

Produtividade da biomassa algal em sistemas de tratamentos de águas residuárias para reúso agrícola

Autores:

Maria Virgínia da Conceição Albuquerque

Doutora em Engenharia Ambiental, Pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido - INSA

Fabiane Rabelo da Costa Batista

Doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisadora Titular do INSA

Joelma Dias

Doutora em Engenharia Química, Pesquisadora do INSA

Ailton Alves de Carvalho

Doutor em Engenharia Agrícola, Pesquisador do INSA

Kaline Dantas Travassos

Doutora em Engenharia Agrícola, Pesquisadora do INSA

Maria das Graças Rodrigues do Nascimento

Doutora em Agronomia, Pesquisadora do INSA

DOI: 10.58203/Licuri.21724

Como citar este capítulo:

ALBUQUERQUE, Maria Virgínia da Conceição *et al.* Produtividade da biomassa algal em sistemas de tratamentos de águas residuárias para reúso agrícola. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). **Desafios globais, soluções locais: Avanços em Ciências Agrárias e Ambientais.** Campina Grande: Licuri, 2023, p. 140-152.

ISBN: 978-65-85562-17-1

Resumo

O mercado de produtos agrícola tendo na sua composição o uso de microalgas é pouco diversificado, no entanto, pode ser promissor para investimento das indústrias de produtos, podendo ser uma alternativa eficiente quanto a nutrição das plantas e garantir o sucesso necessário para a produção agrícola. Como seres fotossintetizantes, as microalgas possuem a capacidade de converter biologicamente o CO₂ presente de emissões diversas, em biomassa. Sendo assim, este bioproduto pode aumentar o crescimento das plantas atuando como um fertilizante orgânico, assimilados do tratamento de águas residuárias, e manter solos e corpos de água livres de contaminação. Diante disto, este estudo faz uma revisão sobre a produtividade da biomassa algal em sistemas de tratamentos de águas residuárias para reúso agrícola, estabelecendo conexões entre os aspectos teóricos e conceituais de caráter qualitativo. Conceitos de microalgas e suas características foram apresentados, bem como os sistemas de tratamento de águas residuárias e fatores que influenciam a produção das mesmas. Apesar do desenvolvimento de novas técnicas de produção, ainda existem limitações tecnológicas no cultivo de biomassa de microalgas, especialmente em relação à manutenção das condições e viabilidade da cultura. A combinação de fatores físicos, químicos e biológicos tem um efeito diretamente no cultivo destes microrganismos. Concluiu-se que os sistemas abertos de produção de microalgas podem ser promissores para energia, custo e biorremediação de águas residuárias, gerando uma água limpa e produzindo biomassa que por sua vez, podem ser utilizadas como biopesticidas e bioestimulante, estabelecendo assim uma agricultura mais sustentável em uma abordagem bioeconomia circular.

Palavras-chave: Microalgas. Biomassa algal. Tratamento de águas residuárias.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos insumos agrícolas a partir da utilização de microalgas para obter bioprodutos é um campo fértil e promissor para Ciência e Tecnologia Ambiental. A necessidade da inovação na agricultura, sobretudo nos insumos agrícolas, os quais são responsáveis pelo aumento na produção das culturas, se torna cada vez mais imprescindível.

As microalgas são organismos unicelulares que podem ser usadas como fonte para síntese de vários bioprodutos, dentre eles, os fertilizantes agrícolas. As vantagens do uso destes microrganismos em relação sobre outras matérias primas na composição de um determinado produto estão no fato de ser uma excelente fonte de nutrientes e ter uma capacidade de uma alta produtividade, além disso, possui uma boa captura de carbono altamente eficiente; elevado teor de lipídeos ou amido, fatores que podem favorecer a fisiologia das plantas, estimulando o crescimento e a produtividade.

No Brasil, o mercado de produtos agrícola tendo na sua composição o uso de microalgas é pouco diversificado, no entanto, pode ser promissor para investimento das indústrias de produtos agrícolas, podendo ser uma alternativa eficiente quanto a nutrição das plantas e garantir o sucesso necessário para a produção agrícola. A agricultura moderna enfrenta o enorme desafio de aumentar a produção de forma sustentável para atender às demandas da crescente população mundial (ZHANG et al., 2021). Nesse contexto, as microalgas são caracterizadas por diversas aplicações possíveis para promover a produtividade agrícola sustentável (BELLO et al., 2021). Entretanto, a ausência de um procedimento universal para sua produção, os efeitos desconhecidos de cada espécie e a falta de estudos sobre o tempo ideal e o método de aplicação, são obstáculos para sua ampla aplicação na agricultura (GITAU et al., 2022).

