

Uso de microalga *Spirulina platensis* no tratamento de águas resíduárias e produção de biocombustíveis

*Use of microalgae *Spirulina platensis* in wastewater treatment and biofuel production*

Daniel Lemos Cordeiro¹, Renata Nazaré Vilas Bôas², Marisa Fernandes Mendes³, Henrique Vieira Mendonça⁴

RESUMO: Este estudo avaliou a eficiência da microalga *Spirulina platensis* no tratamento de águas resíduárias da bovinocultura e, simultaneamente, na produção de biomassa para biodiesel. O cultivo em efluentes, sem aditivos, demonstrou alta eficácia na biorremediação, com remoções de 86 a 99% da demanda química de oxigênio (DQO), 86 a 99% da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e 98 a 100% de nitrogênio amoniacal (NH_4^+). A produtividade volumétrica de biomassa seca atingiu $2,018 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ em um dos experimentos, com uma média de $0,846 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos quatro cenários testados, superando valores reportados na literatura para meios similares. A biofixação de CO_2 alcançou $3.401 \text{ mg L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no experimento de maior produtividade. A biomassa gerada apresentou teores lipídicos entre 6,3% e 8%, sendo o ácido palmítico (C16:0) o majoritário (~47%). O biodiesel produzido atendeu a diversos parâmetros de qualidade, embora o teor de ácido linolênico (C18:3) tenha ficado entre 17-22%, acima do limite de 12% estabelecido pela norma EN14214. O efluente tratado atendeu aos padrões de lançamento e reuso das Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011 e nº 357/2005, respectivamente, para a maioria dos parâmetros, exceto pelo pH, que necessita de correção simples e de baixo custo. Conclui-se que o cultivo de *Spirulina platensis* em águas resíduárias é uma estratégia viável e eficiente, integrando o tratamento de efluentes com a produção sustentável de biocombustíveis.

Palavras-chave: Ácido graxo; Biodiesel; Biomassa; Biorremediação; Tratamento de efluentes.

ABSTRACT: This study evaluated the efficiency of microalgae *Spirulina platensis* in the treatment of cattle wastewater and, simultaneously, in the production of biomass for biodiesel. Cultivation in effluents, without additives, demonstrated high bioremediation efficacy, with removals of 86 to 99% of Chemical Oxygen Demand (COD), 86 to 99% of Biochemical Oxygen Demand (BOD), and 98 to 100% of Ammoniacal Nitrogen (NH_4^+). Dry biomass volumetric productivity reached $2.018 \text{ g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in one of the experiments, with an average of $0.846 \text{ g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in the four scenarios tested, exceeding values reported in the literature for similar media. CO_2 biofixation reached $3401 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in the highest productivity experiment. The generated biomass presented lipid contents between 6.3% and 8%, with palmitic acid (C16:0) being the majority (~47%). The biodiesel produced met several quality parameters, although the linolenic acid (C18:3) content was between 17-22%, above the 12% limit established by EN14214 standard. The treated effluent met the discharge and reuse standards of the National Environment Council (CONAMA) Resolutions No. 430/2011 and No. 357/2005, respectively, for most parameters, except for pH, which requires simple and low-cost correction. It is concluded that the cultivation of *Spirulina platensis* in wastewater is a viable and efficient strategy, integrating effluent treatment with sustainable biofuel production.

Keywords: Fatty acid; Biodiesel; Biomass; Bioremediation; Wastewater treatment.

Autor correspondente: Renata Nazaré Vilas Bôas
E-mail: revilasboas@ufrj.br

Recebido em: 2024-08-21
Aceito em: 2025-11-05

¹ Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRJ), Seropédica (RJ), Brasil.

² Pós-Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRJ), Seropédica (RJ), Brasil.

³ Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professora Titular no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRJ), Seropédica (RJ), Brasil.

⁴ Doutor em Biodiversidade e Conservação da Natureza pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Professor no Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRJ), Seropédica (RJ), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A iminente escassez de recursos naturais é uma preocupação global central, demandando ações para sua mitigação. Dentre esses recursos, os problemas hídricos já impactam significativamente vastas regiões do mundo, acarretando inúmeros prejuízos (Kumar *et al.*, 2018). Associado a isso, outro grande desafio enfrentado pela maioria dos países é a falta de um tratamento de efluentes adequado, resultando na poluição de corpos hídricos e na deterioração da qualidade da água, bem como de seus ecossistemas associados (Deng *et al.*, 2018; Calixto *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2015).

Nas últimas décadas, são empregados processos convencionais para o tratamento de água resíduária, como lodos ativados e filtros biológicos; no entanto, tem-se observado uma crescente demanda por novos métodos e inovações nesse campo. A necessidade de desenvolvimento desses novos processos é evidente, visando substituir tratamentos que apresentam baixa eficiência na remoção de nutrientes específicos ou possuem custos operacionais elevados. Nota-se, especialmente, o alto custo associado aos processos convencionais, principalmente quando se trata da remoção de nitrogênio, fósforo, metais tóxicos e metais pesados (Lam *et al.*, 2018; Rajasulochana; Preethy, 2016). Além disso, quando esses elementos são descarregados em reservatórios, onde a capacidade de autodepuração é limitada em comparação com ambientes de fluxo contínuo, os efeitos da eutrofização tornam-se ainda mais graves. Portanto, são indispensáveis tratamentos terciários, embora o alto custo de instalação por vezes torne sua implementação inviável (Walls *et al.*, 2019).

Entre as mais recentes abordagens de tratamento, destaca-se o cultivo de microalgas em efluentes. Além de ser um processo natural, oferece um custo reduzido, especialmente em comparação com tratamentos terciários. Adicionalmente, auxilia no controle de gases poluentes, uma vez que as microalgas realizam a assimilação de CO₂ por meio da fotossíntese (Ruan *et al.*, 2019; Tiwari *et al.*, 2017).

