

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

SAMARA BARBOSA DE ALMEIDA

**CAPACIDADE DEGRADATIVA DE FUNGOS FILAMENTOSOS INDÍGENAS NO
SORO DO LEITE EM MONOCULTIVOS E EM CO-CULTIVO COM MICROALGA**

Maceió
2024

SAMARA BARBOSA DE ALMEIDA

CAPACIDADE DEGRADATIVA DE FUNGOS FILAMENTOSOS INDÍGENAS NO SORO DO LEITE EM MONOCULTIVOS E EM CO-CULTIVO COM MICROALGA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva

Coorientadora: Msc. Josimayra Almeida Medeiros

Maceió
2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Elisângela Vilela dos Santos – CRB-4 – 2056

A447c Almeida, Samara Barbosa de.

Capacidade degradativa de fungos filamentosos indígenas no soro do leite em monocultivos e em co-cultivo com microalga / Samara Barbosa de Almeida. – 2024. 39 f.: il. color.

Orientador: Carlos Eduardo de Farias Silva.

Coorientadora: Josimayra Almeida Medeiros.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 34-39.

1. Tratamento de efluentes. 2. Tratamento biológico. 3. Indústria do leite. 4. Fungos filamentosos. I. Título.

CDU: 66.09 : 628.35

Folha de Aprovação

SAMARA BARBOSA DE ALMEIDA

Capacidade degradativa de fungos filamentosos indígenas no soro do leite em monocultivo e em co-cultivo com microalga

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS EDUARDO DE FARIAS SILVA**
Data: 25/03/2024 11:48:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **JOSIMAYRA ALMEIDA MEDEIROS**
Data: 27/03/2024 20:15:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: MSc. Josimayra Almeida Medeiros
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **RENATA MARIA ROSAS GARCIA ALMEIDA**
Data: 02/04/2024 11:25:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Renata Maria Rosas Garcia Almeida
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **SORAYA LIRA ALENCAR**
Data: 27/03/2024 08:03:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Soraya Lira Alencar
(Universidade Federal de Alagoas)

RESUMO

O soro do leite, um subproduto da produção de queijo, apresenta um desafio ambiental devido à sua grande produção e alta carga orgânica. Nesse contexto, a biorremediação surge como uma alternativa eficiente e de menor custo para tratar esse efluente em comparação com métodos tradicionais (químicos e físicos). A utilização de fungos indígenas, encontrados naturalmente no efluente estudado, traz diversas vantagens para o processo de remediação, visto que esses fungos já estão adaptados às condições e composição química do mesmo, aumentando a eficiência na degradação dos contaminantes. A utilização do consórcio fungo filamentoso e microalga tem sido amplamente estudada devido aos benefícios proporcionados por essa interação simbiótica que faz com que haja uma otimização na remoção de nutrientes e da matéria orgânica. Com base nisso, o objetivo desse estudo é avaliar a eficiência de diferentes espécies de fungos filamentosos indígenas tanto de forma individual como no co-cultivo com a microalga *Tetrademus obliquus* na remoção da carga poluidora presente no soro do leite, de maneira a adequá-lo aos padrões de lançamento determinados pelos órgãos ambientais, a fim de reduzir os danos gerados de modo econômico e sustentável. O tratamento avançado do soro do leite, com concentrações iniciais de $1176,32 \pm 8,91 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO, $49,4 \pm 2,47 \text{ mg.L}^{-1}$ de Nitrogênio total (NT) e $12,51 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ de fósforo total (FT), foi realizado em duas etapas sendo ambas realizadas em um reator do tipo coluna de bolhas, sob modo de operação em batelada e aeração constante (1.5 vvm). Na etapa inicial, cada coluna foi inoculada com uma cultura pura de um fungo filamentosos indígena selecionado, e em co-cultivo com a microalga, necessitando da adição de uma iluminação artificial constante ($100 \mu\text{mol f\u00f3tons/m}^2\text{s}$). Os resultados obtidos mostraram que a remoção de contaminantes é significativamente aprimorada quando os fungos e microalgas são cultivados em consórcio, destacando-se o co-cultivo de *Cladosporium haloterans* e *Tetrademus obliquus*, que alcançou uma eficiência notável com remoções de até 95,89% para DQO, 99,31% para FT e 88,39% para NT, enquanto o sistema formado pelo fungo sozinho alcançou percentuais de 74%, 84,31% e 72,24% para DQO, FT e NT, respectivamente. Desta forma, a utilização da associação fungo indígena-microalga potencializou a biorremediação, resultando em um efluente tratado e dentro dos padrões para o descarte ambientalmente seguro.

Palavras chaves: Tratamento biológico; Consórcio; Tratamento de efluente; Indústria do leite.

ABSTRACT

Whey, a byproduct of cheese production, poses an environmental challenge due to its large production and high organic load. In this context, bioremediation emerges as an efficient and cost-effective alternative to treat this effluent compared to traditional methods (chemical and physical). The use of indigenous fungi, naturally found in the studied effluent, brings several advantages to the remediation process, as these fungi are already adapted to its conditions and chemical composition, thus increasing efficiency in degrading contaminants. The use of filamentous fungi and microalgae consortium has been widely studied due to the benefits provided by this symbiotic interaction, which optimizes the removal of nutrients and organic matter. Based on this, the aim of this study is to evaluate the efficiency of different species of indigenous filamentous fungi both individually and in co-cultivation with the microalga *Tetrademus obliquus* in removing the pollutant load present in whey, in order to meet the discharge standards set by environmental agencies, aiming to reduce damages economically and sustainably. Advanced treatment of whey, with initial concentrations of 1176.32 ± 8.91 mg.L⁻¹ of Chemical Oxygen Demand (COD), 49.4 ± 2.47 mg.L⁻¹ of Total Nitrogen (TN), and 12.51 ± 0.03 mg.L⁻¹ of Total Phosphorus (TP), was carried out in two stages, both performed in a bubble column reactor, under batch operation mode and constant aeration (1.5 vvm). In the initial stage, each column was inoculated with a pure culture of a selected indigenous filamentous fungus, and in co-cultivation with the microalgae, requiring the addition of constant artificial illumination (100 μ mol photons/m²s). The results showed that contaminant removal is significantly enhanced when fungi and microalgae are cultivated in consortium, with the co-culture of *Cladosporium haloterans* and *Tetrademus obliquus* standing out, achieving remarkable efficiencies with removals of up to 95.89% for COD, 99.31% for TP, and 88.39% for TN, while the system formed by the fungus alone achieved percentages of 74%, 84.31%, and 72.24% for COD, TP, and TN, respectively. Thus, the use of indigenous fungus-microalgae association potentiated bioremediation, resulting in treated effluent within standards for environmentally safe disposal.

Keywords: Biological treatment; Consortium; Effluent treatment; Dairy industry.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	OBJETIVOS	6
2.1	GERAIS	6
2.2	ESPECÍFICOS	6
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	7
3.1	A INDÚSTRIA DO LEITE	7
3.2	PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO SORO DO LEITE	7
3.3	PROCESSOS DE TRATAMENTO BIOLÓGICOS DO SORO DO LEITE	8
3.4	MICROALGAS E FUNGOS FILAMENTOSOS	9
3.5	MICROALGAS E FUNGOS FILAMENTOSOS NO TRATAMENTO DO SORO DO LEITE	11
4	METODOLOGIA	13
4.1	EFLUENTE BRUTO	13
4.2	INÓCULO	14
4.3	SISTEMA DE TRATAMENTO	15
4.4	EXPERIMENTO	15
4.4.1	Etapa 1 - Tratamento do soro do leite com cultivos individuais de fungos filamentosos indígenas.	15
4.4.2	Etapa 2 - Biorremediação do soro do leite com consórcio de fungo filamentoso e microalga.	16
4.4.3	Etapa 3 - Tratamento do soro do leite com contaminantes exógenos	16
4.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	16
4.5.1	Peso seco celular	16
4.5.2	Demanda química de oxigênio – DQO	16
4.5.3	Nitrogênio Total	18
4.5.4	Fósforo total	18

4.5.5 Determinação do pH	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1 AVALIAÇÃO DO SISTEMAS DE TRATAMENTO NA REMOÇÃO DA CARGA POLUIDORA PELO CULTIVO INDIVIDUAL DE CADA ESPÉCIE DE FUNGOS FILAMENTOSO INDÍGENAS.	20
5.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMAS DE TRATAMENTO NA REMOÇÃO DA CARGA POLUIDORA PELO CONSÓRCIO COM A MICROALGA DE CADA ESPÉCIE DE FUNGOS FILAMENTOSO INDÍGENAS	24
5.3 PESO SECO CELULAR	27
5.4 pH	29
6 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A indústria láctea desempenha um papel crucial na economia global, proporcionando um alimento altamente nutritivo e amplamente consumido em todo o mundo. No cenário brasileiro, o país ocupa o quinto lugar como maior produtor mundial de leite, ficando atrás apenas da Índia, Estados Unidos, Paquistão e China (FAO, 2023). Apesar dessa posição de destaque, o setor enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à gestão eficiente dos subprodutos e à necessidade de garantir a sustentabilidade ambiental em suas operações (Sar et al., 2022).

Um dos principais subprodutos resultantes da produção de laticínios é o soro do leite, obtido principalmente por meio da coagulação do leite (ABIQ, 2022). Esse efluente líquido possui uma coloração amarelo-esverdeada, concentra elevados teores de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, possui pH entre 3,3 e 9, e a presença significativa de lactose e gordura contribui para a alta demanda química de oxigênio (DQO). O descarte inadequado desse resíduo pode levar à eutrofização de corpos d'água, causando danos à vida aquática e terrestre, portanto, torna-se imprescindível o tratamento adequado desse subproduto antes de qualquer descarte, visando mitigar seus impactos ambientais negativos (Keramati et al., 2021).

Alguns processos físico-químicos têm sido empregados no tratamento de efluentes lácteos, tais como precipitação química, coagulação, floculação, processo de membrana, adsorção e processos eletroquímicos (Ali, 2022). No entanto, esses métodos enfrentam uma desvantagem inerente devidos aos elevados custos operacionais associados ao uso de fontes externas, como por exemplo fontes ácidas ou agentes floculantes (Al-tayawi et al., 2023).

Nesse contexto, a biorremediação surge como solução viável para tratar esse tipo de efluente, pois apresenta alta eficiência e um custo operacional menor quando comparado aos métodos físico-químicos mencionados anteriormente. A biorremediação utiliza microrganismos vivos, como bactérias, fungos e microalgas, para remover, degradar ou transformar os contaminantes presentes, tornando-os menos tóxicos e permitindo um descarte correto do efluente (Negi; Das, 2023).

As microalgas são organismos fotossintéticos microscópicos com alto potencial para capturar CO₂ e produzir biomassa rica em proteínas, lipídios e carboidratos. Essas características as tornam uma opção atraente para o tratamento do soro do leite (Li et al., 2020; Wang et al., 2022). Os fungos filamentosos indígenas são microrganismos encontrados

naturalmente em ambientes específicos e desempenham papéis essenciais nos ecossistemas locais. Além disso, esses fungos possuem potencial para diversas atividades benéficas, como biodegradação, biolixiviação, biocompostagem, fixação de nitrogênio, melhoria da fertilidade do solo e produção de hormônios de crescimento vegetal (Akhtar; Mannan, 2020). Por todas essas razões, os fungos filamentosos indígenas podem ser aliados importantes na busca por soluções eficientes e ecologicamente responsáveis para a biorremediação do soro do leite.

A implementação de monocultivos e co-cultivos de microrganismos desempenha um papel crucial na otimização da eficiência da biorremediação. No monocultivo, um único tipo de microrganismo é cultivado em um ambiente controlado. Por outro lado, o co-cultivo envolve a interação de diferentes espécies em um sistema único, facilitando, por exemplo o cultivo fungo-microalga, a recuperação das células de microalgas. Nesse processo, os fungos associam-se a elas, formando corpos maiores e mais densos, o que simplifica sua remoção do meio de cultivo (D'Otaviano, 2018). Além disso, nessa dinâmica, os fungos filamentosos absorvem a matéria orgânica e fornecem dióxido de carbono para as microalgas, que, por sua vez, contribuem com oxigênio para os fungos filamentosos (Reis et al., 2018). Essa interação simbiótica beneficia ambos os microrganismos, resultando em maior eficiência no processo de biorremediação.