Diante do exposto, este estudo faz uma revisão sobre produtividade da biomassa algal em sistemas de tratamentos de águas residuárias para reuso agrícola. Sendo este um estudo de caráter qualitativo, uma vez que estabelece conexões entre os aspectos teóricos e conceituais utilizado para a discussão da temática.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo utilizou-se como metodologia, a revisão de literatura de cunho qualitativo descritivo, que possibilitou um aprofundamento sobre o tema proposto. Pautando-se em publicações contidas em livros, jornais e revistas nacionais e internacionais, direcionados a área

científica e acadêmica, sendo realizada uma busca bibliográfica por meio das seguintes bases de dados: Web of Science, Scopus e na biblioteca eletrônica Scientific Electronic Library Online (SciELO). As palavras chaves utilizadas para esta busca, foram: “microalgas”, “biomassa algal” e “tratamento de águas residuárias”, publicadas entre os períodos de 2013 a 2023.

MICROALGAS: CONCEITO, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

As microalgas convergem com a sustentabilidade da captura de carbono, especialmente através da transformação do CO₂ em O₂, bem como CO₂ e luz solar atmosférica podem ser utilizadas para o crescimento da biomassa, que é considerado sustentável (FERNÁNDEZ et al., 2021). Durante a fotossíntese, estes microrganismos fixam CO₂ em monossacarídeos ou polissacarídeos, como fonte primária de energia e como materiais estruturais e de armazenamento, respectivamente. Esta capacidade de sequestro de CO₂ é uma nova abordagem para reduzir a quantidade de CO₂ na atmosfera (HUSSAIN et al., 2021).

Entre as várias técnicas de captura de CO₂, a biofixação microalgal por fotossíntese é uma tecnologia promissora devido à eficiência desses microrganismos na transformação desse gás em compostos orgânicos, utilizando-o como nutriente no meio da cultura (DE MORAIS et al., 2019). Além disso, o processo de captura e armazenamento de carbono realizado por microalgas e cianobactérias é considerado uma biocaptura de CO₂ mais eficiente em comparação com outras tecnologias como absorção, adsorção, criogenia e separação por membranas (FERNÁNDEZ et al., 2021).

Embora as microalgas tenham a vantagem de converter CO₂ em biomassa, a eficiência do processo é uma questão crítica em comparação com as tecnologias convencionais. A otimização dos métodos de cultivo de microalgas pode intensificar o desempenho de fixação de CO₂ e reduzir a toxicidade de soluções alcalinas (SONG et al., 2019). De acordo com Bose et al. (2022), seria necessário uma alta alcalinidade (pH>10 e alcalinidade entre 1,7 g/L e 2,1 g/L) para garantir uma boa remoção de CO₂ (acima de 97%). Para melhorar a recuperação do CO₂, é necessária uma seleção de microalgas alcalófilas de crescimento rápido. Até o momento, a melhor espécie de microalgas fixadora de CO₂ descrita na literatura atual é *A. platensis* (DE MENDONÇA et al., 2022).

Estudos científicos já mostraram que polissacarídeos (carboidratos) de microalgas promovem a absorção de nutrientes, o crescimento das plantas e a tolerância ao estresse (SUN et al., 2020). A biomassa de algas possui vantagens consideráveis sobre matérias-primas tradicionais, como: Alta produtividade - geralmente de 10 a 100 vezes maior do que as culturas agrícolas tradicionais; Captura de carbono altamente eficiente; Elevado teor de lipídeos ou

amido, que podem ser utilizados para produção de biodiesel ou etanol, respectivamente; Cultivo em água do mar, água salobra ou mesmo em águas residuais e produção sobre terras não agricultáveis.