Após a Revolução Industrial, houve um avanço significativo na demanda por energia, impulsionado pelo crescimento exponencial da população. As fontes de energia primária mais utilizadas, como gás natural, petróleo e carvão mineral, são não renováveis e enfrentam o desafio da escassez, sendo necessária a busca por alternativas. Nesse contexto, os biocombustíveis emergem como uma alternativa viável (Kumar *et al.*, 2018; Singh, S. P.; Singh, P., 2014). Desta forma, a utilização de biocombustíveis provenientes da biomassa está sendo amplamente aceita como uma alternativa aos combustíveis fósseis, uma vez que a produção dessa energia é sustentável (Pittman, 2011; dos Santos *et al.*, 2021). Além disso, por serem biodegradáveis, os impactos ao meio ambiente são menores se comparados com os combustíveis fósseis. Portanto, torna-se uma alternativa para substituir o petróleo e o gás natural nos motores à combustão (De Souza *et al.*, 2023).

Estudos apontam que as microalgas possuem grande potencial para produção de biocombustíveis, como fonte de matéria-prima. Elas utilizam apenas água, nutrientes e energia solar para converter CO₂ em biomassa, pois são organismos fotossintéticos que se desenvolvem em ambientes aquáticos (Carneiro *et al.*, 2018). Dentre as microalgas, a *Spirulina platensis* se destaca como um agente fundamental para essa transição energética. Sendo assim, especialistas e pesquisadores têm demonstrado interesse nessa espécie (Medipally, 2015).

Desta forma, o estudo teve como objetivo avaliar o rendimento da produção de biocombustíveis a partir de biomassa obtida de microalgas cultivadas em águas residuárias. No qual, a biomassa obtida foi caracterizada e quantificada em relação à composição lipídica para posteriormente ser utilizada na obtenção dos principais parâmetros de qualidade do biodiesel.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Para o cultivo da microalga e a análise do tratamento do efluente, foi selecionada uma água residuária da bovinocultura com alto nível de matéria orgânica, oriunda da "Fazendinha Agroecológica" da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus de Seropédica, RJ, Brasil (coordenadas: 22° 45' 21" S; 43° 40' 28" W).

Foram realizadas análises da água residuária antes do tratamento para determinar seus parâmetros físico-químicos, sendo eles a concentração de cálcio, fósforo, magnésio, sódio, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, fenol, demanda química de oxigênio (DQO) de baixa concentração e carbono orgânico total (COT). Também foram avaliadas a condutividade elétrica, a salinidade e a turbidez da água. Os testes foram realizados na água residuária antes e depois do tratamento do efluente, para avaliar a eficiência do processo, comparando os níveis de concentração dos compostos e sua remoção após o cultivo.

2.2 CULTIVO DA MICROALGA

Foi utilizado como recipiente de cultivo e tratamento (Figura 1), garrafas pet de 2 litros, com 600 mL de inóculo de *Spirulina Platensis* e 1200 mL de água residuária. As garrafas eram transparentes para permitir a entrada de luz, a iluminação foi realizada com luz artificial por meio de lâmpadas brancas fluorescentes de 18 watts realizando um fotoperíodo de 24 horas. A agitação foi realizada injetando ar atmosférico no fundo das garrafas usando compressor de ar com vazão de 0,5 L min⁻¹.



Figura 1. Cultivo de microalgas no laboratório

Para o monitoramento da temperatura e da variação de pH, foi utilizado o equipamento *Water Quality Tester* duas vezes ao dia, no período da manhã e à tarde. Posteriormente, houve a determinação do tempo ótimo de cultivo da microalga em relação a sua taxa de crescimento, para a qual foi utilizado o Espectrofotômetro Hach DR3900 para medir Densidade Ótica (DO) duas vezes ao dia, no período da manhã e no período da tarde. Cada amostra foi analisada em triplicata. A concentração de massa seca foi determinada indiretamente, utilizando equações de calibração derivadas de uma curva padrão de Massa Seca em função da Densidade Ótica.

2.3 EXTRAÇÃO DA BIOMASSA

Ao final do período de cultivo, a biomassa foi extraída dos reatores. Inicialmente, foi realizada uma pré-filtração com uma peneira de malha de 0,045 mm. Em seguida, para a recuperação de partículas de menor diâmetro, a suspensão foi centrifugada utilizando uma centrífuga 800-1 Centrifugal Machine. A biomassa extraída foi distribuída em finas camadas sobre placas de Petri e secada em geladeira para posterior análise.

2.4 ANÁLISE DA ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA

Após o tratamento da água residuária com a microalga *Spirulina platenses* e a extração da biomassa resultante do processo, a água tratada foi filtrada e submetida novamente aos mesmos testes físico-químicos realizados com a água residuária bruta. A comparação dos resultados antes e após o tratamento permitiu analisar a eficiência do processo (Figura 2).

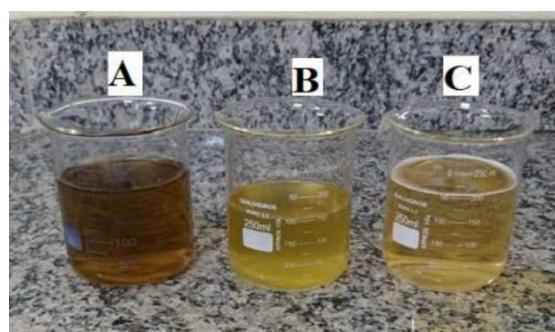


Figura 2. Amostras de água residuária (A), água após o tratamento (B) e água após o tratamento e filtragem (C)

2.5 LIPÍDIOS E ÁCIDOS GRAXOS

A partir da biomassa seca, realizou-se a extração de lipídios, que foram quantificados pelo método de extração Soxhlet. Os solventes utilizados foram Hexano P.A. (130 mL) e álcool etílico P.A. (130 mL). A extração foi realizada em balões de destilação por um período de 6 horas para o primeiro solvente e 3 horas para o

segundo. A biomassa foi condicionada em cartuchos de papel. Após a extração, o solvente foi evaporado em rotavapor (BUCHI Waterbath B-480, German) com banho termostático a 50°C. Quanto à pressão, utilizou-se 500 mbar para o hexano e 350 mbar para o etanol (Piorreck *et al.*, 1984).

Os lipídeos extraídos das biomassas produzidas foram submetidos à esterificação de ácidos graxos e os respectivos componentes ésteres metílicos de ácidos graxos (FAMEs) analisados por cromatografia gasosa no equipamento GC-2010 Plus, Shimadzu (Japan), equipado com coluna capilar Agilent HP-88, 0,25 mm × 100 m, 0,2 µm, tendo hélio como gás de arraste, conforme procedimentos descritos por Pérez-Mora *et al.* (2016). Os ácidos graxos foram identificados por comparação de seus tempos de retenção com os de uma mistura padrão comercial da marca Sigma-Aldrich.