Neste contexto, esse trabalho tem por intuito avaliar a eficiência dos fungos filamentosos indígenas no tratamento terciário ou avançado de efluente do soro do leite, tanto em cultivos individuais quanto em co-cultivo com microalga. A proposta é reduzir os poluentes presentes no soro do leite, garantindo que o efluente atenda aos padrões de lançamento em corpos d'água. Importante mencionar que os fungos filamentosos utilizados nesse trabalho foram isolados dentro do próprio processo de tratamento quando a microalga foi inoculada sozinha no biorreator, e por isso, espera-se uma superioridade de adaptação e de eficiência do processo de tratamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a eficiência de diferentes espécies de fungos filamentosos indígenas tanto no cultivo individual como no co-cultivo com a microalga na remoção da carga poluidora durante tratamento terciário do soro do leite.

2.2 Específicos

- Avaliar a eficiência das espécies fúngicas no tratamento terciário de efluente soro do leite.
- Investigar a interação entre os fungos filamentosos indígenas e microalga no tratamento terciário de efluente soro do leite.
- Analisar a produção de biomassa durante o período de tratamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A indústria do leite

O leite e seus derivados são consumidos por mais de 6 bilhões de pessoas em todo o mundo, sendo o consumo de produtos lácteos maior em países desenvolvidos. Por outro lado, países em desenvolvimento preferem lácteos frescos ou pouco processados. Espera-se que o setor de laticínios seja o setor pecuário de mais rápida expansão na próxima década, com a oferta global de leite projetada para aumentar em 23%. Um exemplo desse crescimento é observado na Índia, que se tornou um dos principais produtores de leite, experimentando um aumento significativo desde a década de 1970. Estima-se que o país continue a crescer nesse setor, com uma projeção de crescimento de 14,8% até 2023 (FAO, 2023).

A cadeia produtiva do leite e seus derivados é crucial para a economia e sociedade brasileira, com o país sendo o terceiro maior produtor global de leite, alcançando mais de 34 bilhões de litros anualmente. Presente em 98% dos municípios, principalmente em pequenas e médias propriedades, gera empregos para cerca de 4 milhões de pessoas. Projeções indicam que os produtores mais eficientes, adaptados à tecnologia e eficiência, manterão sua posição até 2030. Iniciativas públicas e privadas estão sendo implementadas para beneficiar diversos segmentos da produção de leite (MAPA, 2024).

As indústrias de laticínios, entre as alimentícias, são as mais poluentes devido ao alto consumo de água e geração de efluentes líquidos. Esses efluentes, ricos em carga orgânica e nutrientes, são provenientes de processos como a fabricação de queijo, creme e manteiga, além da lavagem de equipamentos. A disposição inadequada desses resíduos pode resultar em sérios problemas ambientais. A necessidade urgente de abordagens sustentáveis e práticas de gestão ambiental destaca-se para mitigar os impactos negativos e fomentar práticas responsáveis na indústria de laticínios. (Custodio et al.,2022).

3.2 Produção e características do soro do leite

O soro do leite, originado durante a produção de queijos e outros derivados lácteos, representa a parte líquida resultante do processo de coagulação do leite para formar a coalhada, a qual é a porção sólida utilizada na fabricação de queijos. Sua coloração é amarelo-esverdeada, com sabor ácido ou doce, e a composição varia conforme a qualidade do leite utilizado e o tipo de queijo do qual se originou (MAPA, 2020).

Este soro constitui de 80 a 90% do volume total de leite empregado no processo, sendo uma fonte rica em nutrientes que contém aproximadamente 50% das proteínas solúveis, lactose, vitaminas e minerais presentes no leite. Com o aumento da produção em larga escala de queijos, o descarte inadequado desse resíduo se tornou um desafio ambiental, inicialmente negligenciado quanto às suas consequências. No entanto, ao longo do tempo, o soro passou a ser reconhecido como um valioso subproduto. Atualmente, diversos produtos derivados do soro são fabricados, incluindo bebidas lácteas, creme de soro, lactose, concentrado proteico de soro, soro fermentado e concentrado nutricional para alimentação de animais (Sar et al., 2022).

O soro é um resíduo considerado muito preocupante por sua elevada carga de matéria orgânica, principalmente a lactose e as proteínas. As concentrações da Demanda Química de Oxigênio (DQO) nesse efluente podem variar de 50 a 102 g.L⁻¹, já para Nitrogênio Total e Fósforo Total tem-se valores em torno de 1500 mg.L⁻¹ e 151,60 ± 0,174 mg.L⁻¹, respectivamente, podendo resultar em impactos ambientais acentuados se lançado diretamente no meio ambiente sem o devido tratamento (MAPA, 2020; Asunis, 2020).

3.3 Processos de Tratamento Biológico do Soro do Leite

Apesar de parte do soro do leite ser usada para outros processos ou alimentação animal, uma quantidade significativa ainda é descartada de maneira irregular, resultando em problemas ambientais, sendo assim um grande desafio para as indústrias de produtos lácteos, devido a leis cada vez mais rigorosas sobre seu descarte. Em geral, existem dois tipos principais de tratamento possíveis para esse efluente, o tratamento físico-químico, que envolve várias técnicas para reduzir a poluição e recuperar compostos de alto valor agregado, e o processo biológico, onde sua natureza econômica e ecológica os torna preferíveis (Usmani et al., 2022).

Existem muitos processos de tratamento biológico do soro de leite, incluindo métodos como a biossíntese de lactulose, hidrólise enzimática da lactose e fermentação aeróbica e anaeróbica. A biossíntese de lactulose consiste na quebra enzimática da lactose em glicose e galactose, podendo ser realizada através de hidrólise ou isomerização. Outro método é a hidrólise enzimática da lactose, onde enzimas ou ácidos são usados para quebrar a lactose presente no soro de leite (Paladii et al., 2021).

O tratamento biológico do soro do leite pode ser realizado de forma aeróbia ou anaeróbia, devido à alta relação entre DBO e DQO, indicando uma fácil biodegradabilidade do substrato. Inicialmente explorado na década de 1970, o tratamento aeróbio do soro do leite envolveu processos como lodo ativado e filtros de gotejamento. Posteriormente, a via anaeróbia emergiu como uma alternativa, especialmente para indústrias de menor porte. No entanto, a

digestão aeróbia enfrenta desafios devido à alta carga orgânica do soro do leite bruto, afetando a transferência de oxigênio e a sedimentação do lodo. A relação ideal entre carbono, nitrogênio e fósforo para processos aeróbios é de 100:5:1, enquanto para anaeróbios, o carbono é cinco vezes maior. (Prazeres; Carvalho; Rivas, 2012; Akansha et al., 2020).

3.4 Microalgas e Fungos Filamentosos

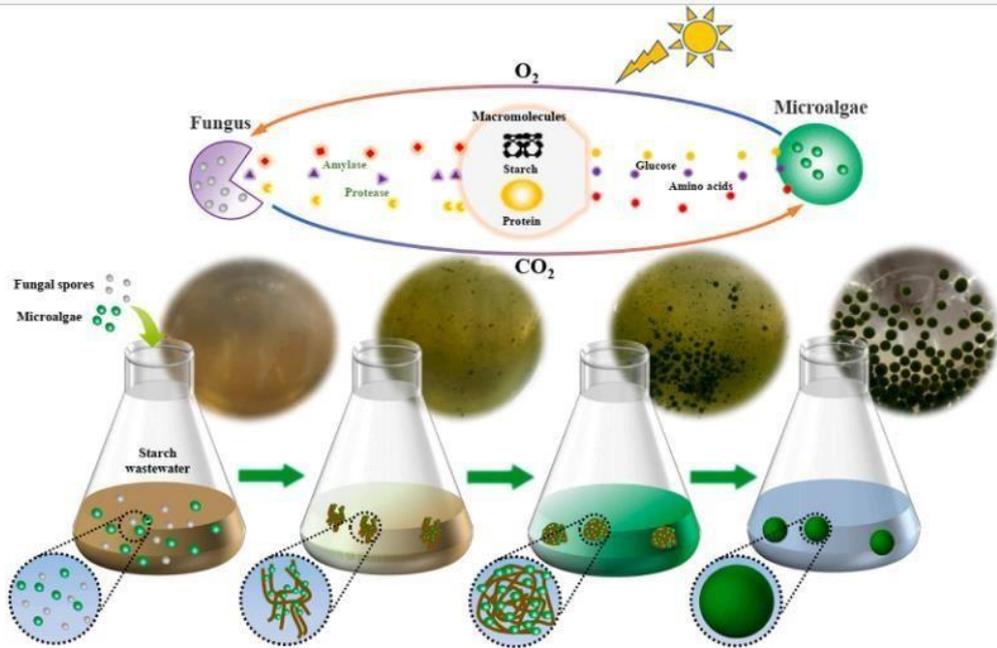
As microalgas desempenham um papel essencial no ecossistema aquático, sendo principalmente fotoautotróficas e contribuindo para a fixação de carbono e aumento da biomassa através da fotossíntese (Li et al., 2023). Reconhecidas por sua capacidade de acumular lipídios e diversidade de ácidos graxos, as microalgas têm diversas aplicações em bioprocessos e são importantes na absorção de dióxido de carbono atmosférico (Maltsev; Maltseva, 2021). Destaca-se entre elas a *Tetradismus obliquus*, uma microalga eficaz no tratamento de efluentes. Ela remove nutrientes como nitrogênio e fósforo de diversas fontes, além de reduzir a presença de poluentes orgânicos, como compostos voláteis e metais pesados. Sua capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais a torna uma escolha versátil para o tratamento de efluentes em várias regiões (Salazar et al., 2023).

Os fungos filamentosos indígenas são conhecidos por seus corpos de frutificação multicelulares, denominados hifas, que formam uma rede chamada micélio. Esses fungos desempenham um papel crucial no ecossistema, contribuindo para a decomposição, reciclagem de nutrientes e transformação de compostos inorgânicos em matéria orgânica. São essenciais tanto na natureza quanto na indústria, representando um grupo diversificado e relevante de organismos (Veiter et al., 2018). Entre eles, o gênero *Cladosporium* possui distribuição global e suas espécies são importantes na decomposição, além de serem encontradas em diversos habitats. *Neurospora* sp. é destacado pela sua capacidade de degradação de contaminantes, sendo considerado promissor para o tratamento de efluentes, enquanto *Penicillium gravinicasei* é reconhecido pela produção de metabólitos secundários bioativos com diversas aplicações ambientais (Freire et al, 2015; Luke; Burton, 2001; Akaniro et al., 2023; Anelli et al., 2018).

O co-cultivo de microalgas e fungos tem sido estudado para a colheita de biomassa, tratamento de efluentes e produção de biocombustíveis. Microalgas são eficazes na remoção de nutrientes em águas residuais, enquanto fungos contribuem com melhorias na produção de biomassa, eficiência do processo, através do consumo, principalmente de matéria orgânica, e redução de custos de cultivo. As microalgas removem nitrogênio, fósforo e íons metálicos, enquanto os fungos realizam remediação via biossorção e biotransformação. A relação entre

ambos permite a troca de oxigênio e dióxido de carbono, melhorando o crescimento das culturas e contribuindo para a eficácia do sistema (Chu et al., 2021; Wang et al., 2022). As interações mútuas envolvidas entre fungos e microalgas são expressas na Figura 1.

Figura 1- Interação entre fungo e microalga.



Fonte: Wang et al., 2022.

Yang, Li e Wang (2019) utilizaram o consórcio entre o fungo *Aspergillus sp.* e a microalga *Chlorella sp.* para tratar águas residuais de melação e obtiveram uma redução do teor inicial de nitrogênio e fósforo (NT: 407,5 mg.L⁻¹ ; FT: 30,4 mg.L⁻¹) para 134,11 mg.L⁻¹ e 3,35 mg.L⁻¹, respectivamente. Esses valores foram menores do que os proporcionados pelo tratamento com os monocultivos, nos quais o fungo atingiu 333,34 mg.L⁻¹ para NT e 17,50 mg.L⁻¹ para FT, enquanto o uso da microalga resultou em 226,61 mg.L⁻¹ de NT e 22,50 mg.L⁻¹ de FT.

No estudo de Zhao et al. (2019), pellets da microalga *Chlorella vulgaris* foram cultivados em conjunto com o fungo *Ganoderma lucidum* para purificar simultaneamente o chorume de biogás e o próprio biogás em uma planta de tratamento de águas residuais de uma fazenda de suínos (DQO: 1061,51 ± 26,23 mg.L⁻¹, NT : 182,64 ± 11,68 mg.L⁻¹ e FT: 17,96 ± 1,93 mg.L⁻¹). As condições otimizadas de cultivo dos pellets incluíram uma velocidade de agitação de 160 rpm, concentração inicial de inóculo de 1,0 × 10⁶ esporos.L⁻¹ para células microalgais, relação fungo/algas de 1:10 e relação meio misto/chorume de biogás simulado de 3:7, incubados sob uma intensidade de luz de 200 μmol.m⁻²s⁻¹. A co-cultura demonstrou

sucesso na purificação do chorume de biogás e na atualização do biogás. As eficiências de remoção de DQO, NT e FT foram de $92,17 \pm 5,28\%$, $89,83 \pm 4,36\%$ e $90,31 \pm 4,69\%$, respectivamente.

