00 | 0,21 | 0,37 |
| Sólidos suspensos(mg/L) | 0,01 | 0,21 | 1,00 | 0,04 |
| Temperatura | 0,03 | 0,37 | 0,04 | 1,00 |

A partir das Figuras 23 e 24, pode-se avaliar a tendência dos dados e verificar algum grau de relação. É possível verificar uma curva polinomial entre a dispersão dos dados de sólidos suspensos e temperatura (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Figura 23 - Dispersão dos dados entre sólidos suspensos e remoções de fósforo e nitrogênio

Sólidos suspensos x Remoção de fósforo



Sólidos suspensos x Remoção de nitrogênio

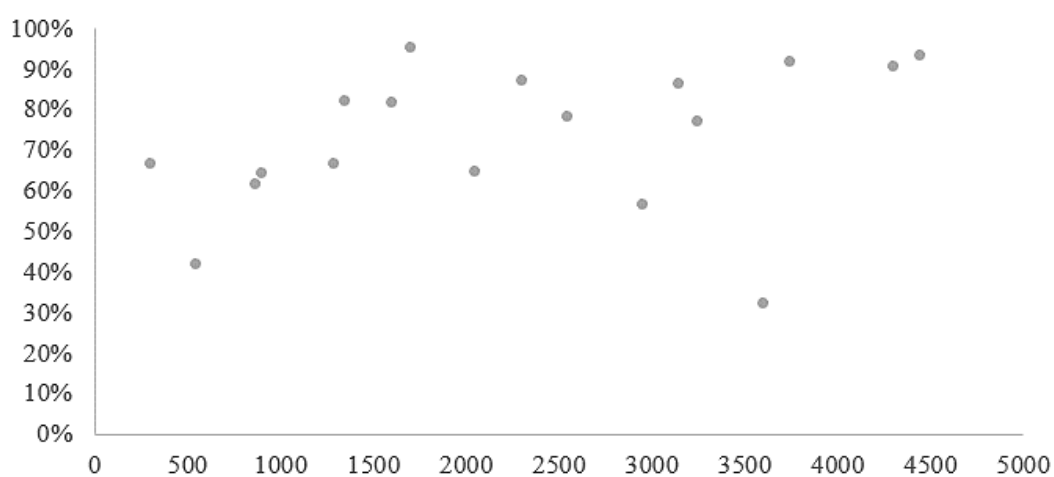
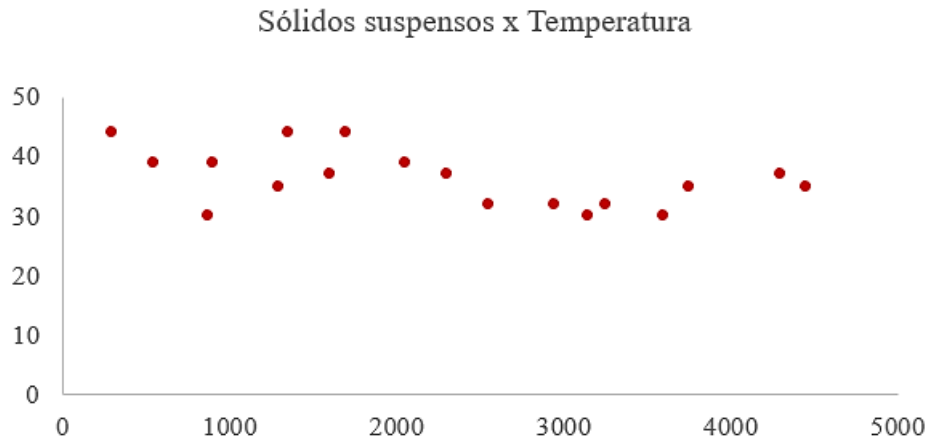


Figura 24 - Dispersão dos dados entre sólidos suspensos e temperatura



Os resultados do Kruskal-Wallis para comparações múltiplas entre os tratamentos abordados nesta seção e a variável sólidos suspensos estão apresentados na Tabela 44. Observa-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos para a produção de sólidos suspensos (MCKIGHT; NAJAB,2010).

Tabela 44 - Comparações múltiplas pelo teste de Kruskal-Wallis para sólidos suspensos configurações 6 a 9

| Comparações Múltiplas | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| 1 lâmpada - 3 lâmpadas | 3 | 7,3 | Não | 0,1 |
| 1 lâmpada - Controle | 3 | 7,3 | Não | 0,1 |
| 3 lâmpadas - Controle | 6 | 7,3 | Não | 0,1 |
| Aeração - Aeração e agitação | 0 | 7,3 | Não | 0,2 |
| Aeração - Controle | 4,5 | 7,3 | Não | 0,2 |
| Aeração e agitação - Controle | 4,5 | 7,3 | Não | 0,2 |

5.3.4 Experimentos 10 ao 13

Os resultados das análises físico-químicas para as configurações 10 a 13 estão consolidados na Tabela 45.

Tabela 45 - Concentração dos parâmetros químicos do efluente após filtração das configurações 10 a 13

| | Efluente de alimentação | Luz natural e aeração | | Luz natural e AA | | 2 lâmpada e aeração | | 2 lâmpada e AA | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------|---------------------|------|------------------------|------|-------------------|------|
| | | C10 | R10 | C11 | R11 | C12 | R12 | C13 | R13 |
| Fósforo (mg/L) | 58,5 | 29,7 | 68,8 | 29,7 | 39,5 | 79,7 | 81,1 | 79,7 | 80,9 |
| pH | 7,8 | 9,4 | 5,8 | 9,4 | 6,2 | 9,5 | 6,2 | 9,5 | 7,4 |
| DQO (mg/L) | 2610 | 1555 | 315 | 1555 | - | 2100 | 280 | 2100 | 210 |
| Amônia (mg/L) | 27,5 | 6,5 | 2,1 | 2,0 | 0,0 | 2,1 | 12,8 | 2,1 | 10,0 |
| Nitrito (mg/L) | 0 | 14,1 | 9,4 | 14,1 | 14,5 | 9,3 | 16,3 | 9,3 | 17,3 |
| Nitrato (mg/L) | 1,5 | 1,8 | 33,4 | 1,8 | 11,0 | 2,2 | 18,8 | 2,2 | 6,9 |
| Nitrogênio Total (mg/L) | 728 | 259 | 904 | 220 | 788 | 119 | 530 | 119 | 545 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 1880 | 747 | 1572 | 747 | 2183 | 827 | 1311 | 827 | 1206 |
| DBO (mg/L) | 630 | 80 | 0 | 80 | - | 80 | <10 | 80 | <10 |

AA – Aeração + agitação

5.3.4.1 Fósforo

Os reatores Controle que não tiveram introdução de células de microalgas, obtiveram uma variação menor dos dados, conforme coeficiente de variação da Tabela 46. Os maiores valores de concentração de fósforo foram encontrados nos reatores 12, 13 e 10, dois deles com iluminação artificial (duas lâmpadas – 4000 lux) (GOMES, 1990).

Tabela 46 - Estatística descritiva Fósforo configurações 10 a 13

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| C10 e 11 | 43,8 | 13,7 | 38,8 | 13,9 | 31% |
| R10 | 68,9 | 45,4 | 119,5 | 31,7 | 66% |
| R11 | 39,5 | 13,6 | 49,1 | 29,9 | 34% |
| C12 e 13 | 79,7 | 9,1 | 87,9 | 69,9 | 11% |
| R12 | 81,1 | 59,6 | 149,0 | 37,6 | 74% |
| R13 | 80,9 | 47,2 | 135,1 | 48,9 | 58% |

Avaliando a remoção de fósforo por tratamento, apresentada na Tabela 47, nota-se médias baixas de remoção de fósforo, variando de -8% para duas lâmpadas e 2% para Luz natural, sendo o melhor resultado apresentado pelo Controle, de 8%. Avaliando a Figura 25, percebe-se que os últimos ciclos diminuíram bastante a média total de remoção de fósforo para os reatores com microalgas. Os tratamentos apresentaram amplitude bastante elevada, dados dispersos e heterogêneos, confirmando oscilação acentuada dos dados de remoção (GOMES, 1990).