2.6 PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA

A produtividade volumétrica de biomassa foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$Pv = \frac{Mf - Mi}{Tf - Ti} \quad (1)$$

Em que Pv é a produtividade volumétrica (g L⁻¹ dia⁻¹); Mf é a concentração de biomassa final (g L⁻¹); Mi é a concentração de biomassa inicial (g L⁻¹); Tf é o tempo final de cultivo (dia); Ti é o tempo inicial de cultivo (dia).

2.7 BIOFIXAÇÃO DE CO₂

A biofixação de CO₂ que ocorre durante a fotossíntese foi calculada com base na produtividade volumétrica e na concentração de carbono orgânico na biomassa de acordo com Equação 2.

$$RCO_2 = Pv * C * \frac{MCO_2}{MC} \quad (2)$$

Em que RCO₂ é a biofixação de CO₂ (mg L⁻¹ dia⁻¹); Pv é a produtividade volumétrica (mg L⁻¹ dia⁻¹); C é a concentração de carbono na biomassa (g g⁻¹); MCO₂ é a massa molar CO₂ (g mol⁻¹); e MC é a massa molar do carbono (g mol⁻¹).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MASSA SECA E PRODUTIVIDADE VOLUMÉTRICA

A variabilidade na composição do meio de cultivo interfere diretamente na produtividade volumétrica de massa seca e na taxa de crescimento. Como a água

residuária é um meio intrinsecamente variável, foram realizados quatro experimentos independentes, utilizando amostras do efluente coletadas em momentos diferentes, para avaliar diversos cenários. As diferentes concentrações de nutrientes nos meios de cultivo resultaram em variações na produtividade volumétrica e no tempo ótimo de cultivo em cada experimento (Figura 3). Em cada experimento, foram utilizados 3 reatores e o crescimento das microalgas foi monitorado pela determinação da massa seca, o que permitiu identificar o período de máxima produtividade. A taxa em cada recipiente foi verificada individualmente e posteriormente calculada a média entre as repetições.

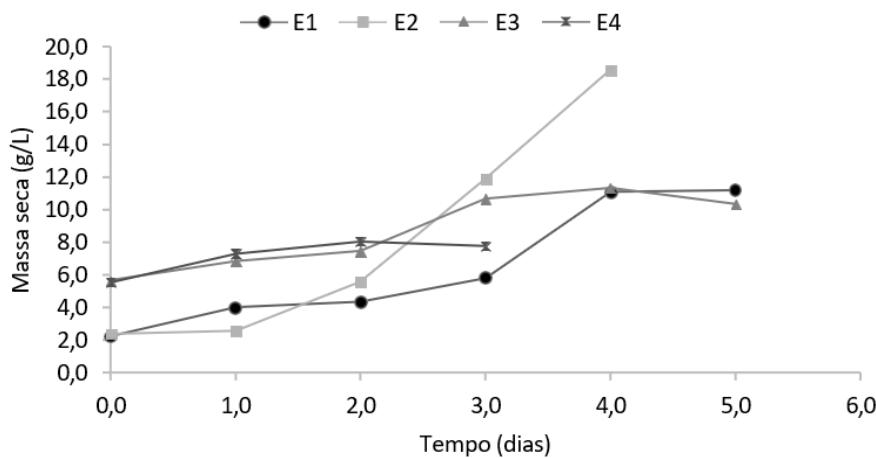


Figura 3. Crescimento de massa seca em função do tempo de cultivo

No primeiro Experimento (E1) observaram-se algumas diferenças na taxa de crescimento de massa seca entre os reatores. A média dos reatores indicou que a microalga obteve sua maior produtividade volumétrica no dia 4, porém, como ainda havia nutrientes remanescentes na água residuária, a duração do Experimento 1 (E1) foi de 5 dias, com produtividade volumétrica de $0,894 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e um acúmulo de massa seca de $4,470 \text{ g L}^{-1}$. Por outro lado, o Experimento 2 (E2) obteve os melhores resultados de produtividade volumétrica e de produção de massa seca entre os experimentos realizados, com produtividade volumétrica de $2,018 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e acúmulo de massa seca de $8,072 \text{ g L}^{-1}$. O Experimento 2 (E2) teve duração menor do que o Experimento 1 (E1), com tempo de cultivo de 4 dias, e, apesar de quantidades maiores de nutrientes disponíveis na água residuária, o aumento da temperatura provocou um consumo mais acelerado.

Devido à grande disponibilidade de nutrientes e de matéria orgânica contidos na água residuária do Experimento 3 (E3), desta vez sem o estímulo no consumo e crescimento ocasionado pelo aumento da temperatura regional que ocorreu no Experimento 2 (E2). O Experimento 3 (E3) durou 7 dias até que consumisse todos os insumos do meio de cultivo, obteve produtividade volumétrica de $0,335 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e aumento de concentração de massa seca de $2,345 \text{ g L}^{-1}$. No Experimento 3 (E3) foi observada uma queda na concentração de biomassa e na produtividade a partir do quarto dia, com durabilidade de 4 dias a produtividade volumétrica seria de $0,710 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e aumento da concentração de massa seca de $2,840 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Com uma disponibilidade de nutrientes inferior à dos experimentos anteriores, o Experimento 4 (E4) durou apenas 3 dias, período no qual a *Spirulina* assimilou todos os

compostos rapidamente e obteve uma produção de massa seca inferior à dos demais experimentos. Sua produtividade volumétrica foi de $0,629 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e o acúmulo de massa seca foi de $1,887 \text{ g L}^{-1}$. Considerando a média total dos experimentos, a produtividade volumétrica foi de $0,846 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$; embora o Experimento 4 (E4) tenha apresentado menor tempo de duração e resultados inferiores aos demais, a média entre os experimentos atingiu resultados significativos de produtividade e taxa de crescimento de massa seca (Figura 4). Observou-se também que o período de cultivo de 4 dias resultou nos melhores rendimentos, e que a extensão desse período para além de 5 dias levou a uma queda na produtividade volumétrica e a uma perda de massa seca.