A biotecnologia de microalgas tem atraído atenção considerável pela capacidade em recuperar nutrientes e promover o tratamento, uma vez que promovem a remoção de CO₂ da atmosfera, auxiliam no tratamento terciário evitando a eutrofização dos corpos receptores, gerando assim uma biomassa com valor agregado e melhorando a sustentabilidade ambiental e econômica do tratamento de águas residuárias em um ciclo fechado, a exemplo das lagoas de estabilização.

Esta biomassa, cujas produtividades não dependem da fertilidade do solo e são menos dependentes da pureza da água, são passíveis de cultivo bem sucedido em águas não potáveis, servindo para remediar efluentes urbanos, agropecuários e industriais. Logo, o cultivo comercial de microalgas desponta, desta maneira, como uma alternativa sustentável para a integração de diferentes cadeias produtivas (ALVAREZ et al., 2021).

SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS X BIOMASSA ALGAL

Os sistemas de tratamento de esgoto visam à remoção de matéria orgânica e nutrientes com a finalidade de proteger os corpos aquáticos dos efeitos deletérios advindos do descarte das águas residuárias sem tratamento, no entanto, tais sistemas podem ainda buscar a recuperação de nutrientes e a obtenção de produtos de valor agregado (BECKINGHAUSEN et al., 2020).

Dentre os diversos sistemas de tratamento, a utilização de lagoas de estabilização permite a recuperação de recursos, através da biomassa das algas que concede a reutilização e o direcionamento para outras atividades. No entanto, esta tecnologia ainda necessita de avanços de forma a difundir sua aplicabilidade e potencial de biorremediação para os mais variados tipos de águas residuárias, uma vez que não são econômicas e apresentam o problema de geração de lodo enorme que novamente acarreta um custo ambiental, se torna necessária uma mudança de paradigma de “usar e descartar - linear” para uma abordagem “usar, tratar e reutilizar - circular” para reciclar as águas residuais (PADRÓN et al., 2020).

A presença de nutrientes, N e P no esgoto serve como um meio de baixo custo para as microalgas, sendo uma alternativa ao atual processo de tratamento de abordagem sustentável, eficiente e ecologicamente correta. Tal método de remediação é benéfico, pois os nutrientes, N e P das águas residuais são assimilados na biomassa de microalgas como biofertilizantes. Isso reduz o problema de descarte de esgoto e controla ainda mais a dependência de fertilizantes minerais (VUPPALADADIYAM et al., 2018).

A atividade do fitoplâncton por unidade de biomassa e as respostas à luz é de importância fundamental para o conhecimento dos processos e mecanismos que controlam a transferência de energia e o ciclo de matéria orgânica nas lagoas de estabilização. Considerando que o próprio efluente contém microalgas e cianobactérias já adaptadas àquelas condições, e que essa comunidade pode variar com o efluente e suas características, variação temporal, composição taxonômica e crescimento das populações autóctones no efluente se faz necessário avaliar a concentração.

FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE MICROALGAS

Como seres fotossintetizantes, as microalgas possuem a capacidade de converter biologicamente o CO₂ presente em emissões diversas em biomassa, apresentando como resultado desse processo a produção de oxigênio (O₂). Sendo assim, a biomassa pode aumentar o crescimento das plantas atuando como um fertilizante orgânico e de liberação lenta para fornecer nutrientes, assimilados do tratamento de águas residuárias, e manter solos e corpos de água livres de contaminação com cargas severas de nutrientes (ALVAREZ et al., 2021; FERREIRA et al., 2021).

O reflexo da crescente da atenção direcionada às microalgas é o surgimento de um novo nicho tecnológico que possui, como uma das maiores potencialidades a ser explorada, a possibilidade de integração entre sistemas de cultivo para produção de biomassa e o tratamento de emissões diversas, com a principal vantagem de aumentar a produtividade dos sistemas, aliada ao aspecto ambiental da redução de poluentes na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) (SUN et al., 2020).

Apesar do desenvolvimento de novas técnicas de produção ainda existem limitações tecnológicas no cultivo de biomassa de microalgas, especialmente em relação à manutenção das condições e viabilidade cultura. A combinação de fatores físicos, químicos e biológicos tem um efeito diretamente no cultivo de microalgas, pois pode favorecer ou impedir crescimento. Os fatores biológicos estão relacionados com o metabolismo celular e a presença de contaminantes no sistema, enquanto fatores físicos e químicos relacionadas com a luz, temperatura, pH e disponibilidade de fontes de carbono e outros nutrientes (MORENO-GARCIA et al., 2017).