Shen e Chirwa (2020) investigaram a capacidade de adsorção de ouro por pellets formados através da biofloculação de microalgas e fungos, tanto vivos quanto liofilizados. O estudo empregou o fungo *Aspergillus niger* e a microalga *Tetrademus obliquus*, com os pellets sendo formados de acordo com as condições ótimas determinadas pelo método de Taguchi. Esses pellets foram então aplicados para remediar águas residuais contendo ouro (30 mg.L^{-1}) em um reator sequencial em batelada do tipo coluna, demonstrando alta especificidade e seletividade ao Au (III), com um percentual de adsorção de 97,77%.

3.5 Microalgas e Fungos Filamentosos no Tratamento do Soro do Leite

A literatura atual apresenta uma lacuna em relação a artigos que explorem a abordagem conjunta desses microrganismos para tratar o soro do leite. Por outro lado, existem estudos que se dedicam a analisar a remediação individual realizada por um gênero distinto desses microrganismos, fora do contexto de co-cultivo entre eles.

Djelal e Amrane (2013) testaram um consórcio de fungos filamentosos (*Aspergillus niger*, *Mucor hiemalis* e *Galactomyces geotrichum*) para tratar efluentes de laticínios (soro do leite sintético, água residual de laticínios sintética e uma real). O método de bioaumento foi aplicado em diferentes escalas (laboratorial, piloto e industrial), acelerando os fungos por pré-cultivo no soro de leite ou no efluente lácteo. Os resultados mostraram que o consumo da demanda química de oxigênio (DQO) aumentou de 55% (na ausência de fungos) para 75% (com o pré-cultivo), com concentração inicial variando entre 1500 e 2000 mg.L^{-1} , aumentando significativamente sua eficiência. Além disso, a adição dos fungos reduziu a DQO não biodegradável, resultando em uma menor relação DQO/DBO na saída do tanque biológico da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Estava na faixa de 451% a 1111% antes da adição do consórcio fúngico e na faixa de 257% a 153% após o bioaumento com os fungos.

Por meio da fermentação submersa (SmF), Ibarruri et al. (2019) investigaram a interação entre diversos parâmetros de cultivo (pH 4,75–7,75, concentração de glicose de 7,5–82,5 g.L^{-1} , concentração de nitrogênio de 0,75–3,75 g.L^{-1} e tempo de incubação de até 5 dias), utilizando cepas de *Rhizopus sp.*, visando valorizar subprodutos alimentícios, como melão de laranja e soro de leite. A otimização desses parâmetros resultou em uma alta produção de biomassa e proteína, com 11,9 g de biomassa. L^{-1} e 4,0 g de proteína. L^{-1} , contendo $43,1 \pm 0,1\%$ de aminoácidos essenciais, e uma redução na demanda química de oxigênio (DQO) de quase 50%.

Os experimentos com soro do leite demonstraram um consumo de glicose de $76,3\pm 1,1\%$ e uma produção de biomassa de $5,6\pm 2,2$ g/l, contendo $48,9\pm 5,1\%$ de aminoácidos essenciais.

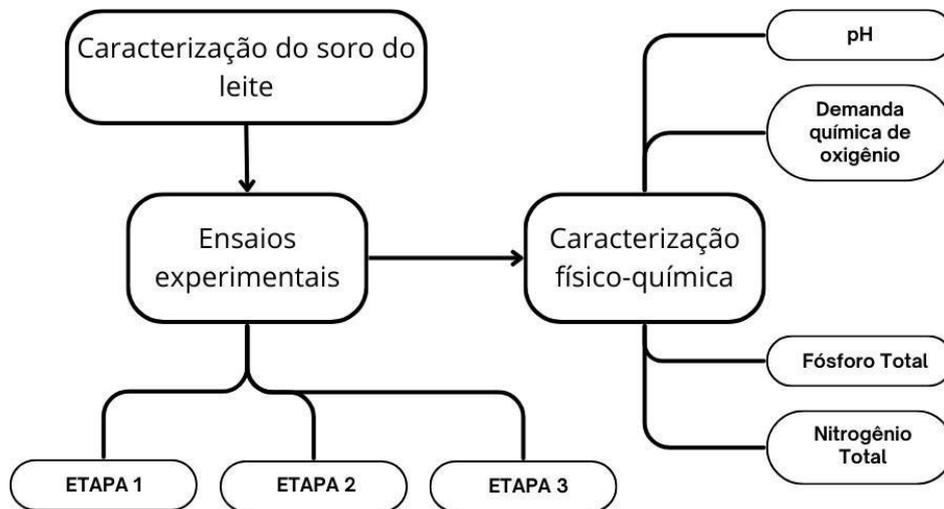
Paulenco et al. (2023) investigaram o tratamento de águas residuais lácteas utilizando a microalga *Nannochloris sp.* em cultura mixotrófica, utilizando soro de leite como fonte de carbono orgânico. O estudo envolveu a adição de soro de leite em diferentes quantidades ao meio de crescimento das microalgas, mantido a uma temperatura de 28°C e agitação constante por sete dias. Dois esquemas de iluminação LED foram aplicados para avaliar seu impacto no crescimento das microalgas e na acumulação de compostos bioativos: iluminação contínua versus ciclo dia-noite. A análise do meio de crescimento antes e após o cultivo permitiu determinar a redução dos teores de carbono, nitrogênio e fósforo (valores iniciais de 68.300 ± 3730 mg.L⁻¹, 280 ± 11 mg.L⁻¹ e 1228 ± 46 mg.L⁻¹, respectivamente). Os resultados demonstraram uma redução significativa da demanda química de oxigênio (até 96%), do nitrogênio (até 91%) e do fósforo (até 70%) após sete dias de cultivo.

No estudo conduzido por Casá et al. (2022), a produção em lote de *Chlorella vulgaris* foi avaliada quanto ao seu potencial de aproveitamento dos componentes nutricionais remanescentes do soro de queijo ricota. A microalga demonstrou capacidade de crescimento em todas as concentrações de soro testadas, resultando em uma concentração final de biomassa de $2,28$ g L⁻¹. O soro de queijo utilizado neste experimento apresentou uma demanda química de oxigênio (DQO) de 78000 ± 1000 mg O₂ L⁻¹, fosfato total (PT) de 320 ± 2 mg P L⁻¹ e nitrogênio total (NT) de 320 ± 5 mg N L⁻¹. Após a colheita da biomassa, os níveis de DQO no meio diminuíram para 58000 ± 1000 mg O₂ L⁻¹, PT para 80 ± 1 mg P L⁻¹ e NT para 144 ± 2 mg N L⁻¹. Consequentemente, foram calculadas eficiências de remoção de $26\pm 1\%$ para DQO, $75\pm 1\%$ para PT e $55\pm 1\%$ para NT após 96 horas da inoculação.

4 METODOLOGIA

A metodologia incluiu a adequação do efluente estudado, que consistia no soro do leite, a uma concentração de carga poluidora condizente com a etapa de tratamento avançado. Em etapas subsequentes, foram conduzidos os ensaios experimentais de forma sequencial, e as amostras coletadas diariamente. Em seguida, procedeu-se à sua caracterização, que envolveu a quantificação da carga poluidora por meio da determinação de parâmetros como a demanda química de oxigênio (DQO), o nitrogênio total (em mg N.L⁻¹) e o fósforo total (em mg P.L⁻¹), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma de processo das etapas realizadas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autora, 2024.

4.1 Efluente bruto

O soro do leite, que foi utilizado como base para os testes, foi obtido a partir da produção de queijo coalho em uma fábrica situada em Batalha – Alagoas, durante o mês de setembro de 2022 e passou por um tratamento primário (filtração e centrifugação), sendo armazenado sob congelamento a temperaturas entre -18°C e -12°C. Para o uso nesse trabalho, o efluente teve sua carga orgânica reduzida a níveis referenciado próprios para tratamento avançado, como em Souza (2021), que no pós-tratamento do efluente proveniente do processamento do soro de leite, tratado por um reator anaeróbio, utilizaram concentrações iniciais entre 1073-2180 mg.L⁻¹ , 29-190 mg.L⁻¹ , 6,3-117 mg.L⁻¹ para DQO, Nitrogênio Total e Fósforo Total respectivamente. A Tabela 1 apresenta a carga orgânica do soro do leite utilizado nesse trabalho.

Tabela 1 – Carga orgânica do soro do leite utilizado no tratamento avançado.

Parâmetro	Efluente do soro do leite
DQO (mg. L⁻¹)	1176,32 ± 8,91
Nitrogênio Total (mg N . L⁻¹)	49,40 ± 2,47
Fósforo Total (mg P. L⁻¹)	12,51 ± 0,03
pH	3,48± 0,17

Fonte: Autora, 2024

4.2 Inóculo

A espécie de microalga adotada foi a *Tetradismus obliquus* LCE-01, sendo seu cultivo realizado em meio sólido de ágar nutriente (Kasvi®) (RIPPKA et al., 1973). Em relação aos fungos filamentosos, foram empregadas cinco espécies distintas: *Cladosporium haloterans*, *Phythomyces sp.*, *Neurospora sp.*, *Lecanicillium sp.* e *Penicillium gravinicasei*. Esses fungos foram isolados durante o processo de tratamento do soro do leite pela microalga *Tetradismus obliquus* em um sistema aberto e, posteriormente, foram submetidos a um processo de isolamento e caracterização molecular conduzido por SANTOS, 2023. Eles foram mantidos em meio BDA (Batata Dextrose Ágar) como parte integrante do processo de cultivo e pesquisa. A microalga foi inoculada em torno de 50 mg.L⁻¹ e os fungos filamentosos de 10³ esporos.mL. A suspensão de esporos foi obtida por raspagem com alça de níquel e cromo da cultura crescida e esporulada com uma solução estéril de Triton 0,1% e os esporos contados em câmara de Neubauer. As microalgas foram inoculadas com alçadas (em torno de 5) da cultura crescida em placa. A figura 3 mostra o meio de cultivo para os microrganismos usados para a remediação do soro do leite.

Figura 3 - Meio de manutenção para microalga *Tetradismus obliquus* e para o fungo *Cladosporium haloterans*.



Fonte: Autora, 2024.

4.3 Sistema de tratamento

O sistema de tratamento utilizado era constituído de frascos vítreos cilíndricos Drechsel de 500 mL (60 mm de diâmetro externo), os quais simularam o comportamento de um reator coluna de bolhas, e receberam 400 mL de volume útil, com aeração contínua em cada reator (1,5 vvm). Quando necessário, o sistema contou com iluminação artificial (Plafon LED 25W 6500K) de forma constante e com intensidade de $100 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Sistema de tratamento.



Fonte: Autora, 2024.

4.4 Experimento

O desenvolvimento da parte experimental desse estudo foi realizado em 3 etapas: processo de tratamento com os fungos isoladamente, com o co-cultivo microalga-fungo e sem o fungo ou microalga para avaliação do processo como um controle, uma vez que o processo é não axênico.

4.4.1 Tratamento avançado do soro do leite com pelos fungos filamentosos

Nessa etapa, avaliou-se a eficiência dos fungos filamentosos em cultivo único e para isso, ocorreu a inoculação individual de cada fungo em reator tubular aerado. O processo de remediação se desenrolou durante um período de 7 dias (168 horas), sendo as amostras coletadas diariamente (a cada 24 horas).

4.4.2 Tratamento avançado do soro do leite pelo consórcio microalga-fungo

Nessa etapa, a hipótese que foi avaliada é que o consórcio entre a microalga e um fungo filamentosos demonstraria maior eficácia na remediação do efluente em comparação aos cultivos individuais. Cada reator recebeu a inoculação de um fungo filamentosos distinto, bem como da microalga *Tetradismus obliquus*. O período de operação se estendeu ao longo de 7 dias com coleta diária de amostras para análise (a cada 24 horas).