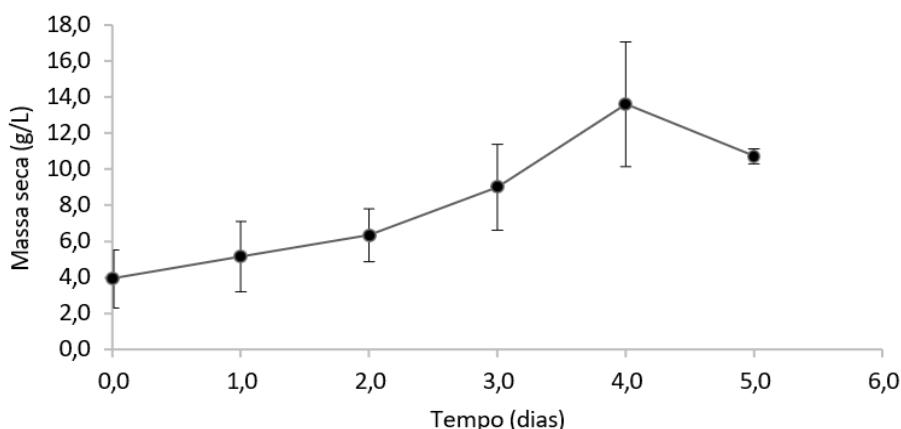


Figura 4. Média total do crescimento de massa seca em função do tempo de cultivo

Considerando a média total dos experimentos, a produtividade volumétrica foi de $0,846 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A produtividade volumétrica média total obtida neste estudo supera os valores de $0,610$ a $0,664 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ reportados por Souza *et al.* (2021) para o cultivo de *Spirulina platensis* em efluente bovino sob condições semelhantes, evidenciando o alto desempenho do protocolo de cultivo adotado. Embora o Experimento 4 (E4) tenha apresentado menor tempo de duração e resultados inferiores aos demais, a média entre os experimentos atingiu resultados significativos de produtividade e taxa de crescimento de massa seca (Figura 4).

Observou-se também que o período de cultivo de 4 dias resultou nos melhores rendimentos, e que a extensão desse período para além de 5 dias levou a uma queda na produtividade volumétrica e a uma perda de massa seca. Almomani *et al.* (2019) utilizaram esgoto tratado em fossa séptica para cultivar a *Spirulina platensis*, alcançando uma produtividade volumétrica de $0,246 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. O crescimento da biomassa inferior foi atribuído a menores concentrações de nitrogênio amoniacal (NH_4^+) e de fósforo (P) na água residuária utilizada como meio de cultura. Mendonça *et al.* (2018) estudou *Scenedesmus obliquus*, no qual foi cultivada também em um efluente similar ao utilizado neste estudo, e alcançou uma produtividade volumétrica de $0,213$ a $0,358$, embora essa espécie de microalga tenha uma ótima adaptabilidade e crescimento em água residuária o desempenho da *Spirulina platensis* foi superior na produção de biomassa.

A produtividade volumétrica de massa seca do presente estudo obteve resultados superiores quando comparada a outros trabalhos da literatura, que variaram de $0,213$ a $0,664 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, conforme observado nos estudos de Mendonça *et al.* (2018) e Souza *et*

al. (2021). A superioridade do desempenho da *Spirulina platensis* na produção de biomassa foi evidenciada não apenas pela maior produtividade, mas também pelo emprego de um tempo de cultivo mais curto, com período máximo de 4 dias para se obter os melhores rendimentos.

3.2 TRATAMENTO DA ÁGUA

3.2.1 Água resíduária e água tratada

Com base nos testes laboratoriais realizados na água resíduária antes do tratamento e após o tratamento realizado exclusivamente com a *Spirulina*, sem adição de qualquer produto complementar, foram obtidos resultados expressivos de remoção de agentes poluentes. Os compostos orgânicos presentes no efluente foram biodegradados via metabolismo mixotrófico da *Spirulina*, que os assimilou e convertendo-os em fonte de energia. Os resultados das eficiências de remoção de poluentes encontram-se na Tabela 1.

Todos os experimentos apresentaram elevada eficiência na remoção de poluentes, com a maioria dos componentes orgânicos sendo removidos quase que integralmente ou atingindo remoção completa. Parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT) apresentaram remoções elevadas, na faixa de 77 a 99%. O nitrogênio amoniacal (NH_4^+) presente no efluente obteve altas taxas de remoção, com resultados variando de 98 a 100%, assim como o fenol, que alcançou remoção de 100%, e a turbidez da água atingiu reduções de 97 a 100%. Dessa forma, demonstrou-se a alta eficiência do tratamento utilizando exclusivamente *Spirulina* e filtração inicial, atendendo a diversos parâmetros exigidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011).

Em comparação com outros estudos, verifica-se que o uso de microalgas, em especial a *Spirulina*, proporciona excelentes resultados na remoção de impurezas e matéria orgânica de águas resíduárias.

Neste estudo, a remoção de DQO atingiu 86 a 99%, superando valores reportados na literatura para outras espécies de microalgas. Mendonça et al. (2018), ao estudarem a espécie *Scenedesmus obliquus* com tempo de retenção de 12 dias, obtiveram remoções de 65 a 70%. Os resultados deste trabalho também foram superiores a outros estudos que utilizaram a espécie *Spirulina platensis*. Em comparação, Souza et al. (2021) encontraram valores de nitrogênio amoniacal (NH_4^+) entre 98 e 100% de remoção, faixa similar à observada no presente trabalho. Quanto ao fósforo (P), este experimento alcançou remoção total (100%), superando os percentuais reportados nos estudos anteriormente citados.