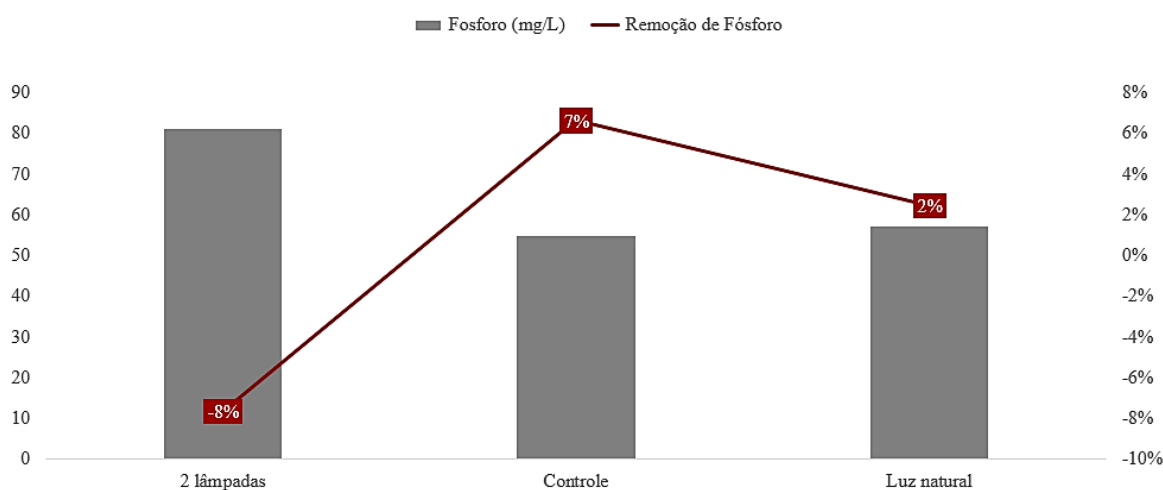
Tabela 47 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação

| Remoção de Fósforo | | | | | |
|---------------------------|--------------|---------------|------------|------------|---------------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| Controle | 7% | 50% | 76% | -50% | 754% |
| 2 lâmpadas | -8% | 62% | 36% | -131% | -808% |
| Luz natural | 2% | 62% | 49% | -104% | 2567% |
| Fósforo(mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| Controle | 54,7 | 29,3 | 87,9 | 13,9 | 54% |

| | | | | | |
|--------------------|------|------|-------|------|-----|
| 2 lâmpadas | 81,0 | 48,1 | 149,0 | 37,6 | 59% |
| Luz natural | 57,1 | 36,6 | 119,5 | 29,9 | 64% |

A Figura 25 define o comportamento da concentração – barras - em contraste com a remoção – linha - de fósforo, diferenciando os tratamentos pelo fator iluminação. Percebida remoção de fósforo bem inferior à aquelas verificadas nas configurações discutidas nas seções anteriores, principalmente nos reatores inoculados com microalgas.

Figura 25 - Remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator iluminação para as configurações 10 a 13



A Tabela 48 define a análise estatística da variável fósforo e remoção de fósforo, agora diferenciando os tratamentos por Controle, Aeração e Aeração + agitação. Analisando as médias, verifica-se que o tratamento com Aeração obteve valores maiores de remoção ao longo dos ciclos que o tratamento com aeração e agitação magnética. Neste cenário, também é notado valores desviando bastante de suas médias. Na conjuntura, os tratamentos com microalgas também não conseguiram superar o nível de remoção dos controles (GOMES, 1990).

Tabela 48 - Estatística descritiva da variável Fósforo e remoção de fósforo para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator mistura

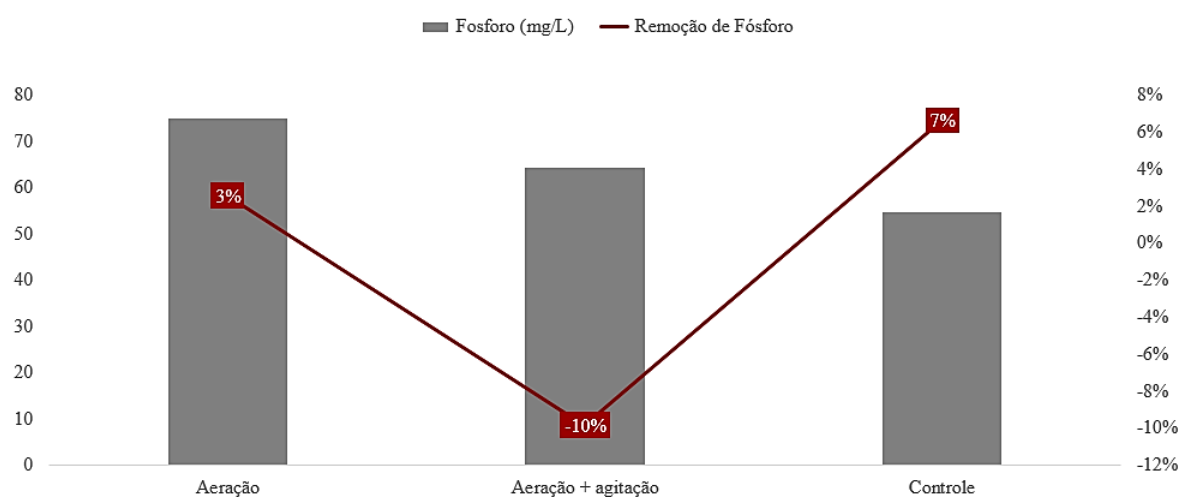
| Remoção de Fósforo |
|---------------------------|
|---------------------------|

| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
|---------------------------|-------|--------|-----|-------|--------------------------|
| Controle | 7% | 50% | 76% | -50% | 754% |
| Aeração | 3% | 55% | 46% | -104% | 2144% |
| Aeração + agitação | -10% | 70% | 49% | -131% | -711% |

| Fósforo(mg/L) | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|-------|------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| Controle | 54,7 | 29,3 | 87,9 | 13,9 | 54% |
| Aeração | 75,0 | 40,9 | 149,0 | 31,7 | 55% |
| Aeração + agitação | 64,3 | 40,9 | 135,1 | 29,9 | 64% |

A Figura 26 define o comportamento da concentração – barras - em contraste com a remoção – linha - de fósforo, diferenciando os tratamentos pelo fator agitação. De maneira geral, o tratamento “Aeração e agitação” teve performance pior que os outros.

Figura 26 - Remoção e concentração de fósforo diferenciando o fator agitação para as configurações 10 a 13



Avaliando se houve diferença estatística entre os tratamentos a partir do teste não paramétrico Kruskal – Wallis tem-se a Tabela 53:

Os tratamentos com variação luminosa, a partir da Tabela 49, obtiveram um p-valor de 0,8, ou seja, tais tratamentos não possuem diferenças estatísticas para remoção de fósforo. Os tratamentos com variação de agitação tiveram um p-valor de 0,95, ou seja, também não há diferenças estatísticas nestes tratamentos para remoção de fósforo. Também avaliou-se se as microalgas foram um tratamento diferente do controle para remoção de fósforo e similarmente foi encontrado p-valor maior que o nível de significância estabelecido (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020; MCKIGHT; NAJAB, 2010).

Tabela 49 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de fósforo para os tratamentos das configurações 10 a 13

| Comparações Múltiplas - remoção de fósforo | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| 2 lâmpadas - Controle | 1,2 | 7,0 | Não | 0,80 |
| 2 lâmpadas - Luz natural | 2,0 | 7,3 | Não | 0,80 |
| Controle - Luz natural | 0,8 | 7,3 | Não | 0,80 |
| Aeração - Aeração + agitação | 0,9 | 7,3 | Não | 0,95 |
| Aeração - Controle | 0,2 | 7,0 | Não | 0,95 |
| Aeração + agitação - Controle | 0,8 | 7,3 | Não | 0,95 |
| Controle - Microalgas | 0,3 | 5,0 | Não | 0,92 |

5.3.4.2 Nitrogênio

Verificando os dados de amônia, nitrito e nitrato da Tabela 50, avalia-se que a amônia foi totalmente removida no reator R11. Tanto o nitrito quanto o nitrato tiveram um aumento de concentração em relação ao efluente de alimentação em todos os ciclos. Destaque para o reator R12, que teve produção de nitrato significativamente superior aos outros reatores.

Nestas configurações também foi observado ajuntamento de nitrito, principalmente nos controles, tal acúmulo se dá principalmente pela aeração contínua (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2022).

A Tabela 50 informa o resultado da análise descritiva dos dados de nitrogênio total para as configurações 10 a 13. A concentração de nitrogênio desviou bastante nos reatores R13 e C10 e 11. Os menores valores de nitrogênio, segundo a Tabela, ficaram nos reatores controle da configuração 12 e 13. Maior média registrada foi no reator R10 (GOMES, 1990).

Tabela 50 - Estatística descritiva Fósforo configurações 10 a 13

| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| C10 e 11 | 226,4 | 104,4 | 373,7 | 170,2 | 46% |
| R10 | 903,7 | 161,5 | 1084,6 | 774,1 | 18% |
| R11 | 788,3 | 29,6 | 809,3 | 767,4 | 4% |
| C12 e 13 | 119,0 | 14,3 | 135,4 | 108,4 | 12% |
| R12 | 529,6 | 80,4 | 616,1 | 457,0 | 15% |
| R13 | 545,3 | 272,9 | 816,2 | 270,5 | 50% |

Analisando a remoção de nitrogênio por tratamento, exibida na Tabela 51, nota-se médias baixas de remoção para os tratamentos com iluminação, variando de -18% para luz natural e 26% para duas lâmpadas, sendo o melhor resultado apresentado pelo Controle - de 74%. Os tratamentos com iluminação apresentaram amplitude bastante elevada, dados dispersos e heterogêneos, confirmando oscilação acentuada da remoção ao longo dos ciclos (GOMES, 1990).