4.4.3 Tratamento avançado do soro do leite exposto apenas aos contaminantes exógenos (controle)

Por fim, para fins de comparação com as etapas anteriores, realizou-se o experimento nas mesmas condições, mas sem inocular os microrganismos, pois uma vez que o sistema não era axênico, havia a influência dos microrganismos exógenos (contaminantes naturais). O efluente do soro do leite foi submetido às mesmas condições das etapas anteriores nos biorreatores e recebeu a aeração necessária. O sistema operou por 7 dias, e amostras foram coletadas diariamente para análise (a cada 24 horas). Os resultados dessa etapa foram denominados de experimentos controle e incorporados aos resultados das etapas anteriores.

4.5 Caracterização físico-química

A metodologia consistiu na caracterização do efluente (soro do leite) utilizando os parâmetros de demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total e fósforo total. Após a coleta das amostras, elas foram submetidas a uma centrifugação a 3500 rpm por 30 minutos para separar a fase sólida (lodo microbiano) da fase líquida, onde os contaminantes foram medidos. Para a determinação da DQO, as amostras passaram por filtros de PES (polietersulfona) hidrofílico e de acetato de celulose de 0,45 e 0,22 μm , respectivamente, com o objetivo de eliminar eventuais sólidos que pudessem não ter sido removidos de forma eficiente durante a centrifugação e que pudessem afetar a análise.

4.5.1 Peso seco celular

Para determinar o peso seco celular, os sólidos resultantes da centrifugação das amostras são transferidos para cápsulas previamente taradas. As cápsulas com os sólidos serão secadas em estufa a 60°C por 2 horas (ou até peso constante), resfriadas em dessecador e pesadas novamente. O peso seco celular é calculado pela diferença entre a massa final da cápsula com

os sólidos e a massa inicial da cápsula (tara), dividido pelo volume da amostra tomado para análise.

$$\text{A fórmula é: Peso seco celular (PS)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{N}{V} \times 10^6 \quad (1)$$

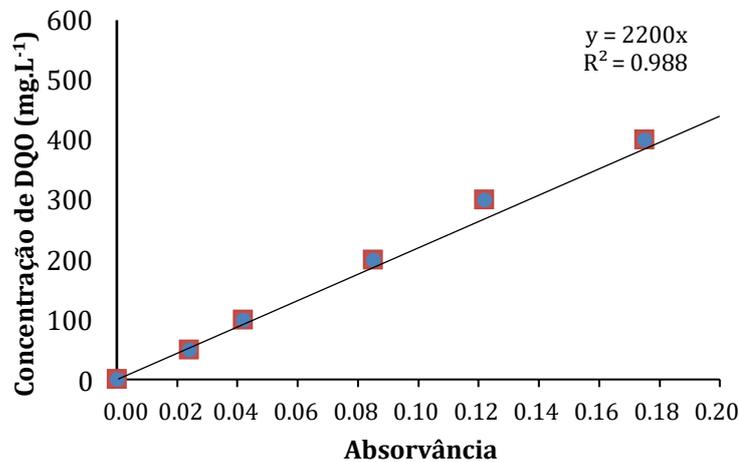
Onde: N = massa do resíduo seco (massa da cápsula como extrato seco menos a tara da cápsula) em g;

V = volume tomado da amostra, em mL.

4.5.2 Demanda química de oxigênio – DQO

Para determinar a Demanda Química de Oxigênio (DQO) pelo Método de digestão com dicromato, 2,5 mL das amostras são misturadas com 1,5 mL da solução de digestão contendo dicromato de potássio e sulfato de mercúrio, em seguida é adicionado 3,5 mL do reagente de ácido sulfúrico (sulfato de prata diluído em ácido sulfúrico) (AOAC, 2002). Em seguida, a mistura é aquecida em um bloco digestor a 150°C por 2 horas. Após a digestão, as amostras são resfriadas e submetidas a leituras de absorvância no espectrofotômetro (Shimadzu, UVmini 1240) a 600 nm. Os valores de absorvância obtidos são relacionados à concentração de DQO e expressos em mg O₂.L⁻¹.

Figura 5 - Curva padrão de DQO.



Fonte: Autora, 2024.

A fórmula utilizada é:

$$\text{DQO} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \text{Fator} \times \text{Abs} \times \text{Diluição} \quad (2)$$

Onde: Fator = Fator da curva padrão;

Abs = Valor da Absorvância obtida em espectrofotômetro;

Diluição = Diluição da amostra.

4.5.3 Nitrogênio Total

Para determinar o Nitrogênio Total pelo método de Kjeldahl, 5 mL das amostras são digeridas em tubos de Kjeldahl contendo 10 mL de ácido sulfúrico e 1g de mistura catalítica (sulfato de sódio, sulfato de cobre e dióxido de selênio na proporção 100:1:0,8), aquecendo-os até cerca de 310°C, em bloco digestor (TECNAL, modelo TE007 MP). Após a digestão, os tubos são resfriados, e é adicionada água destilada e fenolftaleína. Em seguida, os tubos são acoplados ao destilador de nitrogênio, e a amostra é destilada. O destilado é coletado em um erlenmeyer contendo ácido bórico e indicadores. O destilado é titulado com ácido clorídrico 0,001 N padronizado até o aparecimento da coloração rosada.

$$\text{Cálculo: Nitrogênio Total } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{V_{\text{HCl}} \times f \times N \times 14000}{V} \quad (3)$$

Onde: V_{HCl} = Volume gasto na titulação com ácido clorídrico;

f = Fator de correção da solução de ácido clorídrico;

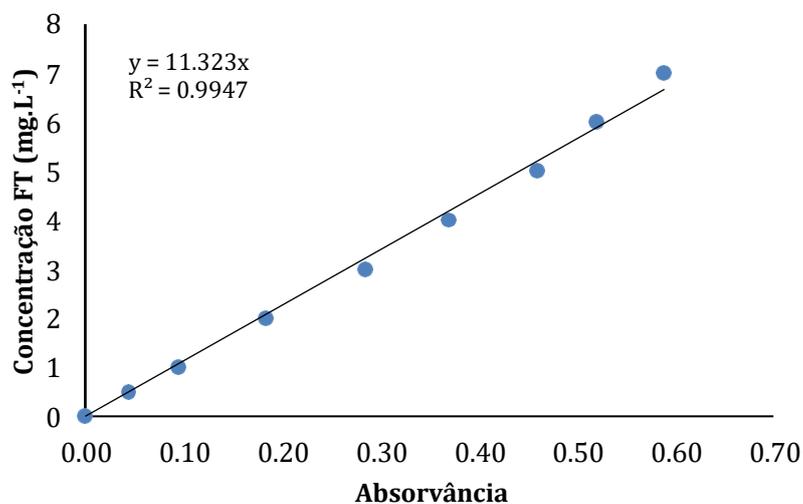
N = Normalidade ácido clorídrico;

V = Volume da amostra.

4.5.4 Fósforo total

Em tubos de ensaio foram adicionados 1 mL de água destilada, 1 mL da amostra previamente filtrada e 0,4 mL da solução desenvolvedora de cor, os tubos foram, então, tampados e foi esperado um período de 30 min, em seguida foram realizadas as leituras em espectrofotômetro a 706 nm (Shimadzu, UV-mini 1240).

Figura 6 - Curva padrão de fósforo total.



Fonte: Autora, 2024.

A fórmula utilizada é: Fósforo Total (PO_4^{3-}) $\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \text{fator} \times \text{Abs} \times \text{Diluição}$ (4)

Onde:

Fator = Fator da curva padrão;

Abs = valor de absorbância obtido no espectrofotômetro;

Diluição = Diluição da amostra.

A solução desenvolvedora de cor foi formada pela fração das soluções dada a seguir e possui estabilidade de 4 horas.

A = 0,5; B=0,05; C=0,15; D=0,3.

Solução A: ácido sulfúrico 5 N;

Solução B: tartarato misto de antimônio e potássio hemihidratato: 1,3715g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ para 500 mL de água;

Solução C: mobilidato de amônio: 20g de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em 500mL de água;

Solução D: ácido ascórbico 0,01M, 0,44g para 100 mL de água

4.5.5 Determinação do pH

Para a determinação de pH foi transferido uma alíquota da amostra para um Becker, e levado ao pHmetro previamente aferido (tampões pH 4,0 e pH 7,0), operando-o de acordo com as instruções do manual do fabricante (TECNAL).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, os resultados serão apresentados e discutidos, sendo inicialmente mostrados os obtidos a partir do uso dos fungos de forma isolada e em seguida, do consórcio com a microalga. Os experimentos de controle foram realizados e incorporados aos resultados das etapas precedentes.

5.1 Avaliação do sistema de tratamento avançado pelo cultivo fúngico

O soro do leite possuía uma concentração de $1176,32 \pm 8,91 \text{ mg.L}^{-1}$ para a demanda química de oxigênio, inicialmente. Durante o tratamento avançado com os fungos filamentosos, houve uma redução significativa da demanda química de oxigênio (DQO) no soro do leite conforme detalhado na Tabela 2. As diferenças nos percentuais de remoção estão relacionadas às variações metabólicas e à adaptação de cada microrganismo ao meio, conforme ilustrado na Figura 7. É crucial ressaltar que, em contraste com o sistema de controle, todos os fungos analisados apresentaram taxas de remoção superiores, enquanto o sistema de controle revelou uma concentração residual de DQO mais elevada.

Tabela 2 – Concentração de DQO residual e Percentual de Remoção pelos fungos filamentosos indígenas no cultivo individual e pelo sistema de controle.

Sistemas	Concentração residual de DQO (mg.L^{-1})	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i>	$305,80 \pm 1,1$	74
<i>Phythomyces sp.</i>	$550,00 \pm 0,1$	53,24
<i>Neurospora sp</i>	$255,20 \pm 1,1$	78,31
<i>Lecanicillium sp.</i>	$289,30 \pm 2,7$	75,41
<i>Penicillium gravinicasei</i>	$297,00 \pm 2,2$	74,75
Controle	$704,01 \pm 8,91$	40,15

A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para o DQO residual de 120 mg.L^{-1} .

Fonte: Autora, 2024.

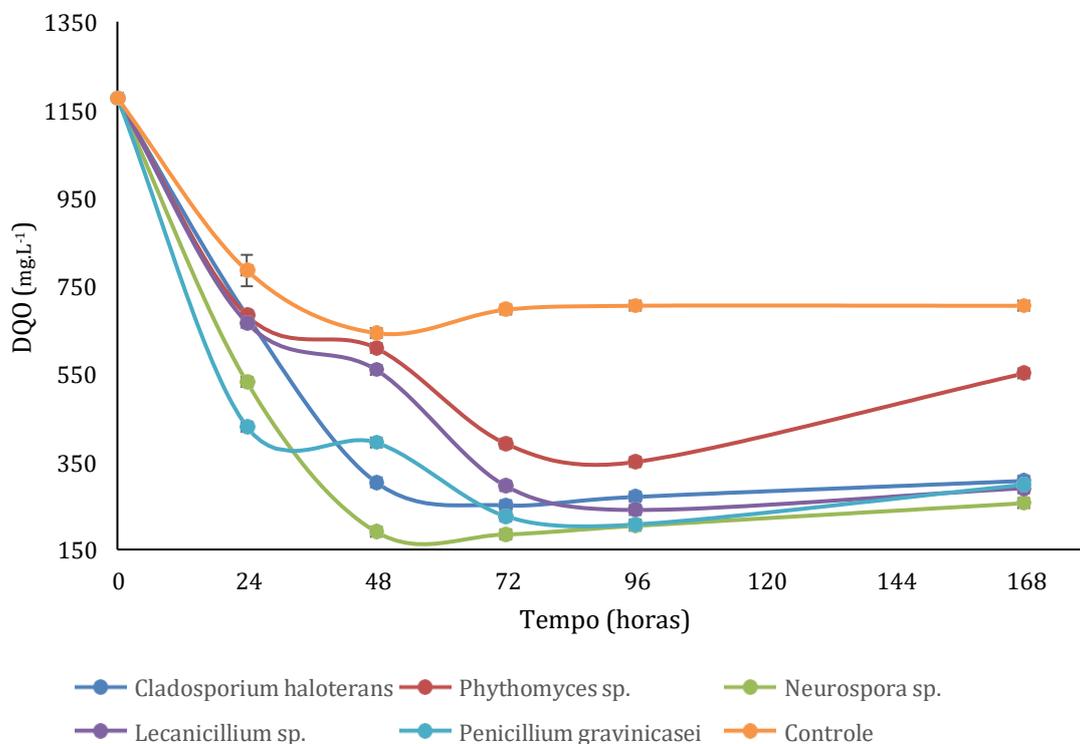
A maioria dos fungos filamentosos demonstra uma capacidade limitada de assimilação de lactose (Seiboth et al., 2007). No metabolismo fúngico, dois caminhos principais estão envolvidos no catabolismo da lactose. Um deles implica na secreção de β -galactosidase, que promove a hidrólise da lactose no meio extracelular. Os monômeros resultantes, glicose e galactose, são então transportados para dentro das células por permeases específicas. O segundo

caminho ocorre quando a lactose é internalizada por permeases específicas e é subsequentemente hidrolisada por β -galactosidase intracelularmente (Okamoto et al., 2019).