Tabela 1. Valores das análises dos parâmetros da água resíduária, da água tratada e filtrada

Parâmetros	EXPERIMENTO 1						EXPERIMENTO 2					
	Água resíduária	Água tratada	Água tratada filtrada	Remoção	Alteração	Percentual de remoção	Água resíduária	Água tratada	Tratada filtrada	Remoção	Alteração	Percentual de remoção
pH	7,36	8,83	8,87	-	1,51	-	7,48	10,51	9,98	-	2,50	-
T (°C)	25,5	26,33	25,33	-	0,17	-	26,00	18,90	18,63	-	7,37	-
Cond. Elét. (µS cm ⁻¹)	1115,75	1088,33	1815,67	-	699,92	-	1118,33	2133,33	2023,33	-	905,00	-
Salinidade (%)	0,0625	0,0333	0,0600	0,0025	-	-	0,0633	0,0700	0,0533	0,01	-	-
Turbidez (NTU)	100,25	2,00	2,39	97,86	-	98%	83,00	69,67	1,23	81,77	-	99%
DQO BC (mg L ⁻¹)	135,4	86,61	3,20	132,20	-	98%	43,46	25,42	6,00	37,46	-	86%
DBO (mg L ⁻¹)	67,70	43,31	1,60	66,10	-	98%	21,73	12,71	3,00	18,73	-	86%
COT (mg L ⁻¹)	35,15	22,95	2,10	33,05	-	94%	12,17	7,95	2,80	9,37	-	77%
NH ₄ (mg L ⁻¹)	67,2	3,33	1,33	65,87	-	98%	73,60	0,57	0,00	73,60	-	100%
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	215	0,55	2,23	212,77	-	99%	185,00	7,81	0,00	185,00	-	100%
Fenol (mg L ⁻¹)	14,17	2,33	0,00	14,17	-	100%	11,63	0,30	0,00	11,63	-	100%
Parâmetros	EXPERIMENTO 3						EXPERIMENTO 4					
	Água resíduária	Água tratada	Água tratada filtrada	Remoção	Alteração	Percentual de remoção	Água resíduária	Água tratada	Tratada filtrada	Remoção	Alteração	Percentual de remoção
pH	7,33	10,34	9,37	-	2,03	-	6,93	10,64	10,49	-	3,56	-
T (°C)	21,33	18,73	16,83	-	-4,50	-	18,73	15,87	19,40	-	0,67	-
Cond. Elét. (µS cm ⁻¹)	1119,33	833,00	730,33	-	-389,00	-	1081,33	979,00	983,67	-	-97,67	-
Salinidade (%)	0,0567	0,0333	0,0267	0,03	-	-	0,0433	0,0317	0,0300	0,0133	-	-
Turbidez (NTU)	27,00	115,67	0,72	26,28	-	97%	27,00	55,67	0,01	26,99	-	100%
DQO BC (mg L ⁻¹)	206,85	43,32	3,57	203,28	-	98%	182,33	40,96	1,10	181,23	-	99%
DBO (mg L ⁻¹)	103,42	21,66	1,78	101,64	-	98%	91,17	20,48	0,55	90,62	-	99%
COT (mg L ⁻¹)	53,01	12,13	2,19	50,82	-	96%	46,88	11,54	1,58	45,31	-	97%
NH ₄ (mg L ⁻¹)	14,00	3,50	0,00	14,00	-	100%	54,00	2,10	0,33	53,67	-	99%
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	207,33	11,00	0,00	207,33	-	100%	180,67	11,10	0,96	179,70	-	99%
Fenol (mg L ⁻¹)	14,00	0,77	0,00	14,00	-	100%	14,00	0,45	0,00	14,00	-	100%

Observa-se que o tempo de retenção, o tipo de efluente e a espécie de microalga cultivada possuem influência direta na eficiência do tratamento, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Análise de eficiência na remoção de agentes poluentes no tratamento de água residuária com microalgas de diversos autores e obtidos neste estudo

Meio de cultivo	Espécie	TR (dia)	Remoção (%)				Referência
			DQO	COT	NH ⁴⁺	P	
Água residuária de gado	<i>Scenedesmus obliquus</i>	12	65 a 70%	NR	98 a 99%	69 a 78%	De Mendonça <i>et al.</i> (2018)
Água residuária da agricultura	<i>Spirulina platensis</i>	7	89%	NR	NR	100%	Cardoso <i>et al.</i> (2020)
Água residuária de destilaria	<i>Spirulina platensis</i>	5	15 a 23%	1 a 8%	48 a 72%	18 a 100%	Sankaran e Premalatha (2018)
Água residuária de tanque séptico	<i>Spirulina platensis</i>	6	39 a 83%	NR	NR	86 a 99%	Almomani <i>et al.</i> (2019)
Água residuária salinas	<i>Spirulina platensis</i>	10	90%	NR	NR	93%	Zhou <i>et al.</i> (2017)
Água residuária de gado	<i>Spirulina platensis</i>	6	57 a 72%	59 a 72%	98 a 100%	88 a 92%	Souza <i>et al.</i> (2021)
Água residuária de gado	<i>Spirulina platensis</i>	5	98%	94%	98%	100%	Estudo atual: Exp. 1
Água residuária de gado	<i>Spirulina platensis</i>	4	86%	77%	100%	100%	Estudo atual: Exp. 2
Água residuária de gado	<i>Spirulina platensis</i>	7	98%	96%	100%	100%	Estudo atual: Exp. 3
Água residuária de gado	<i>Spirulina platensis</i>	3	99%	97%	99%	100%	Estudo atual: Exp. 4

Nota: TR: tempo de retenção hidráulica; DQO: demanda química de oxigênio; COT: carbono orgânico total; NH₄⁺: nitrogênio amoniacal; P: fósforo; Exp. 1: Experimento 1; Exp. 2: Experimento 2; Exp. 3: Experimento 3; Exp. 4: Experimento 4.

3.2.2 Lançamento de efluente tratado em corpos d'água

Para garantir a preservação do corpo hídrico receptor, é imprescindível submeter o efluente a um processo de tratamento, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011). A partir da análise dos critérios dessa resolução, foi constatado que o tratamento empregando *Spirulina* alcançou resultados satisfatórios, como evidenciado na Tabela 3.

Os resultados indicaram temperaturas inferiores a 40 °C, remoção de DBO superior a 60%, concentração de nitrogênio amoniacal (NH₄⁺) abaixo de 20 mg L⁻¹ e teores de fenol inferiores a 0,5 mg L⁻¹. Por outro lado, o aumento do pH do efluente, decorrente da atividade metabólica da *Spirulina* durante o tratamento, resultou em valores acima da faixa permitida de 5 a 9 em quase todos os experimentos, com exceção do Experimento 1. Dessa forma, torna-se necessária uma etapa de correção de pH antes do descarte do efluente em corpos hídricos. Ajustes de pH constituem uma operação simples e de baixo custo, que não impacta significativamente o custo total do tratamento.