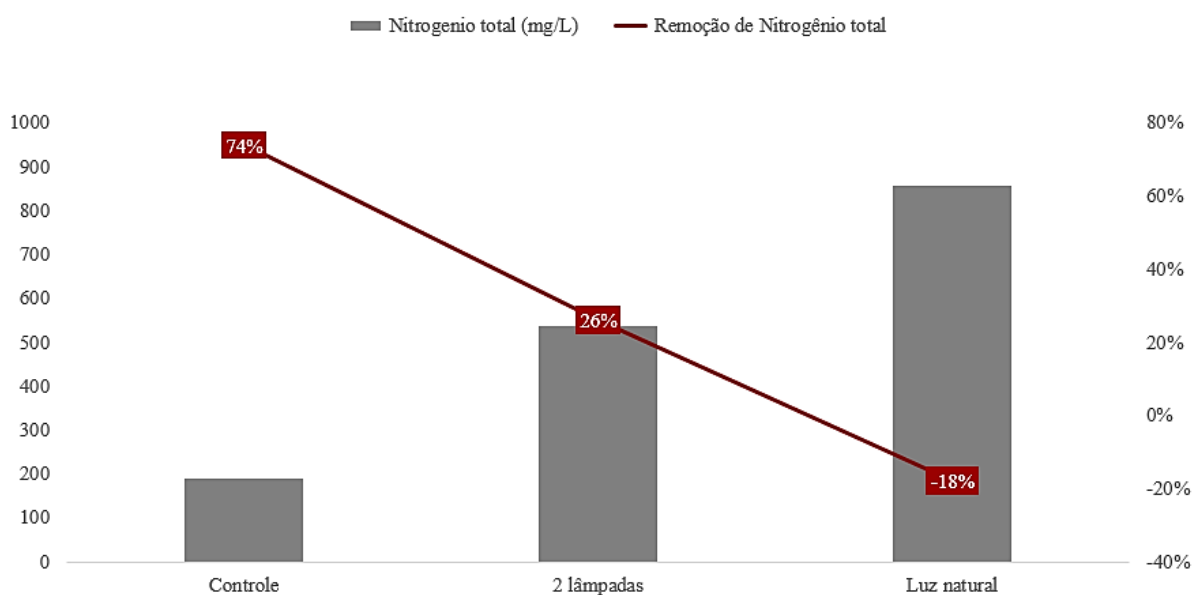
Tabela 51 - Estatística descritiva da variável Nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação

| Remoção de Nitrogênio | | | | | |
|------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 74% | 14% | 85% | 49% | 19% |

| | | | | | |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| 2 lâmpadas | 26% | 25% | 63% | -12% | 95% |
| Luz natural | -18% | 18% | -5% | -49% | -101% |
| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 188,8 | 101,4 | 373,7 | 108,4 | 54% |
| 2 lâmpadas | 537,5 | 180,1 | 816,2 | 270,5 | 34% |
| Luz natural | 857,5 | 131,3 | 1084,6 | 767,4 | 15% |

A Figura abaixo ilustra o comportamento da remoção nitrogênio bem como o quantitativo de concentração. Verificado que as menores concentrações de nitrogênio foram apresentadas pelo Controle. O tratamento com iluminação natural não teve remoção de nitrogênio, já o tratamento com duas lâmpadas teve média de remoção igual a 26%.

Figura 27 - Remoção e concentração de nitrogênio para as configurações 10 a 13 diferenciando o fator iluminação



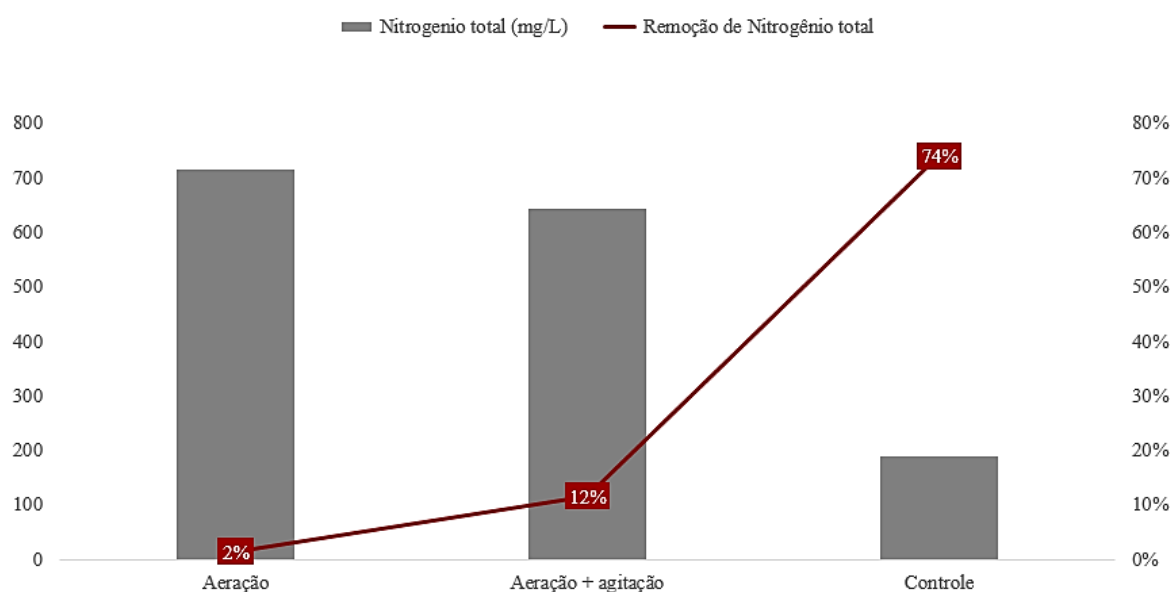
A Tabela 52 destaca os resultados de remoção e concentração de nitrogênio, diferenciando-os pelo fator agitação do tratamento. No caso da remoção de nitrogênio, foi verificado que o tratamento com aeração e agitação obteve resultados maiores de remoção de nitrogênio quando comparado com o tratamento com aeração. Os dados de nitrogênio para os tratamentos com microalgas também desviaram bastante da média, demonstrando heterogeneidade e alta dispersão dos dados (GOMES, 1990).

Tabela 52 - Estatística descritiva da variável nitrogênio e remoção de nitrogênio para os reatores das configurações 10 a 13 diferenciando o fator mistura

| Remoção de Nitrogênio | | | | | |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 74% | 14% | 85% | 49% | 19% |
| Aeração | 2% | 32% | 37% | -49% | 2127% |
| Aeração + agitação | 12% | 32% | 63% | -12% | 276% |
| Nitrogênio (mg/L) | | | | | |
| | Média | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
| Controle | 188,8 | 101,4 | 373,7 | 108,4 | 54% |
| Aeração | 716,6 | 234,5 | 1084,6 | 457,0 | 33% |
| Aeração + agitação | 642,5 | 234,9 | 816,2 | 270,5 | 37% |

A Figura 28 exibe o comportamento da remoção e concentração do nitrogênio para os tratamentos diferenciados pelo fator agitação. Avalia-se que o Controle obteve os melhores resultados de remoção de nitrogênio, ou seja, as concentrações mais baixas destes dois elementos.

Figura 28 - Remoção e concentração de fósforo e nitrogênio para as configurações 9 a 12 ao longo dos ciclos diferenciando o fator mistura



Avaliando se houve diferença estatística entre os tratamentos a partir do teste não paramétrico Kruskal – Wallis tem-se a Tabela 53:

Os tratamentos com variação luminosa, a partir da Tabela 53, obtiveram um p-valor de 0,002, ou seja, tais tratamentos possuem diferenças estatísticas para remoção de nitrogênio. Os tratamentos com variação de agitação tiveram um p-valor de 0,005, ou seja, do mesmo modo há diferenças estatísticas nestes tratamentos para remoção de nitrogênio. Também avaliado se as microalgas foram um tratamento diferente do Controle para remoção de nitrogênio, assim como encontrado p-valor menor que o nível de significância estabelecido (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020; MCKIGHT; NAJAB, 2010).

Tabela 53 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de nitrogênio para os tratamentos das configurações 10 a 13

| Comparações Múltiplas - Remoção de nitrogênio | | | | |
|---|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| Controle - Microalgas | 8,2 | 5,0 | Sim | 0,001 |
| 2 lâmpadas - Controle | 6,2 | 7,0 | Não | 0,002 |

| | | | | |
|--------------------------------------|------|-----|-----|-------|
| 2 lâmpadas - Luz natural | 4,6 | 7,3 | Não | 0,002 |
| Controle - Luz natural | 10,7 | 7,3 | Sim | 0,002 |
| Aeração - Aeração + agitação | 0,9 | 7,3 | Não | 0,005 |
| Aeração - Controle | 8,7 | 7,0 | Sim | 0,005 |
| Aeração + agitação - Controle | 7,7 | 7,3 | Sim | 0,005 |

5.3.4.3 DQO e DBO

A concentração de DQO para o reator inoculado com microalgas R10 foi de 315 mgO₂/L, Tabela 45, concentração bem inferior ao efluente de alimentação. O Controle obteve concentração de DQO 1550 mg/L, também inferior ao efluente de alimentação.