Diferente de outros fungos, os fungos filamentosos estudados foram isolados de um sistema de tratamento anterior que usava o mesmo efluente, soro do leite. Por isso, eles possuem uma boa capacidade de degradar esse composto e em razão disso é justificado as altas taxas de remoção apresentadas, com destaque para o *Neurospora sp* que demonstrou resultados superiores em comparação com os demais cultivos.

Esses resultados são coerentes com os apresentados por um estudo conduzido por Hashemi et al. (2022), sobre a valorização de vinhaça e soro de leite para a produção de proteína e biogás através de uma biorrefinaria utilizando o fungo *Neurospora intermedia*. Em que foi possível constatar uma remoção de 93,3% de DQO, partindo de valores iniciais no soro de leite de $47,1 \pm 2,1 \text{ g.L}^{-1}$. Ao analisar os resultados desse estudo e outras descobertas pertinentes, é evidente que a remoção de DQO por fungos, especialmente o *Neurospora sp*, representa uma estratégia promissora para o tratamento de efluentes e a valorização de resíduos industriais.

Figura 7 - Desempenho da remediação realizada pelo cultivo único dos fungos filamentosos da remoção de DQO presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

Para o fósforo total, as concentrações iniciais encontradas foram $12,51 \text{ mg.L}^{-1}$ as quais diminuíram significativamente após o tratamento com os fungos filamentosos, como ilustrado na Tabela 3. Esta redução substancial está diretamente relacionada às diferentes capacidades metabólicas de cada microrganismo, bem como à sua adaptação ao ambiente. Em comparação com o sistema controle, é possível perceber que, assim como para DQO, todos os fungos estudados apresentaram resultados superiores a ele, conforme evidenciado na Figura 8.

Tabela 3 – Concentração de FT residual e Percentual de Remoção pelos fungos filamentosos indígenas no cultivo individual e pelo sistema de controle.

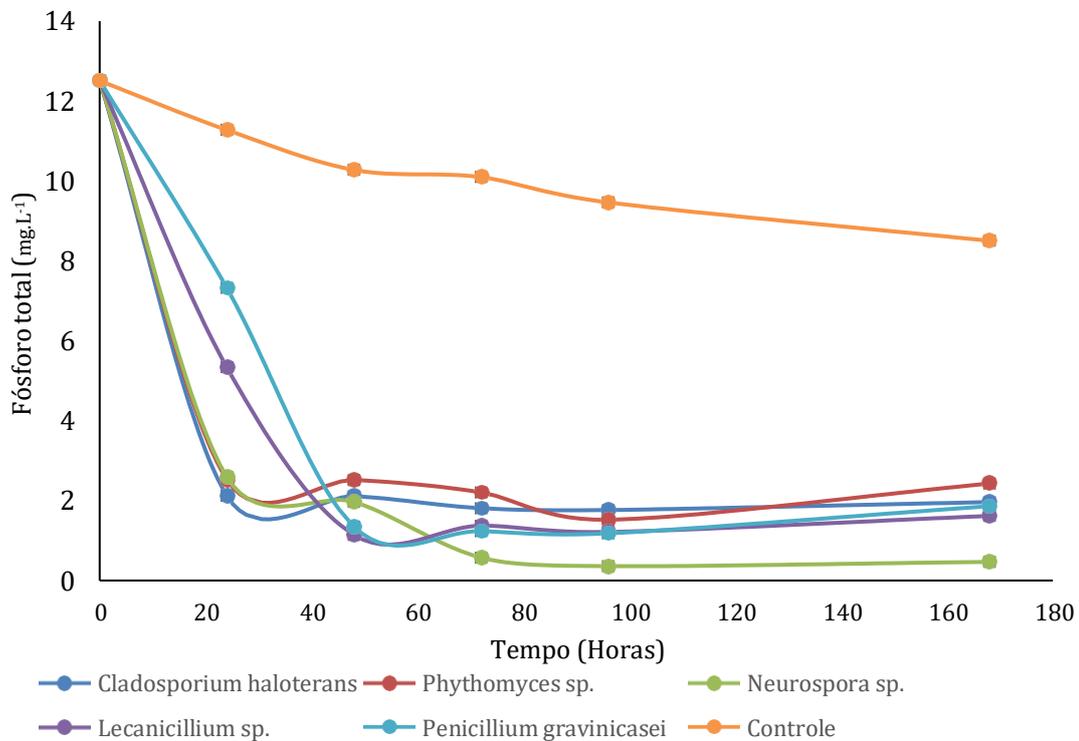
Sistemas	Concentração residual de FT (mg.L^{-1})	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i>	$1,97 \pm 0,01$	84,31
<i>Phythomyces sp.</i>	$2,43 \pm 0,01$	80,61
<i>Neurospora sp</i>	$0,47 \pm 0,01$	96,26
<i>Lecanicillium sp.</i>	$1,62 \pm 0,01$	87,07
<i>Penicillium gravinicasei</i>	$1,86 \pm 0,01$	85,12
Controle	$8,53 \pm 0,01$	32,01

A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para o FT residual de 2 mg.L^{-1} .

Fonte: Autora, 2024.

Devi et al. (2020) isolou e identificou fungos filamentosos solubilizadores de fosfato na região semiárida de Rajasthan, na Índia. Seis isolados fúngicos foram encontrados e identificados como pertencentes aos gêneros *Aspergillus spp.* e *Penicillium spp.* Em seguida, os isolados fúngicos com eficiência destacada na solubilização de fosfato foram selecionados com base em seu potencial em caldo contendo $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)$ insolúvel. Nesse estudo, observou-se que *Penicillium spp.* demonstrou a maior eficiência na solubilização do fósforo, reduzindo o pH do meio de cultura e indicando uma maior produção de ácidos orgânicos.

Figura 8 – Desempenho da remediação realizada pelo cultivo único dos fungos filamentosos da remoção de fósforo total presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

Com relação ao nitrogênio total, as concentrações iniciais encontradas no soro do leite forma de $49,33 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$, Ao empregar exclusivamente os fungos em tratamento individual, foram observados valores residuais e percentuais de remoção de nitrogênio para cada espécie fúngica, conforme destacado na Tabela 4. Uma comparação com os resultados do sistema controle revela uma maior eficácia na remoção de nitrogênio pelos fungos indígenas em comparação aos microrganismos exógenos, conforme ilustrado na Figura 9.

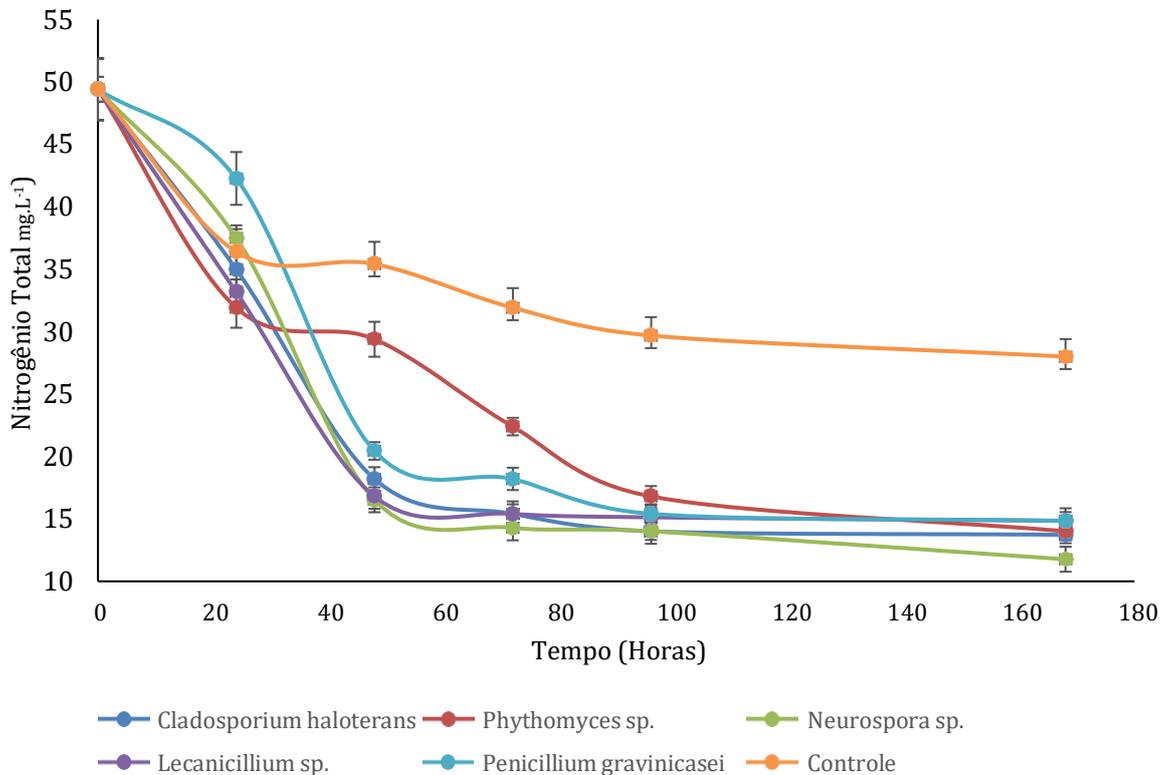
Tabela 4 – Concentração de NT residual e Percentual de Remoção pelos fungos filamentosos indígenas no cultivo individual e pelo sistema de controle.

Sistemas	Concentração residual de NT (mg.L^{-1})	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i>	$6,86 \pm 0,343$	72,24
<i>Phythomyces sp.</i>	$7,0 \pm 0,35$	71,67
<i>Neurospora sp</i>	$5,88 \pm 0,294$	76,2
<i>Lecanicillium sp.</i>	$7,42 \pm 0,371$	69,97
<i>Penicillium gravinicasei</i>	$7,42 \pm 0,371$	69,97
Controle	$27,99 \pm 1,4$	43,34

A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para NT de 15 mg.L^{-1} .

Fonte: Autora, 2024.

Figura 9 – Desempenho da remediação realizada pelo cultivo único dos fungos filamentosos da remoção de nitrogênio total presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

De forma análoga aos resultados obtidos na presente pesquisa, Correa et al. (2023) desenvolveram estudos utilizando como sistema de tratamento de efluentes lácteos um reator de leite estruturado com aeração intermitente e ações biológicas de fungos filamentosos do gênero *Trichoderma sp.* juntamente com fungos do gênero *Rhodotorula sp.* durante três fases distintas e sequenciadas. Os mesmos constataram remoções de NT na ordem de 79,50% na fase A (NT inicial de $32,2 \pm 5,9$ mg·L⁻¹), 72,54% na fase B (NT inicial de $56,8 \pm 15,5$ mg·L⁻¹) e redução para 43,23% na fase C (NT inicial de $56,9 \pm 8,0$ mg·L⁻¹) tendo em vista o alcance da fase de morte no crescimento microbiano do sistema e consequente redução das eficiências.

5.2 Avaliação do sistema de tratamento avançado pelo consórcio microalga-fungo

Para o sistema de consórcio microalga-fungo, foram obtidas concentrações residuais de DQO e os respectivos percentuais de remoção, detalhados quantitativamente na Tabela 5 e visualizados graficamente na Figura 10.

Tabela 5 – Concentração de DQO residual e Percentual de Remoção pelos co-cultivos *Tetrademus obliquus* (T.O.)-fungo filamentosos e pelo sistema de controle.