Tabela 3. Comparativo com os limites exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para lançamento em aquíferos

Parâmetros	Experimento	Experimento	Experimento	Experimento	Lançamento
	1	2	3	4	em aquíferos
pH	8,87	9,98	9,37	10,49	Entre 5,0 e 9,0
T (°C)	18,63	25,33	16,83	19,40	< 40
DBO (mg L ⁻¹)	98%	86%	96%	99%	Remoção de 60%
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	1,33	0,00	0,00	0,96	< 20
Fenol (mg L ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00	< 0,5

Fonte: Brasil (2011).

3.2.3 Água para reuso

Em condições de consumo humano, seja para beber, lavar roupas, higiene pessoal entre outras utilidades domésticas, os parâmetros da água são bem mais exigentes no qual a água tratada com a *Spirulina* não é recomendada, com isso, foram feitas análises comparativas entre o tratamento, as condições de potabilidade e as condições de água de reuso (Tabela 4).

Como observado anteriormente, o cultivo da *Spirulina* resultou na elevação do pH em quase todos os experimentos, ultrapassando os limites permitidos e exigindo, portanto, um ajuste posterior. Entretanto, no que diz respeito aos demais parâmetros, a água tratada com a microalga atendeu a todos os requisitos estabelecidos para a classe 1 de água de reuso, e para as classes inferiores, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005).

Para alcançar as condições necessárias para a classificação de água de reuso como classe 1, é necessário garantir uma condutividade elétrica máxima de 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, uma salinidade igual ou inferior a 0,1%, uma turbidez não superior a 0,5 NTU e concentrações máximas de DQO, DBO e COT de 6 mg L⁻¹, 3 mg L⁻¹ e 5 mg L⁻¹, respectivamente. Além disso, a concentração de Nitrogênio amoniacal (NH₄⁺) deve ser inferior a 1 mg L⁻¹, o Nitrogênio total deve estar abaixo de 10 mg L⁻¹ e a concentração de Fenol deve ser menor que 0,003 mg L⁻¹. Portanto, o tratamento com *Spirulina* apresenta resultados excelentes para ser utilizado como água de reuso em aplicações menos exigentes, podendo substituir métodos convencionais de tratamento e resultando em uma considerável redução nos custos de tratamento de água.

3.2.4 Oxigênio dissolvido (OD)

Para a análise dos níveis de oxigênio dissolvido que é um dos fatores mais importantes para a vida aquática, e com isso um parâmetro fundamental para a qualidade da água, houve um aumento dessa substância durante o cultivo de *Spirulina*, como se pode observar na Figura 5.

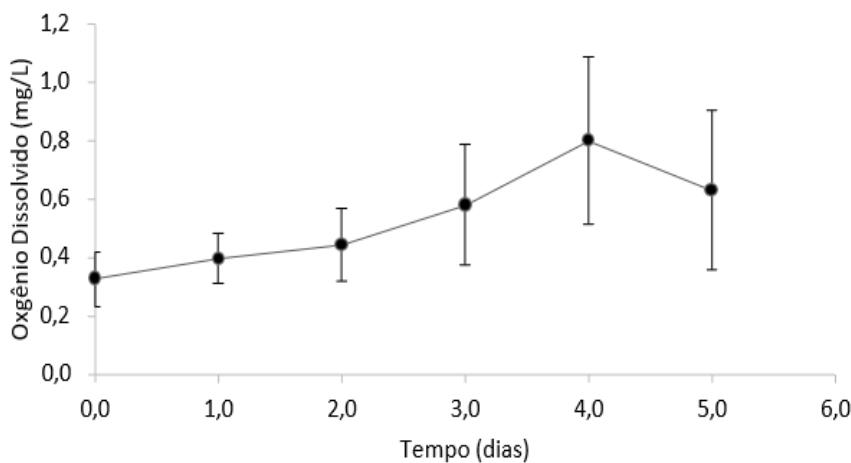


Figura 5. Oxigênio dissolvido em função do tempo de cultivo

Os resultados apresentados na Tabela 4 demonstram que o efluente tratado com *Spirulina platensis* atende à maioria dos parâmetros físico-químicos estabelecidos para enquadramento nas Classes 1 a 4 de reuso de água da Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), com exceção do pH. A elevação do pH, um efeito conhecido da atividade fotossintética intensa das microalgas, foi observada em todos os experimentos, com valores finais entre 8,87 e 10,49, ultrapassando o limite máximo de 9,0. No entanto, é crucial destacar que parâmetros críticos para o reuso, como turbidez, DQO, DBO, COT, nitrogênio amoniacal e totais, apresentaram concentrações consistentemente dentro ou mesmo abaixo dos limites mais restritivos, especialmente os da Classe 1. Este perfil qualifica o efluente tratado para uma vasta gama de aplicações não potáveis, como irrigação de culturas e descarga em sanitários, requerendo apenas uma simples e econômica etapa de correção de pH prévia à sua utilização.

A fotossíntese realizada pela *Spirulina* foi um dos fatores determinantes para o aumento da concentração de OD no efluente. Entretanto, em virtude das baixas concentrações iniciais de OD no efluente bruto, o efluente tratado não atingiu os valores mínimos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011).

Para a potabilidade, a concentração mínima de OD é de 6 mg L^{-1} ; para reuso em irrigação, 4 mg L^{-1} ; e para despejo em corpos d'água, o OD no corpo receptor após a mistura deve ser superior a 2 mg L^{-1} para evitar danos ao ecossistema aquático. Dessa forma, dependendo da finalidade do efluente tratado ou do corpo hídrico receptor, pode ser necessário um tratamento complementar após a etapa com *Spirulina*, o que não invalida a alta eficiência do processo proposto na remoção de outros poluentes.