A concentração mínima para DQO foi de 210 mgO₂/L (Reator R13), e menor que 10 mgO₂/L para DBO (Reatores R5 e R6). A remoção de DQO atingiu seu máximo de 92% no tratamento com 2 lâmpada (R13) e mínimo de 20% nos controles das configurações 12 e 13. Já a remoção de DBO obteve como valor máximo 99% para os os reatores R10, R12 e R13 e mínimo de 87% para os controles.

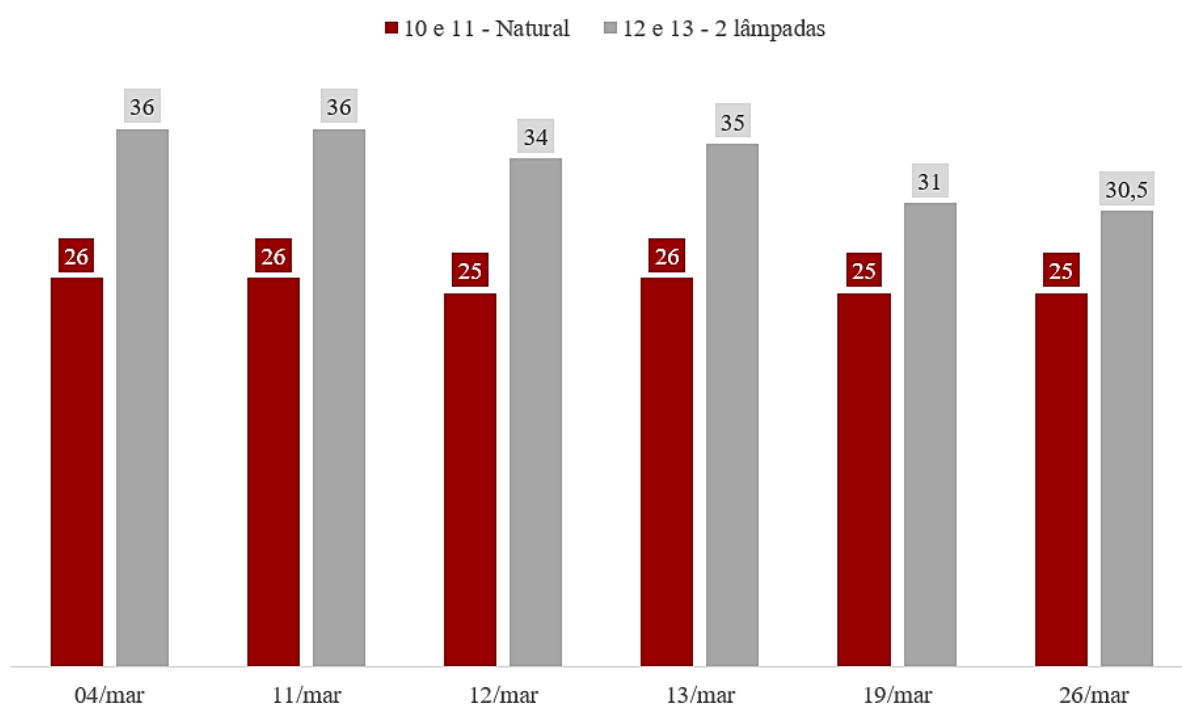
A remoção de DQO para os tratamentos com microalgas variou entre 88% (R10) a 92% (R13), e a remoção de DBO variando entre 87% (Controles) e 99% (R10, R12 e R13).

Verifica-se também, a partir da Tabela 49, a concentração de DQO para o R11 foi de 280 mg/L, e para o R12 de 210 mg/L, concentrações bem inferiores ao efluente de alimentação. O Controle obteve concentração de DQO de 1550 mg/L, também inferior ao efluente de alimentação.

5.3.4.4 pH e temperatura

De acordo com a Figura 29, a temperatura foi maior nas configurações com iluminação artificial. Chegando a 36°C nas configurações 12 e 13 (duas lâmpadas). Comparando as temperaturas atingidas pelo tratamento de luz natural e com duas lâmpadas, pois foram tratamentos realizados no mesmo período, pode-se concluir que o tratamento com iluminação artificial pode subir a temperatura do sistema em até 10°C.

Figura 29 - Temperatura ao longo dos ciclos para as configurações 10 a 13



Pela avaliação da Tabela 54, nota-se que o valor máximo de temperatura foi atingido pelas configurações 10 e 11 (duas lâmpadas), alcançando 36°C em seu pico. E o valor mínimo foi obtido pelas configurações 12 e 13 (Luz natural) e igual a 25°C. A média de temperatura do tratamento com luz artificial foi 8°C maior que o tratamento com luz natural. Os dados de temperatura, de maneira geral, não apresentaram variação significativa da média e apresentaram dados homogêneos (GOMES, 1990).

Tabela 54 - Análise descritiva de temperatura para as configurações 10 a 13

| | Média | Variância | Desvio | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variação |
|----------------|--------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| 10 e 11 | 25,5°C | 0,3 | 0,5 | 26 | 25 | 2% |
| 12 e 13 | 33,7°C | 5,9 | 2,4 | 36 | 30,5 | 7% |

Avaliando estatisticamente a relação da temperatura com a variação de iluminação pelo teste do Qui-quadrado, obteve-se um p-valor de 0,002 e um coeficiente de contingência igual a 0,7, logo, houve relação estatística bastante significativa entre a temperatura e a variação de iluminação para as configurações em questão (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

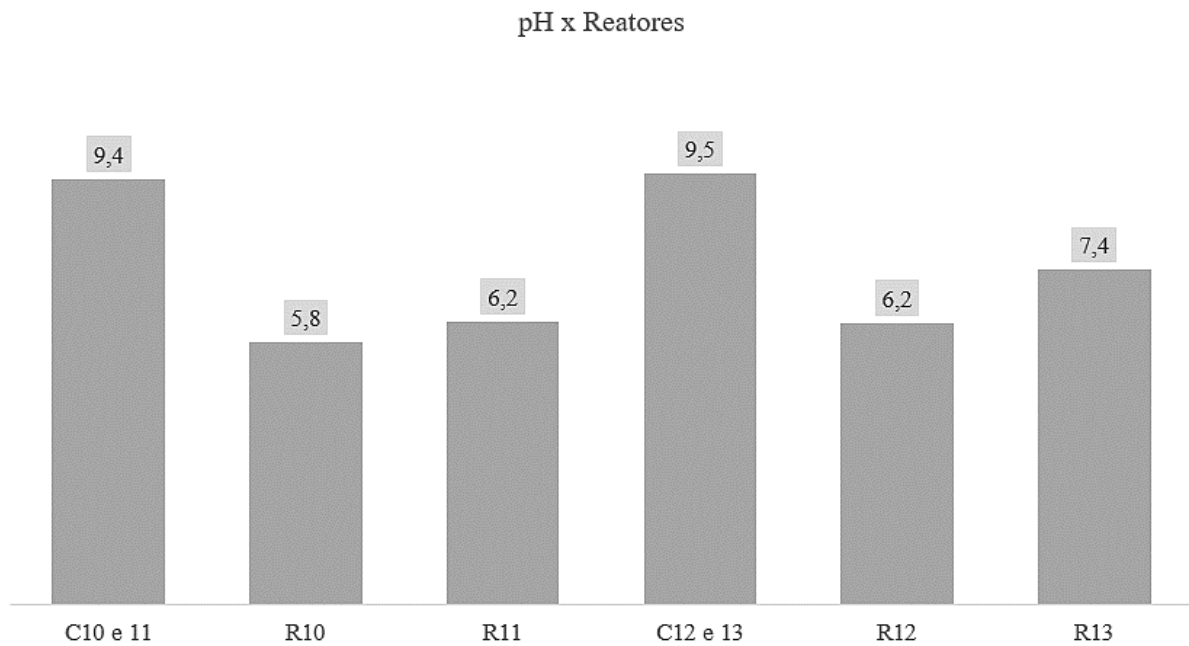
Já avaliando pelo teste de Kruskal-Wallis (Tabela 55), observa-se que houve diferença significativa entre os tratamentos quando se compara a variação de iluminação e os resultados de temperatura. Pelo quadro de comparações múltiplas, é possível verificar que entre os tratamentos houve diferença estatística bastante significativa nos resultados de temperatura com um nível de significância de 5% (MCKIGHT; NAJAB,2010).

Tabela 55 - Teste Kruskal – Wallis e comparações múltiplas temperatura vs iluminação para as configurações 10 a 13

| Comparações Múltiplas | | | | |
|---------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------|
| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
| 2 lâmpadas - Luz natural | 8,5 | 4,8 | Sim | 0,0004 |

A Figura 30 informa o pH médio dos reatores referentes a configuração 10 a 13. Neste caso também se verifica uma tendência de o pH ser menor nos reatores inoculados com microalgas e maior nos controles.