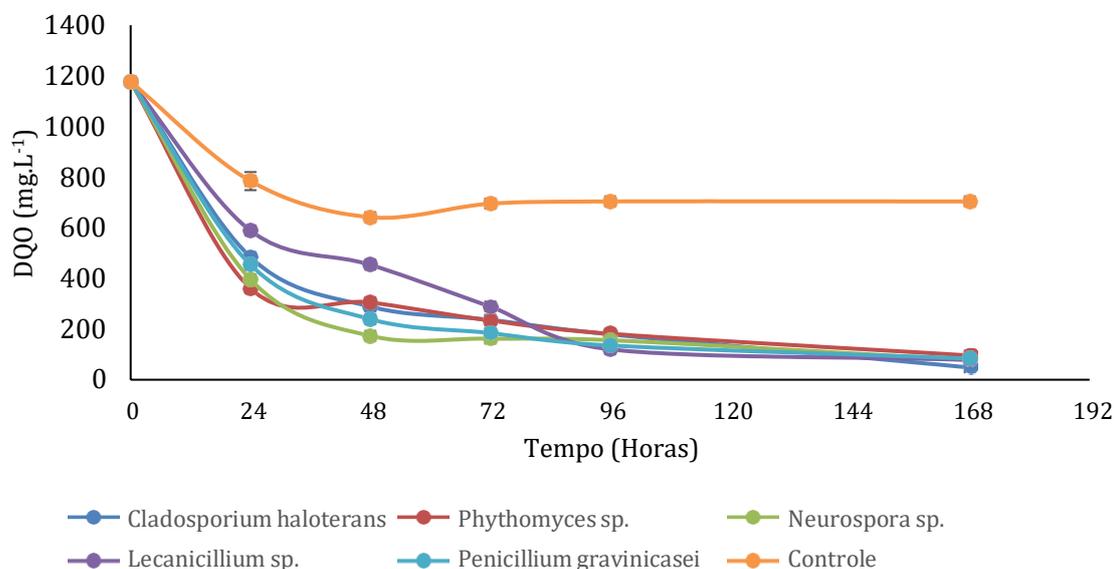
Sistemas	Concentração residual de DQO (mg.L⁻¹)	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i> + T.O.	48,40 ± 1,1	95,89
<i>Phythomyces sp.</i> + T.O.	95,7 ± 1,7	91,86
<i>Neurospora sp.</i> + T.O.	78,10 ± 1,65	93,36
<i>Lecanicillium sp.</i> + T.O.	78,1 ± 1,65	93,36
<i>Penicillium gravinicasei</i> + T.O.	83,60 ± 0,0	92,85
Controle	704,01 ± 8,91	40,15%

A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para o DQO residual de 120 mg.L⁻¹.

Fonte: Autora, 2024.

Os resultados obtidos pelo consórcio microalga-fungo apresentaram uma significativa superioridade em comparação com os sistemas de cultivo único dos fungos e controle. Essa maior remoção, quando comparado ao comportamento do sistema formado somente pelo fungo, está relacionada ao comportamento sinérgico entre esses dois microrganismos que permite um maior crescimento da biomassa deles tornando o sistema de tratamento mais efetivo. Diversos estudos têm investigado a co-cultura de microalgas com fungos e seu papel simbiótico na biorremediação de águas residuais. A interação entre microalgas e fungos é caracterizada pela produção de O₂ pelas microalgas para a síntese de biomassa. Posteriormente, os fungos utilizam o O₂ para a respiração celular, resultando na decomposição da matéria orgânica e na liberação de CO₂ necessário para a fotossíntese microalgal, além da atuação de enzimas extracelulares liberadas pelos fungos que permitem que as microalgas acessem uma quantidade maior de poluentes na forma de moléculas menores e solúveis, facilitando a assimilação (Leng et al., 2021).

Figura 10- Desempenho da remediação realizada pelo consorcio da microalga *Tetrademus obliquus* com os fungos filamentosos na remoção de DQO presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

Para o fósforo total, A Tabela 6 apresenta as concentrações residuais e os respectivos percentuais de remoção para diferentes microrganismos do consórcio *Tetrademus obliquus*-fungo. Esses dados complementam a análise visual oferecida na Figura 11, oferecendo uma visão abrangente do desempenho de cada organismo no processo de remediação.

Tabela 6 – Concentração de FT residual e Percentual de Remoção pelos co-cultivos *Tetrademus obliquus*(T.O.)-fungo filamentosos e pelo sistema de controle.

Sistemas	Concentração residual de FT (mg.L ⁻¹)	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i> + T.O.	0,09 ± 0,0	99,31
<i>Phythomyces sp.</i> + T.O.	0,72 ± 0,1	94,23
<i>Neurospora sp.</i> + T.O.	0,31 ± 0,0	97,52
<i>Lecanicillium sp.</i> + T.O.	0,62 ± 0,01	95,04
<i>Penicillium gravinicasei</i> + T.O.	0,12 ± 0,01	99,06
Controle	8,53 ± 0,01	32,01

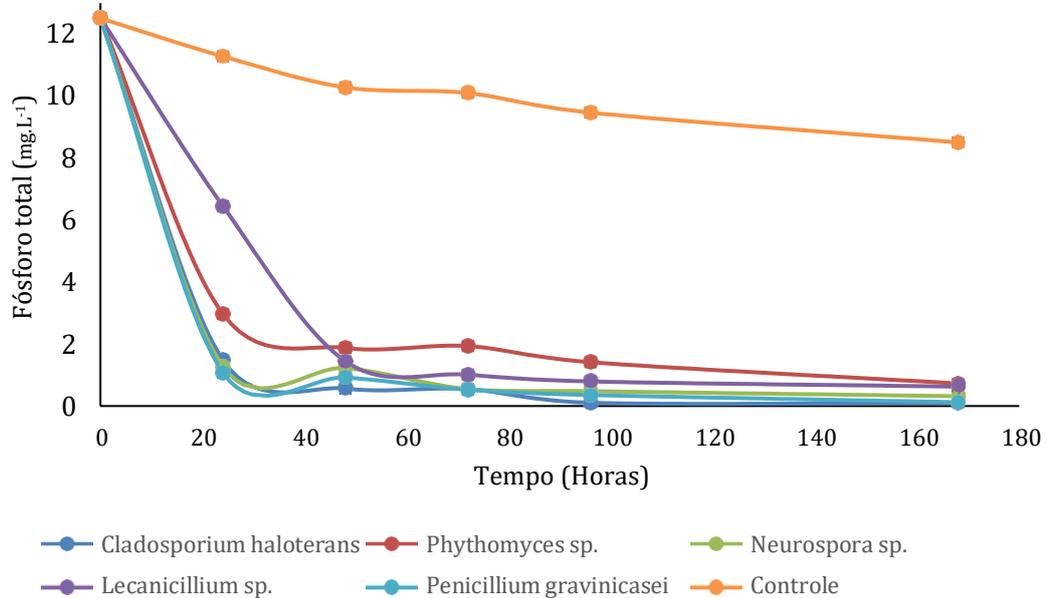
A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para o FT residual de 2 mg.L⁻¹.

Fonte: Autora, 2024.

Quando comparada, a simbiose do fungo *Neurospora sp* com a *Tetrademus obliquus* alcançou teores de remoção muito próximos tanto no consórcio quanto no cultivo individual do próprio fungo. Entretanto, para os demais casos a utilização do consórcio resultou em um melhor resultado dentre os sistemas analisados, visto que o fósforo é um macronutriente essencial para promover o crescimento e divisão celular da microalga e é importante para a

produção de componentes celulares como ATP que é necessário para a conversão do fósforo em polifosfato (Yaakob et al., 2021).

Figura 11 - Desempenho da remediação realizada pelo consórcio da microalga *Tetrademus obliquus* com os fungos filamentosos na remoção de fósforo total presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

Os dados referentes aos valores residuais de nitrogênio e os percentuais de remoção para cada microrganismo do consórcio *Tetrademus obliquus* - fungo são detalhados na Tabela 7 e visualizados graficamente na Figura 12.

Tabela 7 – Concentração de NT residual e Percentual de Remoção pelos co-cultivos *Tetrademus obliquus*(T.O.)-fungo filamentosos e pelo sistema de controle.

Sistemas	Concentração residual de NT (mg.L ⁻¹)	Percentual de Remoção (%)
<i>Cladosporium haloterans</i> + T.O.	2,87 ± 0,143	88,39
<i>Phythomyces sp.</i> + T.O.	3,5 ± 0,175	85,84
<i>Neurospora sp.</i> + T.O.	2,87 ± 0,143	88,39
<i>Lecanicillium sp.</i> + T.O.	3,15 ± 0,157	87,25
<i>Penicillium gravinicasei</i> + T.O.	3,29 ± 0,164	86,69
Controle	27,99 ± 1,4	43,34

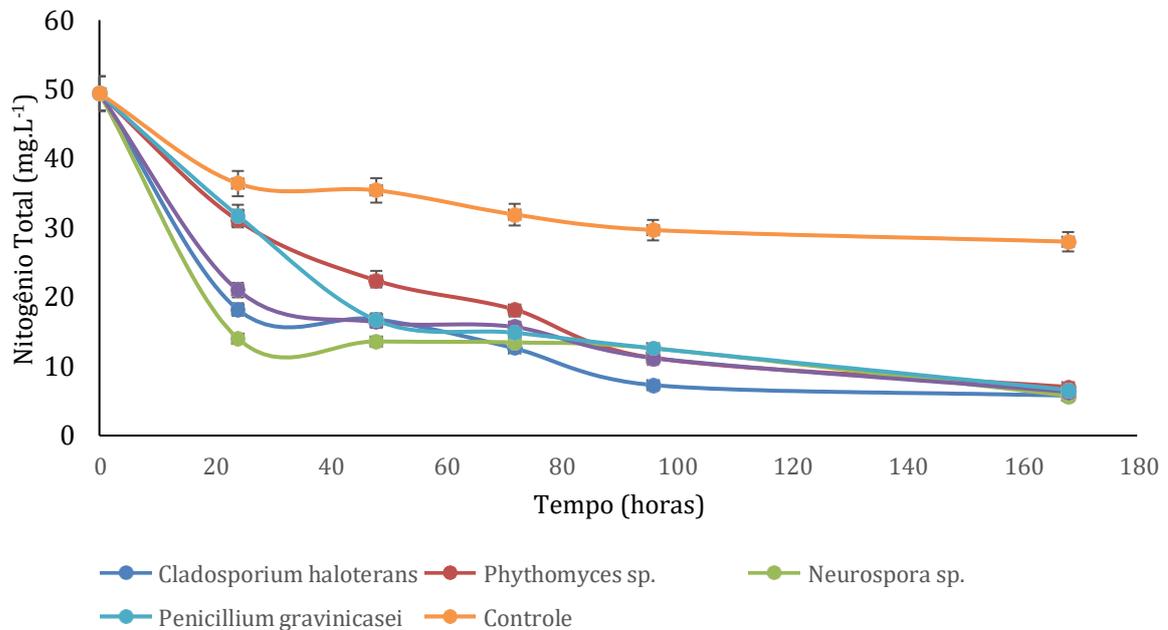
A Diretiva 91/271/CE estabelece o limite máximo permitido para NT de 15 mg.L⁻¹.

Fonte: Autora, 2024.

O nitrogênio desempenha um papel crucial na produção de biomassa (Casá, 2022), e sua remoção no soro do leite pelo consórcio é eficaz devido à interação entre as enzimas

fúngicas e a capacidade de metabolização da microalga. Isso destaca a importância da promoção do crescimento da microalga para uma remoção eficiente do nitrogênio.

Figura 12 - Desempenho da remediação realizada pelo consórcio da microalga *Tetradismus obliquus* com os fungos filamentosos na remoção de nitrogênio total presente no soro do leite.



Fonte: Autora, 2024.

Os resultados da caracterização físico-química revelam que a adição de fungos ao soro do leite promoveu uma melhoria na remoção de nutrientes em comparação com os microrganismos exógenos (sistema de controle). No entanto, é crucial ressaltar que a adição da microalga, formando o consórcio, resultou em uma melhoria ainda mais significativa do que a observada com os fungos isoladamente. As vantagens sinérgicas das duas espécies foram claramente evidenciadas, graças à forte capacidade de secreção enzimática e à excelente capacidade das células fúngicas de se ligarem às células da microalga. Além disso, a notável capacidade de assimilação de substrato das células da microalga contribuiu significativamente para a melhoria da eficiência na recuperação de nutrientes no soro do leite (Wang, 2022). De forma geral, podemos destacar o consórcio formado pela *Tetradismus obliquus* e o *Cladosporium haloterans* que, comparado aos demais, apresentaram as menores concentrações residuais para todos os poluentes estudados.

Assim como nesse estudo, outras pesquisas que utilizaram o consórcio microalga-fungo também alcançaram resultados expressivos na remoção de DQO, NT e FT. Como em Manechote et al. (2023), que utilizaram o consórcio entre a microalga *Scenedesmus* sp. e o fungo *Aspergillus tubingensis* TSIP9, em forma de pellets revestidos com quitosana, no

tratamento de efluentes secundários estéreis (DQO: 3933 – 4917 mg.L⁻¹; NT: 728-218,4 mg.L⁻¹; FT:15,1-50,1 mg.L⁻¹) e obtiveram percentuais de remoção de até 98,5%, 90,2% e 79,5% para DQO, NT e FT, respectivamente. Ainda, em Shi et al. (2023) os autores utilizaram o consórcio entre a microalga *Chlorella sp.* DT025 e um novo fungo *Penicillium sp.* AHP141 para realizar o tratamento de águas residuais de matadouro (DQO: 5390, 76 mg.L⁻¹; NT: 250 mg.L⁻¹; FT: 110 mg.L⁻¹) e após um período de detenção hidráulica de 5 dias alcançaram percentuais de remoção de 82,62% para DQO, 93,27% para NT e 44,91% para FT.