Tabela 4. Análise da água tratada em relação aos parâmetros de água para reuso da Resolução CONAMA nº 357/2005

Parâmetros	Água tratada Experimento 1	Água tratada Experimento 2	Água tratada Experimento 3	Água tratada Experimento 4	Potável	Reuso classe 1	Reuso classe 2	Reuso classe 3	Reuso classe 4
pH	8,87	9,98	9,37	10,49	6,5 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
T (°C)	25,33	18,63	16,83	19,40	-	-	-	-	-
Cond. elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1815,67	2023,33	730,33	983,67	50 - 500	0 - 3000	-	-	-
Salinidade (%)	0,06	0,05	0,03	0,03	$\leq 0,05$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Turbidez (NTU)	2,39	1,23	0,72	0,01	≤ 5	≤ 40	≤ 100	≤ 100	-
DQO BC (mg L ⁻¹)	3,20	6,00	3,57	1,10	≤ 6	≤ 6	≤ 10	≤ 20	-
DBO (mg L ⁻¹)	1,60	3,00	1,78	0,55	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-
COT (mg L ⁻¹)	2,10	2,80	2,19	1,58	≤ 5	≤ 5	≤ 5	$\leq 6,30$	-
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	1,33	0,00	0,00	0,33	$< 1,0$	≤ 20	-	-	-
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	2,23	0,00	0,00	0,96	< 10	< 10	5 - 30	6 - 30	-
Fenol (mg L ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00	$< 0,003$	-	-	-	-

Fonte: Brasil (2005).

3.3 BIOFIXAÇÃO DE CO₂

A biofixação do dióxido de carbono ocorre durante a fotossíntese, onde a Spirulina utiliza a energia da luz para converter o CO₂ e a água em carboidratos e oxigênio, o carbono é fixado na forma de carboidratos e utilizado como fonte de energia para a produção de proteínas, lipídeos e outros. No caso da produção de biodiesel o que interessa é a ligação entre a biofixação de CO₂ e a produção de lipídios, baseando-se na Eq. 2 mencionada anteriormente, foram obtidos resultados de 1496 mg L⁻¹ dia⁻¹ para o Experimento 1 (E1), 3401 mg L⁻¹ dia⁻¹ para o Experimento 2 (E2) e 1206 g L⁻¹ dia⁻¹ para o Experimento 3 (E3).

3.4 EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Após a secagem da biomassa, deu-se início à extração de lipídios, os quais, após serem extraídos, foram submetidos à esterificação de ácidos graxos. A produtividade do biodiesel de microalgas está correlacionada com as concentrações de lipídios e ácidos graxos presentes na biomassa.

Os teores de lipídios e carbono presentes nas biomassas dos experimentos foram quantificados a partir da análise de três amostras, utilizando as metodologias previamente descritas. Os teores de lipídios foram de 6,3% para a amostra 1, 6,8% para a amostra 2 e 8% para a amostra 3, enquanto as concentrações de carbono apresentaram média de 46% em todas as amostras. Os ácidos graxos presentes nas amostras de biomassa foram identificados e quantificados após o processo de esterificação (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração dos ácidos graxos das amostras de biomassa

Ácidos graxos	Amostras				
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	
C 16:0	Palmítico	45	44	42	47
C 18:0	Esteárico	3	5	4	4
C 18:1	Oléico	14	13	11	14
C 18:2	Linoléico	13	10	12	13
C 18:3	Linolênico	19	20	22	17

Para assegurar a qualidade do biodiesel derivado da biomassa de microalgas, é fundamental que diversos critérios sejam cumpridos, incluindo uma concentração de ácido linolênico (C 18:3) abaixo de 12% para garantir uma estabilidade satisfatória à oxidação. Este critério é recomendado pelas Normas Europeias (EN14214) e também pode ser aplicado à produção de biodiesel no Brasil (dos Santos *et al.*, 2020). Ao analisar os dados da Tabela 5, verificou-se que as concentrações de C 18:3 em cada caso foram ligeiramente superiores, variando entre 17% e 22%.

O ácido graxo majoritário em cada experimento foi o ácido palmítico (C 16:0), com concentrações de cerca de 47%. Concentrações mais altas de C 16:0 proporcionam maior poder calorífico, maior estabilidade à oxidação e fluidez (Deng *et al.*, 2018). Contudo,

propriedades semelhantes podem ser atribuídas ao ácido esteárico (C 18:0). Apesar de uma porcentagem menor do ácido graxo C 18:0, sua presença ainda é considerada importante, pois aumenta a taxa de combustão, que é uma propriedade importante para qualquer biocombustível (Al-Lwayzy *et al.*, 2014). Portanto, o ácido oleico (C 18:1) alcançou concentrações de cerca de 11 a 14%, enquanto, o ácido linoleico (C 18:2) foi quantificado em concentrações de 10 a 13%.

É crucial destacar que os ácidos graxos primordiais, que desempenham um papel significativo na qualidade do biodiesel, foram identificados em todos os experimentos, indicando que as condições de cultivo propostas neste estudo foram bem-sucedidas na produção de biodiesel. Partindo da premissa de que este estudo tem por finalidade analisar a eficiência do tratamento de água utilizando a microalga *Spirulina platensis* e em sequência a produção de biodiesel através de sua biomassa. A partir da análise de rendimento dos experimentos realizados, observou-se que para fins de tratamento de água a *Spirulina* teve resultados significativos, no qual, dependendo do nível de tratamento desejado, da utilização e/ou destino do efluente tratado, essa microalga pode ser utilizada como tratamento primário de efluentes.

Uma vantagem significativa da produção de biodiesel a partir de microalgas em comparação com a produção de plantas oleaginosas é a capacidade das microalgas de serem cultivadas em áreas menores, sem exigir custos de água ou fertilizantes, uma vez que podem ser cultivadas em águas residuais. Além disso, as microalgas podem ser cultivadas em diferentes climas ao longo do ano, sem preocupações sazonais. Outro aspecto a considerar é o rendimento de lipídeos das microalgas, o qual pode variar dependendo da espécie, do local de cultivo e das condições de crescimento.

4 CONCLUSÃO

A água residuária da bovinocultura mostrou-se um meio de cultivo eficaz para a microalga *Spirulina platensis*. O cultivo resultou na biofixação de CO₂, com uma taxa média de 2024 mg L⁻¹ dia⁻¹, e demonstrou alta eficiência na biorremediação do efluente.