Figura 30 - pH vs reatores para as configurações 10 a 13



A Tabela 56 informa o resultado da análise estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 10 a 13. O pH máximo foi verificado no Reator Controle da configuração 12 e 13 (duas lâmpadas) e o pH mínimo registrado no Reator 10 (Luz natural). De maneira geral, os dados de pH por reator variaram pouco. O reator que mais teve variação de pH, segundo o coeficiente de variância, foi o R13 (duas lâmpadas) (GOMES, 1990).

Tabela 56 - Estatística descritiva da variável pH para os reatores das configurações 10 a 13

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|-----------------|-------|-----------|---------------|--------|--------|---------------------------|
| C10 e 11 | 9,37 | 0,25 | 0,5 | 9,79 | 8,81 | 5% |
| R10 | 5,78 | 0,24 | 0,49 | 6,19 | 5,23 | 9% |
| R11 | 6,23 | 0,01 | 0,11 | 6,31 | 6,15 | 2% |
| C12 e 13 | 9,49 | 0,25 | 0,5 | 9,95 | 8,96 | 5% |
| R12 | 6,2 | 0,33 | 0,57 | 6,67 | 5,56 | 9% |
| R13 | 7,37 | 1,6 | 1,26 | 8,83 | 6,63 | 17% |

Pelo teste do Qui-quadrado obteve-se um p-valor de 0,38, logo, não houve relação estatística significativa entre o pH e a inoculação de microalgas para os tratamentos em questão (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

A partir da estatística descritiva disposta na Tabela 57, constata-se que os dados de pH para os reatores Controle variaram menos quando comparado com os reatores inoculados com microalgas, além de terem uma média 28% maior.

Tabela 57 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle” e “Microalgas” das configurações 10 a 13

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máx | Min | Coefficiente de variância |
|-------------------|--------------|------------------|----------------------|------------|------------|----------------------------------|
| Controle | 9,4 | 0,2 | 0,5 | 10,0 | 8,81 | 5% |
| Microalgas | 6,4 | 0,9 | 0,9 | 8,8 | 5,23 | 14% |

A partir da estatística descritiva verificada na Tabela 58, constata-se que, da mesma forma, os dados de pH para os reatores Controle variaram menos quando comparado com os reatores inoculados com agitação, além de terem uma média maior que os demais. Comparando o pH dos tratamentos “Aeração” com “Aeração e agitação”, o tratamento “Aeração” teve uma variação menor de sua média quando comparado com o tratamento “Aeração e agitação”. Pelo teste do Qui-quadrado obteve-se um p-valor de 0,37, logo, não houve relação estatística significativa entre o pH e a agitação (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Tabela 58 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “Controle”, “Aeração” e “Aeração e agitação” das configurações 10 a 13

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|---------------------------|--------------|------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------------------|
| Controle | 9,4 | 0,2 | 0,5 | 10,0 | 8,8 | 5% |
| Aeração | 6,0 | 0,3 | 0,5 | 6,7 | 5,2 | 9% |
| Aeração e agitação | 6,9 | 1,2 | 1,1 | 8,8 | 6,2 | 16% |

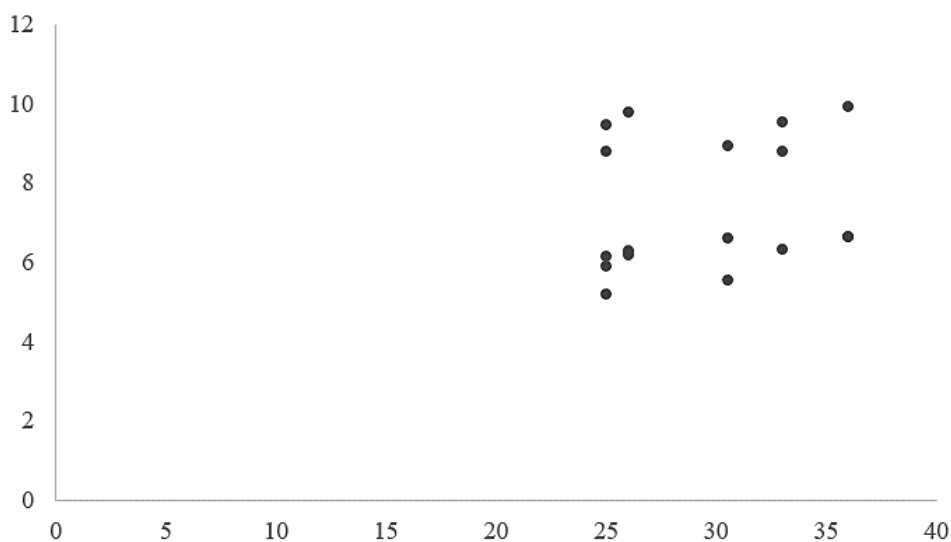
Segundo a Tabela 59, o tratamento com duas lâmpadas atingiu o valor máximo de pH, e o mínimo foi percebido no tratamento com luz natural. Ambos tratamentos tiveram alta variação dos dados em relação à média (GOMES, 1990). Pelo teste do Qui-quadrado, obteve-se um p-valor de 0,38, logo, não houve relação estatística significativa entre o pH e a variação de iluminação (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Tabela 59 - Estatística descritiva da variável pH para os tratamentos “2 Lâmpadas” e “Luz natural” das configurações 10 a 13

| | Média | Variância | Desvio padrão | Máximo | Mínimo | Coefficiente de variância |
|--------------------|-------|-----------|---------------|--------|--------|---------------------------|
| Luz natural | 7,2 | 3,3 | 1,8 | 9,79 | 5,23 | 25% |
| 2 lâmpadas | 7,7 | 2,6 | 1,6 | 9,95 | 5,56 | 21% |

A partir da Figura 31, pode-se avaliar a tendência dos dados e verificar algum grau de relação. Não é possível identificar uma relação de regressão entre a temperatura e o pH (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Figura 31 - Dispersão dos dados entre temperatura e pH para as configurações 10 a 13



Pela análise de correlação apresentada pela Tabela 60, não é possível verificar correlação estatisticamente significativa, considerando a significância de 0,05, entre as variáveis temperatura e pH (COHEN,1992).

Tabela 60 - Coeficiente de correlação de Spearman entre temperatura e pH

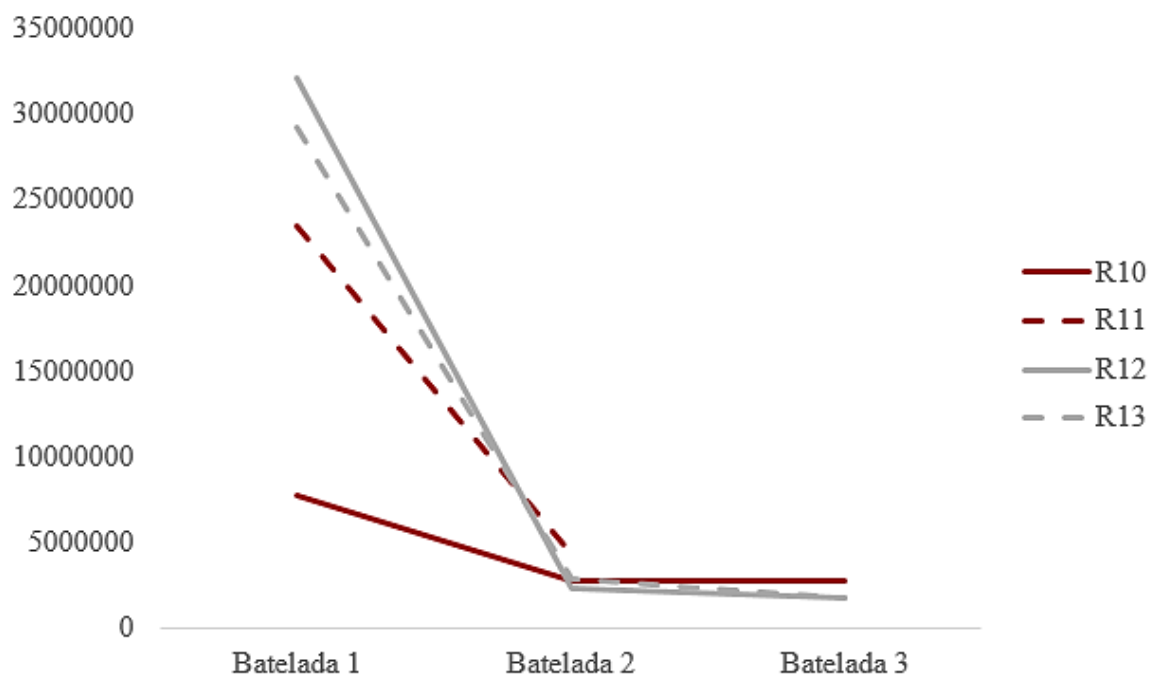
| Matriz de Correlação: Spearman | | |
|---------------------------------------|-------------|-----|
| | Temperatura | pH |
| Temperatura | 1 | 0,4 |
| pH | 0,4 | 1 |

| Matriz de P-valores | | |
|----------------------------|-------------|-----|
| | Temperatura | pH |
| Temperatura | 1 | 0,1 |
| pH | 0,1 | 1 |