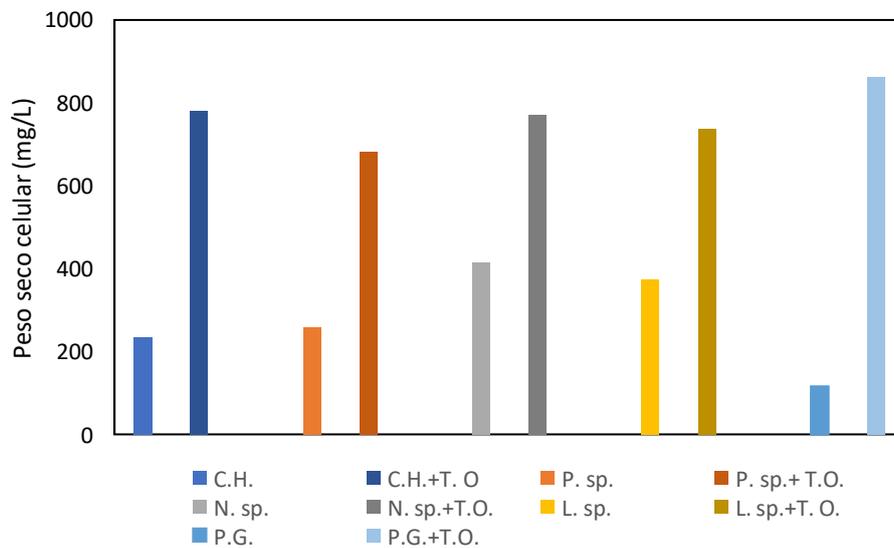
Em se tratando de adequação do efluente tratado as regulamentações ambientais, temos que de acordo com a Diretiva 91/271/CE (UNIÃO EUROPEIA, 1991) os índices máximos permitidos de lançamento de efluentes com teores de DQO, NT e FT são de 125 mg.L⁻¹, 15 mg.L⁻¹ e 2 mg.L⁻¹, respectivamente. Ao comparar esses padrões de lançamento com os resultados obtidos neste estudo, observa-se que o co-cultivo está em plena conformidade com esses padrões regulatórios para todos os poluentes estudados, mostrando sua eficácia na remoção da DQO e demais nutrientes.

5.3 Peso seco celular

Após análise dos resultados, é possível perceber que a biomassa produzida pelos fungos isolados foi significativamente menor em comparação com a obtida pela simbiose (Figura 13). Por exemplo, no caso de *Penicillium gravinicasei*, a biomassa do consórcio foi de 861,764 mg.L⁻¹, enquanto a biomassa produzida somente pelo fungo foi de apenas 116,129 mg.L⁻¹. Observa-se que, *Penicillium gravinicasei* foi o fungo que menos produziu biomassa entre os fungos, porém apresentou a maior quantidade de biomassa em consórcio. Esses resultados ressaltam a importância da interação simbiótica na promoção do crescimento microbiano e destacam o potencial da simbiose na produção de biomassa.

Este fenômeno encontra respaldo na pesquisa conduzida por Salvatori et al. (2023), na qual foi examinada a associação entre o fungo *Penicillium citrinum* e a microalga *Galdieria sulphuraria* em culturas heterotróficas. Os estudiosos observaram que ambos os organismos prosperam em maior medida quando estão em coabitação, em comparação com culturas separadas. Além disso, perceberam um incremento na densidade celular e no tamanho das células da microalga em co-culturas. Análises metabólicas revelaram uma diversidade mais abrangente de metabólitos extracelulares nas co-culturas, diferenciando-se de modo significativo das culturas puras de cada organismo.

Figura 13 - Produção máxima de biomassa obtida após 168 horas de tempo de detenção hidráulica.

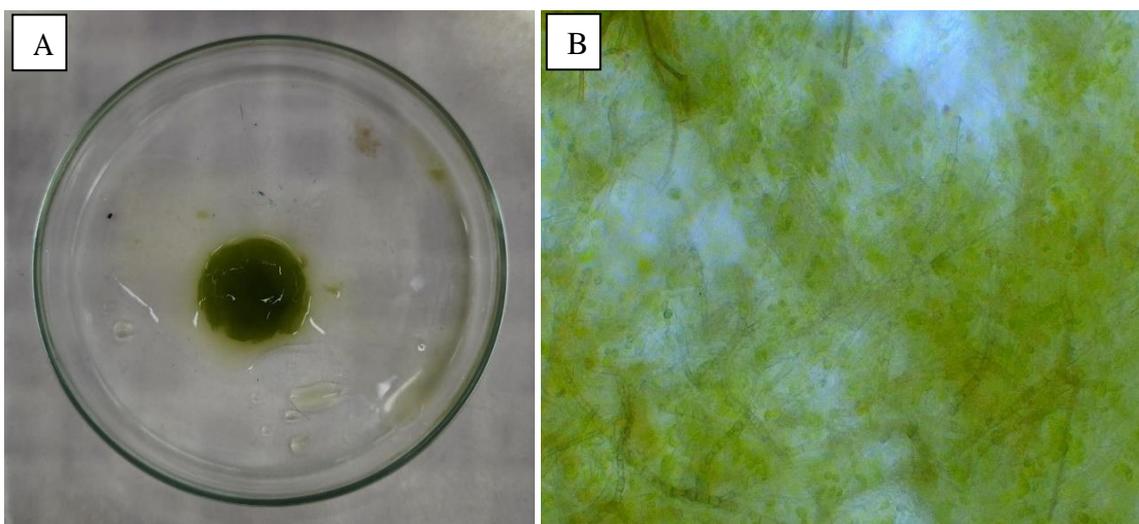


C.H – *Cladosporium halotolerans*, N. sp. – *Neurospora* sp. P.G. – *Penicillium gravinicasae*, P. sp. – *Phytomyces* sp., L. sp. – *Lecanicillium* sp. e T.O. – *Tetradesmus obliquus*.

Fonte: Autora, 2024.

Ainda, é possível perceber que ao promover o co-cultivo entre a microalga *Tetradesmus obliquus* e os fungos, além de se ter um crescimento expressivo de ambos, também ocorre a captura da microalga pelos micélios fúngicos que são formados e se aglomeram formando pellets, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Pellets formados a partir da biomassa microalga-fungo(A) e sua visão microscópica de 100x (B).

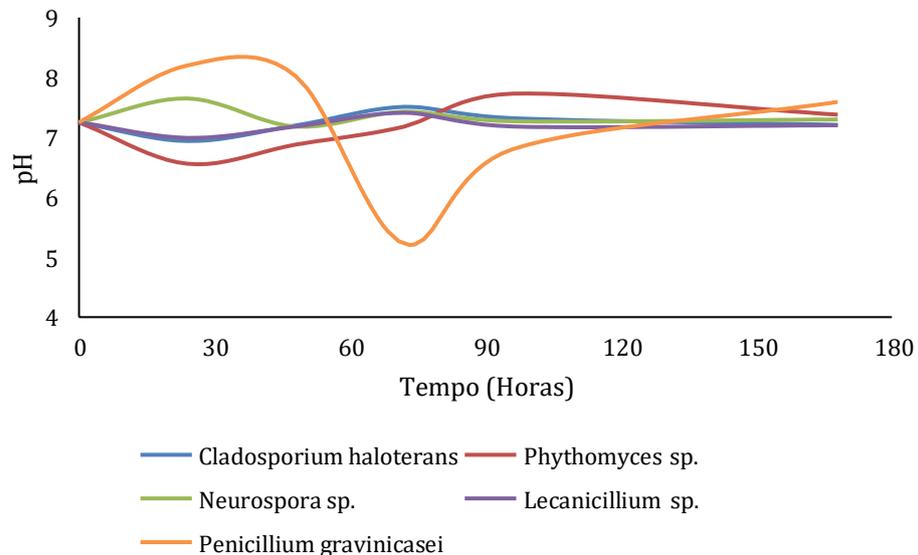


Fonte: Autora, 2024.

5.4 pH

O pH é crucial para o crescimento de microalgas e fungos filamentosos. Microalgas preferem pH entre 6,5 e 9,0, enquanto fungos filamentosos prosperam em pH entre 5,0 e 7,0. (Mustafa et al., 2024; Yuan et al., 2019). Ao analisamos a figura 15, podemos perceber que durante as fases iniciais de crescimento, o *Penicillium gravinicasei* utiliza o nitrogênio disponível no meio, convertendo-o em amônia como subproduto, o que resulta no aumento do pH do ambiente. Entretanto, à medida que o fungo se desenvolve, a amônia presente no meio é gradualmente consumida. Esse esgotamento de amônia desencadeia uma mudança metabólica no fungo, levando à produção de ácidos como ácido lático e acético, o que gradualmente acidifica o ambiente ao longo do tempo (Aldarf; Amrane; Prigent, 2002).

Figura 15 - Comportamento do pH do meio na remediação utilizando os fungos.

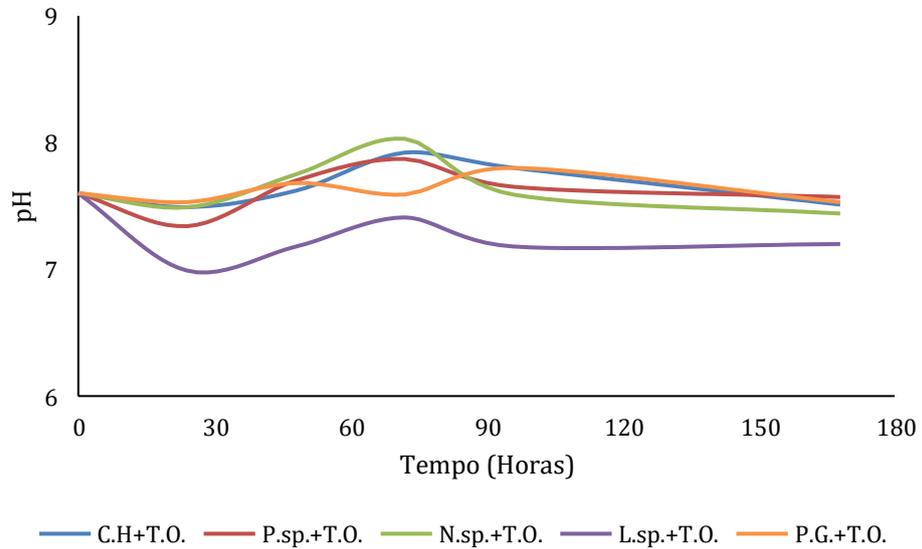


Fonte: Autora, 2024.

No contexto deste estudo, o pH inicial do soro do leite foi registrado em 3,5, antes de ser ajustado para 7,6. É interessante observar que as microalgas têm uma tendência a elevar o pH, enquanto os fungos tendem a reduzi-lo. Antes da imobilização, o pH apresentou flutuações, no entanto, após a imobilização das microalgas nos fungos, permaneceu estável até o término do tratamento (Figura 16), conforme ressaltado por Talukdar e Barzee (2023). No estudo conduzido por eles, as células de microalgas *Haematococcus pluvialis* foram colhidas e imobilizadas de forma simultânea na matriz de hifas da cepa fúngica *Aspergillus awamori*. Além disso, os pesquisadores confirmaram a estabilidade do pH depois do processo de imobilização das microalgas pelos fungos. Esse achado é fundamental, pois a manutenção do

pH estável é crucial para garantir um ambiente propício para o crescimento e metabolismo das microalgas.

Figura 16 - Controle de pH do consórcio fungos-microalga.



C.H – *Cladosporium halotolerans*, N. sp. – *Neurospora* sp. P.G. – *Penicillium gravinicasae*, P. sp. – *Phytomyces* sp., L. sp. – *Lecanicillium* sp. e T.O. – *Tetrademus obliquus*.

Fonte: Autora, 2024.