Os percentuais de remoção de DQO e DBO variaram entre 86% e 99%, e a remoção de nitrogênio amoniacal foi superior a 98%. Além disso, o fósforo foi completamente removido (100%) em todos os experimentos. A integração do cultivo com o tratamento de efluentes mostrou-se economicamente vantajosa, uma vez que elimina os custos com meio de cultivo sintético e reduz significativamente os custos operacionais do tratamento de água, tornando-o uma alternativa viável e eficiente em comparação com técnicas convencionais.

O processo de separação da biomassa pode ser otimizado com a filtração direta, reduzindo custos energéticos. Por fim, esta abordagem oferece uma solução sustentável, alinhada ao conceito de tratamento e produção simultâneos. A biomassa gerada é destinada à produção de biodiesel, um combustível de energia limpa e substituto promissor para os combustíveis fósseis. Dessa forma, o processo não apenas reduz a pressão sobre recursos naturais, mas também promove o desenvolvimento de uma economia circular.

REFERÊNCIAS

- ALMOMANI, F.; JUDD, S.; BHOSALE, R. R.; SHURAIR, M.; ALJAML, K.; KHRAISHEH, M. Intergraded wastewater treatment and carbon bio-fixation from flue gases using *Spirulina platensis* and mixed algal culture. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 124, p. 240-250, 2019.
- AL-LWAYZY, S. H.; YUSAIF, T.; AL-JUBOORI, R. A. Biofuels from the fresh water microalgae *Chlorella vulgaris* (FWM-CV) for diesel engines. **Energies**, v. 7, n. 3, p. 1829-1851, 2014.
- BRASIL. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, nº 357, de 11 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, [2005].
- BRASIL. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF: CONAMA, [2011].
- CALIXTO, C. D.; SANTANA, J. K. S.; DE LIRA, E. B.; SASSI, P. G. P.; ROSENHAIM, R.; SASSI, C. F. C.; CONCEIÇÃO, M. M.; SASSI, R. Biochemical compositions and fatty acid profiles in four species of microalgae cultivated on household sewage and agro-industrial residues. **Bioresource Technology**, v. 221, p. 438-446, 2016.
- CARNEIRO, G. A.; SILVA J. J. R.; OLIVEIRA G. A.; PIO, F. P. B. Uso de microalgas para produção de biodiesel. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 5, e1075181, 2018.
- DENG, X.; GAO, K.; ADDY, M.; CHEN, P.; LI, D.; ZHANG, R.; RUAN, R. Growing *Chlorella vulgaris* on mixed wastewaters for biodiesel feedstock production and nutrient removal. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 93, n. 9, p. 2748-2757, 2018.
- DE SOUZA, D. S.; LOMEU, A.; DE OLIVEIRA MOREIRA, O. B.; DE OLIVEIRA, MAL; DE MENDONÇA, H. V. New methods to increase microalgae biomass in anaerobic cattle wastewater and the effects on lipids production. **Biomass and Bioenergy**, v. 176, 106915, 2023.
- DOS SANTOS, M. G. B.; DUARTE, R. L.; MACIEL, A. M.; ABREU, M.; REIS, A.; DE MENDONÇA, H. V. Microalgae biomass production for biofuels in brazilian scenario: a critical review. **BioEnergy Research**, v. 14, p. 23-42, 2021.
- DOS SANTOS, M. G. B.; DUARTE, R. L.; MACIEL, A. M.; ABREU, M.; REIS, A.; DE MENDONÇA, H. V. Microalgae biomass production for biofuels in Brazilian scenario: a critical review. **Bioenergy Research**, v. 14, p. 23-42, 2020.

KUMAR, A. K; SHARMA, S.; PATEL A.; DIXIT, G.; SHAH, E. Comprehensive evaluation of microalgal based dairy effluent treatment process for clean water generation and other value-added products. **International Journal of Phytoremediation**, v. 21, n. 6, p. 519-530, 2019.

KUMAR, K.; MISHRA, S. K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M. S.; YANG, J. W. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 875-885, 2015.

KUMAR, V. R.; NARENDRAKUMAR, G.; THYAGARAJAN, R.; MELCHIAS, G. A comparative analysis of biodiesel production and its properties from Leptolyngbya sp. BI-107 and Chlorella vulgaris under heat shock stress. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 16, p. 502-506, 2018.

LAM, T. P.; LEE, T. M.; CHEN, C. Y.; CHANG, J. S. Strategies to control biological contaminants during microalgal cultivation in open ponds. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018.

MEDIPALLY, S. R.; YUSOFF, F. M.; BANERJEE, S.; SHARIFF, M. Microalgae as sustainable renewable energy feedstock for biofuel production. **BioMed Research International**, 2015.

MENDONÇA, T. A.; DRUZIAN, J. I.; NUNES, I. L. Prospecção Tecnológica da Utilização da Spirulina platensis. **Cadernos de Prospecção**, v. 5, p. 44-52, 2012.

PIORRECK, M.; BAASCH, K. H.; POHL, P. Biomass production, total protein, chlorophylls, lipids and fatty acids of freshwater green and blue-green algae under different nitrogen regimes. **Phytochemistry**, v. 23, n. 2, p. 207-216, 1984.

PITTMAN J. K.; DEAN A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 17-25, 2011.

RAJASULOCANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water-A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 4, p. 175-184, 2016.

RUAN, Y.; WU, R.; LAM, J. C.; ZHANG, K.; LAM, P. K. Seasonal occurrence and fate of chiral pharmaceuticals in different sewage treatment systems in Hong Kong: Mass balance, enantiomeric profiling, and risk assessment. **Water Research**, v. 149, n. 607-616, 2019.

SINGH, S. P.; SINGH, P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 172-179, 2014.

SOUZA, C. F. V.; MOREIRA, M. B.; BRANCO, A.; SANTOS, C. P. Microalgae as a source of protein for human nutrition: a review. **Scientia Plena**, v. 13, n. 6, p. 1-8, 2017.

TIWARI, B.; SELLAMUTHU, B.; OUARDA, Y.; DROGUI, P.; TYAGI, R. D.; BUELNA, G. Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 1-12, 2017.

WALLS, L. E.; VELASQUEZ-ORTA, S. B.; ROMERO-FRASCA, E; LEARY, P.; NOGUEZ, I. Y.; LEDESMA, M. T. O. Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 151, 107319, 2019.