5.3.4.5 Sólidos suspensos

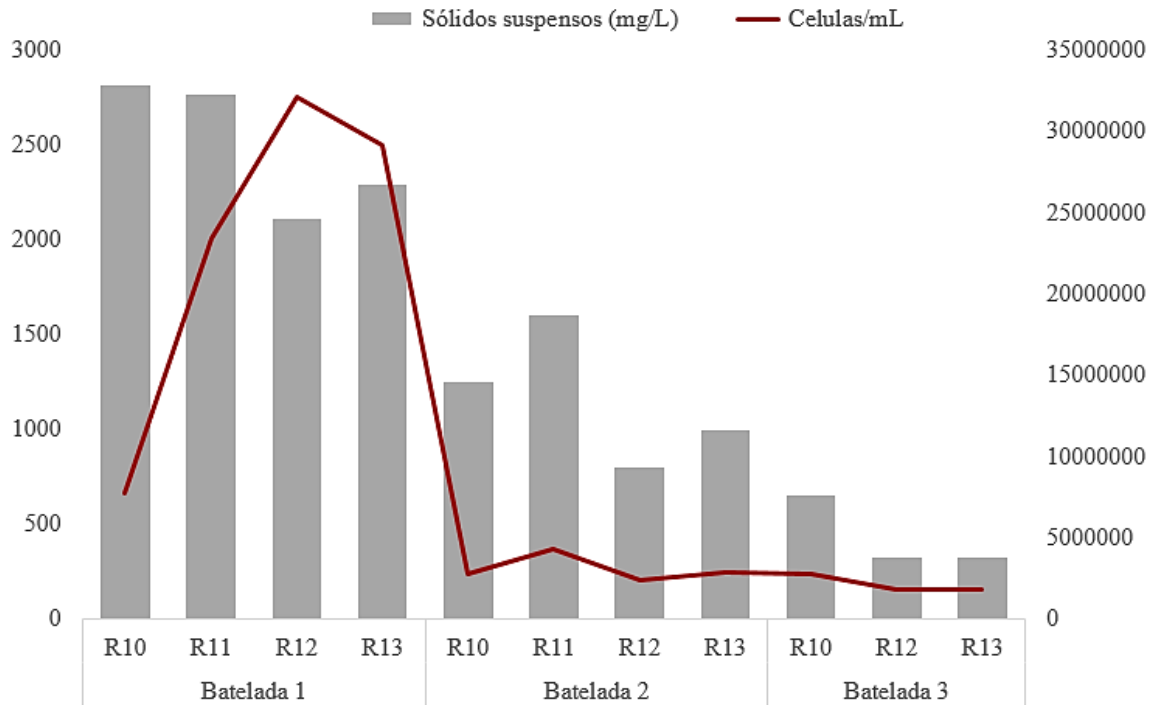
Para as configurações 10 a 13, foi feita contagem das células de microalgas ao fim de cada batelada utilizando a câmara de Neubauer pelos métodos elucidados na seção 4.3. Os resultados da contagem são visualizados na Figura 32. Percebe-se, para estas configurações, que houve um decaimento na contagem de células a partir da segunda batelada.

Figura 32 - Contagem de células para as configurações 10 a 13



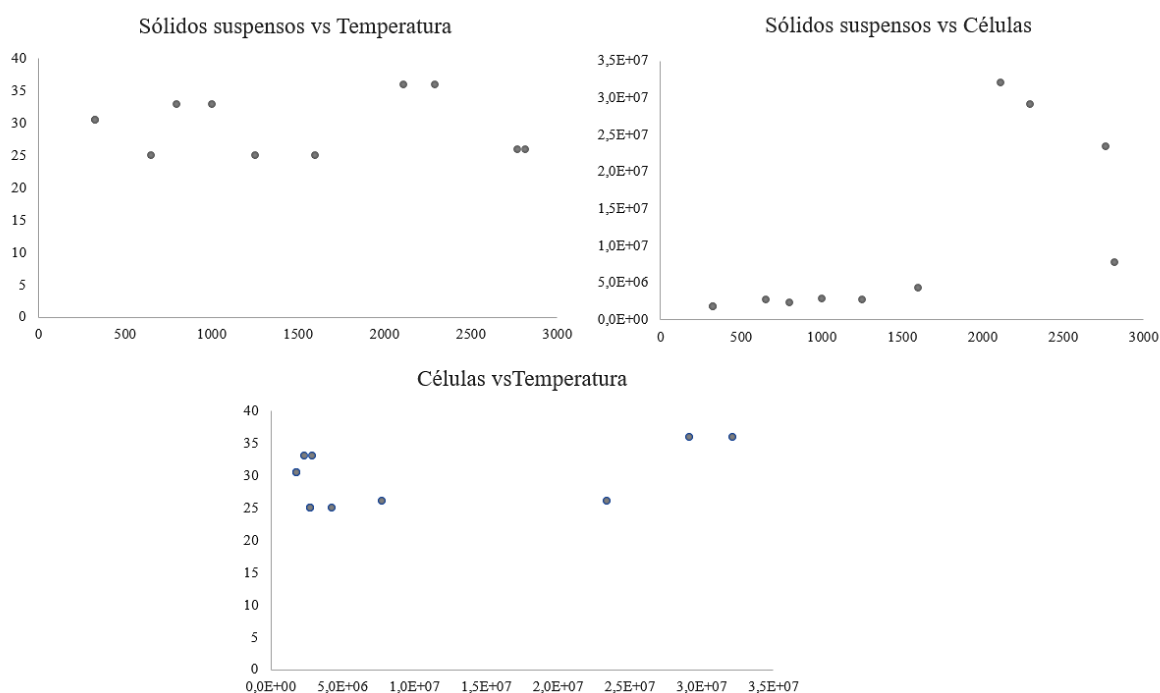
O aumento de sólidos suspensos, por vezes, está associado à produção de células de microalgas, desta forma, foi avaliado pelo gráfico da Figura 33, o comparativo da contagem de células (linha) com sólidos suspensos (colunas). Verificado que os sólidos suspensos também tiveram um decréscimo a partir da segunda batelada em todos os reatores inoculados com microalgas (ABDULSADA, 2014).

Figura 33 - Visão comparativa de sólidos suspensos (colunas) e contagem de células (linha) para as configurações 10 a 13



Pela Figura 34 foi possível verificar que os dados de sólidos suspensos e células/mL têm uma tendência exponencial, já os outros apresentam uma leve tendência de dispersão polinomial (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Figura 34 - Dispersão entre parâmetros sólidos suspensos, células de microalgas e temperatura para as configurações 10 a 13



Pelo coeficiente de correlação de Spearman, apresentado na Tabela 61, a quantidade de células de microalgas tem correlação forte com o parâmetro Sólidos suspensos, sendo uma relação positiva. A correlação é estatisticamente significativa, já que o p-valor está menor que o nível de significância estabelecido de 5%. A temperatura não apresentou relação com sólidos suspensos, e para a quantidade de células apresentou um p-valor fora do intervalo de confiança, logo, não é considerada significativa a correlação apresentada (COHEN,1992).

Tabela 61 - Matriz de correlação de Spearman para as variáveis Célula/mL, Sólidos suspensos e Temperatura nos tratamentos de 10 a 13

| Matriz de | | | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| Correlação: Spearman | | | |
| | Células/mL | Sólidos suspensos (mg/L) | Temperatura |
| Células/mL | 1,00 | 0,84 | 0,31 |

| | | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| Sólidos suspensos(mg/L) | 0,84 | 1,00 | 0,05 |
| Temperatura | 0,31 | 0,05 | 1,00 |
| Matriz de P-valores | | | |
| | Células/mL | Sólidos suspensos (mg/L) | Temperatura |
| Células/mL | 1,00 | 0,002 | 0,35 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 0,00 | 1,00 | 0,88 |
| Temperatura | 0,35 | 0,88 | 1,00 |

Pela correlação de Spearman apresentada na Tabela 62, a quantidade de células de microalgas tem correlação direta forte com a remoção de Fósforo. E como foi analisado anteriormente, sólidos suspensos têm correlação positiva com a quantidade de células, logo, segue a mesma tendência de correlação com as remoções. Analisando p-valores, as correlações entre sólidos suspensos, células/mL e remoção de fósforo são estatisticamente significativas (COHEN,1992).

Tabela 62 - Matriz de correlação de Spearman para as variáveis célula/mL, sólidos suspensos, temperatura, remoção de fósforo e remoção de nitrogênio nos tratamentos de 10 a 13.

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| Matriz de Correlação: Spearman | | | |
| | Células/mL | Sólidos suspensos (mg/L) | Temperatura |
| Células/mL | 1,00 | 0,84 | 0,31 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 0,84 | 1,00 | 0,05 |
| Temperatura | 0,31 | 0,05 | 1,00 |

| Matriz de P-valores | | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| | Células/mL | Sólidos suspensos (mg/L) | Temperatura |
| Células/mL | 1,00 | 0,002 | 0,35 |
| Sólidos suspensos (mg/L) | 0,00 | 1,00 | 0,88 |
| Temperatura | 0,35 | 0,88 | 1,00 |

Como verificado anteriormente, a contagem de células de microalgas demonstrou um decaimento a partir da segunda batelada, o que pode ter levado à variação de dados e consequente perda de performance dos reatores inoculados com microalgas (WANG et al., 2016).