Como é possível observar os sistemas iniciaram em pH próximos e ao final do tratamento os valores se assemelham e ficam entre 7 e 8. De acordo a Resolução CONAMA 430/2011 o pH deve estar entre 5,0 e 9,0 para que possa ser feito o lançamento do efluente nos corpos hídricos, desse modo, o tratamento utilizando tanto pelos fungos quanto o consórcio se mostraram eficazes sem necessidade de recorrer a ajustes posteriores para controle desse parâmetro.

6 CONCLUSÕES

Com o estudo realizado, foi possível observar a capacidade de adaptação e eficiência de remediação dos fungos indígenas no tratamento avançado do soro do leite, principalmente quando em consórcio com a microalga. Ressalta-se que o co-cultivo da microalga com qualquer um dos fungos avaliados resultou em um efluente tratado que se adequava aos limites de lançamento dos órgãos ambientais, em especial a legislação Europeia, destacando-se o consórcio formado por *Tetrademus obliquus* e o *Cladosporium haloterans*, que apresentou as menores concentrações residuais para todos os contaminantes estudados.

Ainda, a cooperação entre microalga e os fungos filamentosos resultou em um aumento significativo da produção de biomassa, melhorando a eficiência no tratamento e recuperação de nutrientes, além de uma maior estabilização do pH. Em suma, esses achados ressaltam a importância da interação simbiótica para maximizar os benefícios ambientais e oferecem uma alternativa sustentável para enfrentar os desafios da poluição e tratamento de resíduos.

REFERÊNCIAS

ABIQ – Associação Brasileira das Indústrias de Queijo- São Paulo, Brasil, 2022 - Disponível em:

https://www.abiq.com.br/queijos_1er.asp?codigo=1911&codigo_categoria=6&codigo_subcategoria=31. Acesso em: 02 agosto 2023.

AKANIRO, I.R.; CHIBUIKE, I. V.; ONWUJEKWE, E. C.; GBADAMOSI, F. A.; ENYI, D. O.; ONWE, O. N. Penicillium species as chassis for biomanufacturing and environmental sustainability in the modern era: Progress, challenges, and future perspective. **Fungal Biology Reviews**, v. 46, p. 100326, 2023.

AKANSHA, J.; NIDHEESH, P.V.; GOPINATH, A.; ANUPAMA, K.V.; KUMAR, M.S. Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. **Chemosphere**, v. 253, p. 126652, 2020.

AKHTAR, N.; MANNAN, M. A. Mycoremediation: expunging environmental pollutants. **Biotechnology reports**, v. 26, p. e00452, 2020.

ALDARF, M.; AMRANE, A.; PRIGENT, Y. Carbon and nitrogen substrates consumption, ammonia release and proton transfer in relation with growth of Geotrichum candidum and Penicillium camemberti on a solid medium. **Journal of biotechnology**, v. 95, n. 2, p. 99-108, 2002.

ALI, S.K.; FLAYYIH, A.I. Evaluation of the Physical and Chemical Treatment of Wastewater for the Dairy Industry. **Journal of Engineering**, v. 28, n. 10, p. 1-12, 2022.

AL-TAYAWI, A.N.; SISAY, E. J.; BESZÉDES, S.; KERTÉSZ, S. Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. **Processes**, v. 11, n. 7, p. 2133, 2023.

ANELLI, P.; PETERSON, S. W.; HAIDUKOWSKI, M.; LOGRIECO, A. F.; MORETTI, A.; EPIFANI, F.; SUSCA, A. Penicillium gravinicaei, a new species isolated from cave cheese in Apulia, Italy. **International journal of food microbiology**, v. 282, p. 66-70, 2018.

AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemistry. 17th ed. Gaithersburg: Ed. William Horwitz, 2002.

ASUNIS, F.; GIOANNIS, G.; DESSÌ, P.; ISIPATO M.; LENS, P.N.L.; MUNTONI, A.; POLETTINI, A.; POMI, R.; ROSSI, A.; SPIGA, D. The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation. **Journal of environmental Management**, v. 276, p. 111240, 2020.

CASÁ, N. E.; LOIS-MILEVICICH, J.; ALVAREZ, P.; MATEUCCI, R.; PLA, M. Chlorella vulgaris cultivation using ricotta cheese whey as substrate for biomass production. **Journal of Applied Phycology**, v. 34, n. 2, p. 745-756, 2022.

CHU, R.; LI, S.; ZHU, L.; YIN, Z.; HU, D.; LIU, C.; MO, F. A review on co-cultivation of microalgae with filamentous fungi: Efficient harvesting, wastewater treatment and biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110689, 2021.

Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 430, de 26 de junho de 2009. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, Brasília, DF, 26 de junho de 2009.

CORREA, Z.; DE TAVARES MACHADO BOLONHESI, I. B.; LOPES, D. D.; PRATES, K. V. M. C.; PANAGIO, L. A.; RATUCHNE, A.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z. Removal of organic matter and nitrogen from dairy effluents in a structured bed reactor operated with intermittent aeration. *Environ Sci Pollut Res*, v. 30, p. 91060–91073, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28581-y>.

CUSTODIO, M.; PEÑALOZA, R.; ESPINOZA, C.; ESPINOZA, W.; MEZARINA, J. Treatment of dairy industry wastewater using bacterial biomass isolated from eutrophic lake sediments for the production of agricultural water. **Bioresource Technology Reports**, v. 17, p. 100891, 2022.

D'OTAVIANO, L.O. Exploração do potencial biotecnológico de líquens de fungos filamentosos e microalgas dentro do contexto de uma biorrefinaria. Orientador: Messias Borges Silva. 2018. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2018.

DEVI, D.; GUPTA, S. B.; MISHRA, B. K.; SHESHMA, M. K. Isolation and identification of phosphate solubilizing filamentous fungi from semi-arid region of Rajasthan (India). **J. Pharmacogn. Phytochem**, v. 9, p. 1784-1789, 2020.

DÍAZ, A. I.; IBAÑEZ, M.; LACA, A.; DÍAZ, M. Biodegradation of olive mill effluent by white-rot fungi. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 9930, 2021.

DJELAL, H.; AMRANE, A. Biodegradation by bioaugmentation of dairy wastewater by fungal consortium on a bioreactor lab-scale and on a pilot-scale. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 9, p. 1906-1912, 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO STAT - Livestock Primary, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/en/>. Acesso em: 02 agosto 2023.

FREIRE, K.T.L.S. **Caracterização taxonômica de espécies do complexo *Cladosporium cladosporioides* depositadas na micoteca URM da Universidade Federal de Pernambuco**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

HASHEMI, S.S.; KARIMI, K.; TAHERZADEH, M.J. Valorization of vinasse and whey to protein and biogas through an environmental fungi-based biorefinery. **Journal of Environmental Management**, v. 303, p. 114138, 2022.

IBARRURI, J., HERNÁNDEZ, I. Valorization of cheese whey and orange molasses for fungal biomass production by submerged fermentation with *Rhizopus* sp. **Bioprocess and biosystems engineering**, v. 42, p. 1285-1300, 2019.

KERAMATI, A.; AZIZI, S.; HASHEMI, A.; PAJOU SHARIATI, F. Effects of flashing light-emitting diodes (LEDs) on membrane fouling in a reciprocal membrane photobioreactor (RMPBR) to assess nitrate and phosphate removal from whey wastewater. **Journal of Applied Phycology**, v. 33, p. 1513-1524, 2021.

KUMAR, B.L.; GOPAL, D.V.R.S. Effective role of indigenous microorganisms for sustainable environment. **3 Biotech**, v. 5, p. 867-876, 2015.

LENG, L.; LI, W.; CHEN, J.; LENG, S.; CHEN, J.; WEI, L.; HUANG, H. Co-culture of fungi-microalgae consortium for wastewater treatment: A review. **Bioresource technology**, v. 330, p. 125008, 2021.

LI, T.; JIANG, L.; HU, Y.; PAUL, J.T.; ZUNIGA, C.; ZENGLER, K.; BETENBAUGH, M.J. Creating a synthetic lichen: Mutualistic co-culture of fungi and extracellular polysaccharide-secreting cyanobacterium *Nostoc* PCC 7413. **Algal Research**, v. 45, p. 101755, 2020.

LI, Y.; MIROS, S.; KIANI, H.; ECKHARDT, H.G.; BLANCO, A.; MULCAHY, S.; MCDONNELL, H.; TIWARI, B.K.; HALIM, R. Mechanism of lactose assimilation in microalgae for the bioremediation of dairy processing side-streams and co-production of valuable food products. **Journal of Applied Phycology**, p. 1-13, 2023.

LUKE, A. K.; BURTON, S. G. A novel application for *Neurospora crassa*: progress from batch culture to a membrane bioreactor for the bioremediation of phenols. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 29, n. 6-7, p. 348-356, 2001.

MALTSEV, Y.; MALTSEVA, K. Fatty acids of microalgae: Diversity and applications. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 20, p. 515-547, 2021.

MANEECHOTE, W., CHEIRSILP, B., ANGELIDAKI, I., SUYOTHA, W., BOONSAWANG, P. Chitosan-coated oleaginous microalgae-fungal pellets for improved bioremediation of non-sterile secondary effluent and application in carbon dioxide sequestration in bubble column photobioreactors. *Bioresource Technology*, v. 372, 2023.

MAPA, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Secretaria de Defesa Agropecuária, Instrução Normativa Nº 80, de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-80-de-13-de-agosto-de-2020-272509723>. Acesso em: 02 de agosto de 2023.

MAPA, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Secretaria de Defesa Agropecuária, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do->

SAR, T.; HARIRCHI, S.; RAMEZANI, M.; BULKAN, G.; AKBAS, M.Y; PANDEY, A.; TAHERZADEH, M.J. Potential utilization of dairy industries by-products and wastes through microbial processes: A critical review. **Science of The Total Environment**, v. 810, p. 152253, 2022.

SEIBOTH, B.; PAKDAMAN, B. S.; HARTL, L., KUBICEK, C. P. Lactose metabolism in filamentous fungi: how to deal with an unknown substrate. **Fungal Biology Reviews**, v. 21, n. 1, p. 42-48, 2007.

SHEN, N.; CHIRWA, E.M.N. Live and lyophilized fungi-algae pellets as novel biosorbents for gold recovery: Critical parameters, isotherm, kinetics and regeneration studies. **Bioresource Technology**, v. 306, 2020.

SHI, Z.; TAN, X.; LI, Y.; SHENG, Y.; ZHANG, Q.; XU, J.; YANG, Y. A novel fungal-algal coupling system for slaughterhouse wastewater treatment and lipid production. **Bioresource Technology**, v. 387, 2023.

SOUZA, C. F. Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do soro de leite tratado por reator anaeróbio. 2021.

TALUKDAR, S.; BARZEE, T.J. Fungal-assisted immobilization of microalgae for simultaneous harvesting and product customization: Effects of geometry, loading, and microalgae concentration. **Algal Research**, v. 74, p. 103242, 2023.

USMANI, Z.; SHARMA, M ; GAFFEY, J.; SHARMA, M.; DEWHURST, R.J.; MOREAU, B.; NEWBOLD, J.; LARK, W.; THAKUR, K.V.; GUPTA, V.K. Valorization of dairy waste and by-products through microbial bioprocesses. **Bioresource technology**, v. 346, p. 126444, 2022.

VEITER, L.; RAJAMANICKAM, V.; HERWIG, C. The filamentous fungal pellet-relationship between morphology and productivity. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 102, n. 7, p. 2997-3006, 2018.

WANG, J.; TIAN, Q.; CUI, L.; CHENG, J.; ZHOU, H.; ZHANG, Y.; PENG, A.; SHEN, L. Synergism and mutualistic interactions between microalgae and fungi in fungi-microalgae symbiotic system. **Bioresource Technology**, v. 361, p. 127728, 2022.

YAAKOB, M.A.; MOHAMED, R.M.S.R.; AL-GHEETHI, A.; ASWATHNARAYANA, R.A.; AMBATI, R. R. Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview. **Cells**, v. 10, n. 2, p. 393, 2021.

YANG, L.; LI, H.; WANG, Q. A novel one-step method for oil-rich biomass production and harvesting by co-cultivating microalgae with filamentous fungi in molasses wastewater. **Bioresource Technology**, v. 275, p. 35-43, 2019.

YUAN, H.; ZHANG, X.; JIANG, Z.; WANG, X.; CHEN, X.; CAO, L., ZHANG, X. Analyzing the effect of pH on microalgae adhesion by identifying the dominant interaction between cell and surface. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 177, p. 479-486, 2019.

ZHAO, Y.; GUO, G.; SUN, S.; HU, C.; LIU, J. Co-pelletization of microalgae and fungi for efficient nutrient purification and biogas upgrading. **Bioresource Technology**, v. 289, 2019.