5.3.6 Visão geral dos experimentos 1 a 13

Nesta seção foi realizada uma análise comparativa de todas as configurações, avaliando as médias dos tratamentos, bem como valores máximos e mínimos, avaliando qual tratamento obteve a melhor performance.

A Tabela 63 mostra o quadro geral da remoção de fósforo para as variações luminosas, separados com aeração e sem aeração. Pela tabela, verifica-se que a adição do fator aeração aumentou a remoção do fósforo, porém aumentou também a dispersão e variabilidade dos dados. Analisando os tratamentos sem aeração, verifica-se que o fator iluminação e consequentemente a inoculação com microalgas, foi significativo para aumentar a remoção de fósforo em até 30%. A melhor performance de remoção de fósforo - sem aeração - foi verificada pelo tratamento com duas lâmpadas.

Analisando a performance dos tratamentos com aeração, percebe-se que o tratamento com quatro lâmpadas obteve os melhores resultados de remoção e também baixa variabilidade de seus dados. Todos os outros tratamentos com aeração obtiveram valores altos de remoção de fósforo, como observado pelos valores máximos da Tabela 63, porém, devido à alta amplitude de seus dados, suas médias foram drasticamente diminuídas, sendo menores que os tratamentos sem aeração (MAGALHÃES; LIMA, 2002; GOMES, 1990).

Tabela 63 - Remoção de fósforo para os tratamentos de iluminação

| Remoção de fósforo - Sem aeração | | | | | |
|---|-------|--------|-----|-------|--------------------------|
| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
| Controle | 15% | 13% | 41% | 5% | 87% |
| Luz natural | 41% | 13% | 53% | 16% | 32% |
| 2 Lâmpadas | 47% | 10% | 59% | 35% | 21% |
| 4 lâmpadas | 42% | 9% | 49% | 27% | 23% |
| Remoção de fósforo - Com aeração | | | | | |
| Controle | 35% | 47% | 88% | -50% | 134% |
| Luz Natural | 2% | 62% | 49% | -104% | 2567% |
| 1 lâmpada | 38% | 47% | 72% | -35% | 125% |
| 2 lâmpadas | -8% | 62% | 36% | -131% | -808% |
| 3 Lâmpadas | 37% | 44% | 81% | -20% | 117% |
| 4 lâmpadas | 80% | 13% | 95% | 60% | 17% |

A Tabela 64 mostra o quadro geral da remoção de nitrogênio para as variações luminosas, como explanado nas seções anteriores, as concentrações de nitrogênio somente foram medidas a partir da configuração 4, logo, os dados apresentados pela Tabela 65 são com aeração. Analisando o coeficiente de variação dos tratamentos, verifica-se alta variabilidade e

heterogeneidade dos dados, com exceção do tratamento com três lâmpadas. Pelos valores máximos, excluindo o tratamento com luz natural, aponta-se que, em algum ponto, os tratamentos tiveram alta remoção de nitrogênio, porém, devido ao alto desvio apresentado nestes tratamentos, a performance geral foi prejudicada (GOMES, 1990).

O Controle, que foi o tratamento sem adição de microalgas, apresentou média de remoção igual a 44%. O tratamento com três lâmpadas apresentou a melhor remoção de nitrogênio, consolidando uma média de 90% de remoção, 104% maior em relação à média de remoção do controle. O tratamento com uma lâmpada não apresentou remoção de nitrogênio.

Tabela 64 - Remoção de nitrogênio para os tratamentos de iluminação

| | Média | Desvio | Máx | Min | Coefficiente de variação |
|--------------------|--------------|---------------|------------|------------|---------------------------------|
| Controle | 44% | 63% | 85% | -157% | 143% |
| Luz Natural | -18% | 18% | -5% | -49% | -101% |
| 1 lâmpada | 60% | 21% | 86% | 32% | 35% |
| 2 lâmpadas | 26% | 25% | 63% | -12% | 95% |
| 3 Lâmpadas | 90% | 5% | 95% | 82% | 5% |
| 4 lâmpadas | 76% | 46% | 97% | -6% | 61% |

Visando avaliar se a aeração foi um fator significativo para a remoção de fósforo, selecionou-se os tratamentos das configurações 1, 2, 3, 5, 10 e 12, pois estes tratamentos possuem a mesma iluminação e variaram no fator aeração. A Tabela 65 informa os resultados das comparações múltiplas do teste de Kruskal – Wallis. A partir a tabela é possível inferir que a aeração influenciou nos resultados de remoção de fósforo apenas para os tratamentos com duas lâmpadas e quatro lâmpadas.

Tabela 65 - Teste Kruskal-Wallis da variável remoção de fósforo para os tratamentos com aeração e sem aeração

Comparações Múltiplas - Remoção de fósforo

| Fatores Comparados | Diferença Observada | Diferença Crítica | Diferença | P-valor |
|--|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------|
| Luz natural - Com agitação - Sem agitação | 3,9 | 4,4 | Não | 0,079 |
| 2 lâmpadas - Com agitação - Sem agitação | 6,7 | 4,4 | Sim | 0,003 |
| 4 lâmpadas - Com agitação - Sem agitação | 5,5 | 3,9 | Sim | 0,006 |

6. CONCLUSÃO

Os tratamentos apresentados por esta pesquisa tiveram remoção de nutrientes. As médias de remoção de fósforo ao longo dos experimentos, para os reatores com introdução de microalgas, variaram de 2% a 80%, chegando ao máximo de 95%. Para o nitrogênio, as médias de remoção ficaram entre 26% a 90%, atingindo um máximo de 97%.

Quanto a performance dos tratamentos com variação luminosa sem aeração, tem-se a melhor eficiência no tratamento com duas lâmpadas, que atingiu uma média de remoção de fósforo igual a 47%. Já para os tratamentos com aeração, o destaque para remoção de fósforo foi para o tratamento com quatro lâmpadas, que atingiu uma média de 80%; e para remoção de nitrogênio, o tratamento com três lâmpadas teve melhores resultados, chegando a 90% de remoção.

De maneira geral, a remoção de fósforo tendeu a ser maior nas últimas bateladas, com exceção das configurações 9 a 12, que tiveram uma queda significativa de remoção nas últimas repetições. Tal queda pode ser devido ao declínio do crescimento das microalgas evidenciado pela contagem de células. O crescimento das microalgas é influenciado pela quantidade de sólidos suspensos do efluente; o efluente de alimentação das configurações 9 a 12 teve um acréscimo significativo em sólidos suspensos, como demonstrado na Tabela 3. Tal aumento da concentração de sólidos suspensos pode ter sido fator limitante do crescimento das microalgas registrada nas últimas amostragens (CHOI; LEE, 2012; WANG et al., 2016).

A partir do coeficiente de correlação de Spearman, foi possível inferir que a concentração de sólidos suspensos está fortemente relacionada à concentração de células de microalgas, ou seja, um aumento da concentração de células de microalgas pode implicar em um aumento da concentração de sólidos suspensos.

A partir da análise de comparações múltiplas de Kruskal-Wallis, foi possível verificar que, apesar de os reatores inoculados com microalgas terem, de maneira geral, remoções maiores que o controle, só foi possível verificar diferença estatisticamente significativa para a remoção de fósforo entre o tratamento com microalgas e o controle nas configurações sem aeração, ou seja, nos tratamentos das configurações 6 a 13, não foi possível verificar diferença

estatística entre os resultados com microalgas e controle. Já para a remoção de nitrogênio, foi possível verificar diferenças estatísticas entre o tratamento com microalgas e o controle.

Na mesma linha, o fator aeração teve impactos significativos na remoção de fósforo como verificado na Tabela 66, e também na variabilidade e dispersão dos dados como analisado nas Tabelas 64 e 65. Porém, como discutido na seção de análise das configurações 3 e 4, o fator aeração não impactou nos resultados de remoção de fósforo obtidos pelo Controle.

O fator agitação magnética, como discutido ao longo da seção de análise das configurações 6 a 9 e 10 a 13, não teve impactos estatisticamente significativos para remoção de fósforo e nitrogênio.

A DBO e DQO, de maneira geral, apresentou queda ao longo dos ciclos em todas as configurações, chegando ao máximo de 92% de remoção na configuração 13 para DQO, e 99% de remoção de DBO nas configurações 10, 12 e 13. A remoção de DQO e de DBO tendeu a ser maior nos reatores inoculados com microalgas. O pH dos reatores não variaram muito entre si, sendo uma tendência o aumento da média de pH tanto nos reatores inoculados com microalgas quanto nos controles. Porém, a partir da configuração 8, a média de pH foi menor que os controles, chegando ao mínimo de 5,8 no reator R10.

Este trabalho verificou que as microalgas são capazes de remover nutrientes e material orgânico, visto que a média de remoção dos tratamentos com microalgas, na maioria dos casos, foi maior que os tratamentos sem. E também avaliado que, de maneira geral, um aumento da intensidade luminosa proporciona aumento da remoção de nutrientes.

Foi possível também avaliar o potencial de remoção de fósforo e nitrogênio utilizando efluente suíno com alta carga orgânica, e conseqüentemente uma biota diversa que pode contribuir para oxidação do material orgânico e de nutrientes. Kiran et al. (2014), autoclavou o efluente para remover a interferência de microrganismos e avaliar apenas a eficiência de remoção das microalgas. Desta forma, seria recomendada a desinfecção do efluente pré-inoculação das células de microalgas, para assim avaliar a remoção apenas das microalgas, bem como sua interferência no pH e produção de sólidos.

REFERÊNCIAS

ABDULSADA, Z. K. **Evaluation of microalgae for secondary and tertiary wastewater treatment**. 2014. Tese (Mestrado em ciência aplicada em engenharia ambiental) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade Carleton.

ANDRADE, M. R.; COSTA, J. A. V. Cultivo da microalga *Spirulina platensis* pirulina *platensis* em fontes alternativas de nutrientes. **Ciencias agrotecnicas**, v. 32, n. 5, p. 1551-1556, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10357: Águas – Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) – Métodos de refluxo aberto, refluxo fechado – Titulométrico e refluxo fechado – Colorimétrico**. 1988.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10664: Águas – Determinação de resíduo (sólidos) – Método gravimétrico**. Rio de Janeiro. 1989.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12620: Águas – Determinação de nitrato – Métodos do ácido cromotrópico e do ácido fenoldissulfônico**. Rio de Janeiro. 1992.

APHA. American Public Health Association. "Standard methods for examination of water and wastewater". 21. ed, Ney Work: APHA. 2005.

BRASIL (2010). Lei N° 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasil: Ministério do Meio Ambiente.

BRASIL (2013). Decreto n° 8.141 - Política Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB). Brasil: Ministério do meio ambiente.

BAZAUL, C.; ANDRES, G. **Nitrificación-Desnitrificación Via Nitrito En Reactores De Discos Rotatorios Bajo Dos Modalidades De Operación: Continua Y Secuenciada**. 2007. Tese (Doutor em ciência de recursos naturais) - UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA, 2007.

BRAGA, E. A. S. *et al.* Avaliação da biodegradabilidade das águas de lavagem provenientes da etapa de purificação do biodiesel produzido com óleo extraído das vísceras de tilápia. **Rega**, v. 9, n. 2, p. 35-40, 2012.

BURHENNE, N.; TISCHNER, R. Isolation and characterization of nitrite-reductase-deficient mutants of *Chlorella sorokiniana* (strain 211-8k). **Planta**, v. 211, ed. 3, p. 440-445, 2000.

CAI, T.; PARK, S. Y.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 19, n.19, p. 360 – 369, 2013.

CARDOSO, E.J.B.N.; ANDREOTE, F.D. Microbiologia do solo, 2ª. Edição, ESALQ: Piracicaba, 2016.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advance**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

CHOI, H.; LEE, S. Effects of Microalgae on the Removal of Nutrients from Wastewater: Various Concentrations of *Chlorella vulgaris*. **Environmental Engineering Research**, v. 17, 2012.

COHEN, J. Statistical power analysis. **Sage**, v. 1, n. 3, p. 98-101, 1992.

Cunha, J.P.A.R., Alves, G.S. e Reis, E.F. Efeito da temperatura nas características físico-químicas de soluções aquosas com adjuvantes de uso agrícola. **Planta Daninha**, v. 28, n. 3, p. 665-672, 2010.

DA SILVA, W. T. L. *et al.* Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Quimica Nova**, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012.

FACTOR, T. L. ; ARAÚJO, J.A.C.; VILELLA JUNIOR, L.V.E. Produção de pimentão em substratos e fertirrigação com efluente de biodigestor. **Engenharia agrícola e ambiental**, v. 12, n. 2, p. 143-149, 2008.

FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. **Introdução a estatística com R**. Alfenas: Unifal, 2020.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 13. ed., Nobel, 1990.

HELMER-MADHOK, C. *et al.* Deammonification in biofilm systems: population structure and function. **Water Science and Technology**, v. 46, ed. 3, p. 223-231, 2002.

HUSSAR, G.; PARADELA, A.L.; BASTOS, M.C.; REIS, T.K.B.; JONAS, T.C.; SERRA, W.; GOMES, J.P. Efeito do uso do efluente de reator anaeróbio compartimentado na fertirrigação da beterraba. **Engenharia ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 2, n. 1, p. 035-045, 2005.

IBGE – INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB - 2017**

JAIN, S. M. Open raceway-type culture ponds of Earthrise in California, U.S., 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Open-raceway-type-culture-ponds-of-Earthrise-in-California-US-Source_fig2_263160730. Acesso em: 15 mar. 2021.

KIRAN, B. *et al.* Cultivation of *Chlorella* sp. IM-01 in municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 326-330, 2014.

KONZEN, E. A., SIMPÓSIO GOIANO DE AVICULTURA E SIMPÓSIO GOIANO DE SUINOCULTURA - AVESUI CENTRO-OESTE, 7., 2005, Goiana. **Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola**, 2005.

LI, Y.; CHEN, Y.F.; CHEN, P.; MIN, M.; ZHOU, W.; MARTINEZ, B.; ZHU, J.; RUAN, R. Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 102, ed. 8, p. 5138-5144, 2011.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, Antonio C. P.. **Noções de probabilidade e estatística**. 5. ed. Edusp, 2002.

MARKOU, G., VANDAMME, D., MUYLEAERT, K. Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. **Water Research**, v. 65, n. 7, pp. 186–202, 2014.

MCKIGHT, P. E.; NAJAB, J. KRUSKAL-WALLIS TEST. **The Corsini Encyclopedia of Psychology**, 2010.

MEHNERT, D.U. Culturas celulares e suas aplicações em Microbiologia: Departamento de Microbiologia. Disponível em: https://www.ufrgs.br/labvir/material/contagem_celulas.pdf. Acesso em: 19 nov. 2020.

NARKTHON, S. **Nitrogen and phosphorus removal from piggery wastewater by green algae *Chlorella vulgaris***. 1996. Tese (M. Sc. thesis in Environmental Technology) - Faculty of Graduated Studies, Mahidol University, Bangkok, 1996.

OBAJA, D.; MACÉ, S.; COSTA, J.; SANS, C.; MATA-ALVAREZ, J. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor. **Bioresource Technology**, v. 87, ed. 1, p. 103–111, 2003.

OSTERTAGOVÁ, Eva; OSTERTAG, Oskar; KOVÁČ3, Jozef. Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test. **Applied Mechanics and Materials**, v. 611, p. 115-120, 2014.

PEREZ-GARCIA, O.; ESCALANTE, F.M.E.; BASHAN, L.E.; BASHAN, Y. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. **Water Research**, v. 45, ed. 1, p. 11-36, 2011.

RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. 1. ed. Oxford: Blackwell Science, p. 39, 2004.

RYAN, T.; JOINER, B.. Normal Probability Plots and Tests for Normality, Departamento de estatística, Universidade Estadual da Pensilvânia, 1976.

Silva, F. P., Botton, J. P., Souza, S. N. M. de, & Hachisuca, A. M. M. (2015). Parâmetros Físico-Químicos na Operação de Biodigestores para Suinocultura. **Revista Tecnológica**, 33-41.

SIRANEE, S.; PAKPAIN, P. Nutrient Recycling by *Chlorella vulgaris* from Septage Effluent of the Bangkok City, Thailand. **ScienceAsia**, n. 33, p. 293-299, 2007.

SOUSA, V. F. *et al.* Manejo da fertirrigação em fruteiras e hortaliças. *In*: SOUSA, V. F. *et al.* Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. 1. ed. Embrapa, 2011. v. 1, cap. 10, p. 319-337.

SU, Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. **Science of The Total Environment**, v. 762, 2021.

SUH, I. S.; LEE, C.G. Photobioreactor Engineering: Design and Performance. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, v. 8, n. 6, p. 313-321, 2003.

TREVISAN, E. Avaliação do pH em Cultivo de Microalga A *Chlorella vulgaris*. Encontro Internacional de Produção Científica, VIII., 2013, Maringá. Anais eletrônico: Cesumar, 2013. Disponível em: https://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/4399/1/Elias_Trevisan_2.pdf. Acesso em: 14 maio 2021.

USHA, M.T. *et al.* Removal of nutrients and organic pollution load from pulp and paper mill effluent by microalgae in outdoor open pond. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 856-860, 2016.

WANG, M. *et al.* Removal of nutrients from undiluted anaerobically treated piggery wastewater by improved microalgae. **Bioresource Technology**, v. 222, p. 130-138, 2016.

ZHOU, W.; WANG, J.; CHEN, P.; JI, C.; KANG, Q.; LU, B.; RUAN, R. Biomitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, 2017

ZOPPAS, F.M.; BERNARDES, A.M.; MENEGUZZI, A. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. **Engenharia Sanitário Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 29-42, 19 jan. 2022.