FATORES BIOLÓGICOS

Metabolismo celular

A viabilidade do uso de biofilmes para acúmulo de compostos de interesse biotecnológico e focado no desenvolvimento de fotobiorreatores que facilitam a formação e a raspagem do biofilme formado. Tipo de substrato, pH, turbulência do líquido, espécie de microalga e presença de bactérias influenciam na adesão das células. Alguns desses fatores são mais importantes na adesão inicial, como o substrato e a presença de um filme de bactérias, outros são mais importantes na manutenção e aumento da espessura do biofilme, como o pH, a turbulência e o formato da célula de microalgas (WANG et al., 2018). Estudos mostram que a diferentes espécies de microalgas são capazes de acumular maiores teores de carboidratos, proteínas, lipídeos e pigmentos, além de aumentar a taxa de consumo de nitrogênio e CO₂ (HUANG et al., 2016; PENG et al., 2020, SUN et al., 2020) quando cultivadas em sistemas com a formação de biofilmes, a exemplo do uso de sistemas compactos de reator UASB + Lagoas de estabilização. Aprimorar esse método e associá-lo a obtenção de produtos da biomassa de microalga úmida pode ser um caminho que viabilize a produção de bioprodutos.

Presença de contaminantes

O cultivo em larga escala de microalgas deve ser realizado continuamente monitorar a contaminação. Mesmo em fotobiorreatores, as culturas estão expostas a várias fontes de contaminação que contêm microrganismos indesejados. A poluição pode ser considerada uma questão muito problemática produção de biomassa e pode ameaçar a disponibilidade de bioprodutos desejados. Alguns microrganismos têm um efeito negativo no crescimento microalgas porque podem promover a formação de biofilmes sujo e corrosivo (ZERIOUH et al., 2017). No cultivo de microalgas, biofilme se forma nas paredes de tubos ou placas de fotobiorreatores, de forma que impeça a passagem da luz (BELOHLAV et al., 2020). Além disso, pode ser liberado substâncias que dependendo do(s) microrganismo(s) presente compostos, reduzem o crescimento das mesmas.

FATORES FÍSICO-QUÍMICOS

Configuração e Sistema de Mistura

Atualmente, são encontrados diversos estudos sobre agregado a microalgas, em distintas configurações de reatores, como reatores de fluxo contínuo, em fotobiorreatores em bateladas únicas, ou em fotobiorreatores com bateladas sequenciais e até mesmo em lagoas de alta taxa.

A estrutura de construção de sistemas abertos influencia diretamente a produção de biomassa e a eficiência de absorção de nutrientes, dado que a profundidade dessas lagoas que pode variar e favorecer a penetração da luz no meio líquido para o crescimento de microalgas. Por sua vez, o sistema de mistura também é de fundamental importância, por promoverem a transferência de massa que viabiliza a passagem de luz até o fundo da lagoa para que as células tenham crescimento otimizado e, ainda, servem para evitar gradientes de temperatura ou nutrientes, aglomerado de células e sedimentação (GALÈS et al., 2020).

Intensidade da Luz

A luz é utilizada como principal fonte de energia nas reações fotoquímicas e afeta diretamente o desempenho das microalgas nas lagoas de alta taxa. Nas plantas superiores e microalgas verdes, a coleta da luz fotossintética ocorre nas membranas tilacóides e nos cloroplastos, nos quais a luz é capturada por complexos especializados de pigmentos. A penetração da luz é expressa como porcentagem da radiação que invade a superfície do licor misto nas lagoas de alta taxa, por exemplo. Simultaneamente, coexistem a zona clara e a zona escura; assim, a referida radiação representa o volume iluminado fornecido com a luz e o volume escuro não iluminado, este último, por sua vez, não contribui para a atividade fotossintética (SIVAKAMINATHAN et al. 2020).

Um outro fator pode também alterar uma série de funções biológicas desses microrganismos, é a alta incidência dos mesmos, bem como levar a mortalidade, diferenciação celular, crescimento e desenvolvimento das células, alteração na produtividade e na pigmentação, metabolismo enzimático, entre outros (RASTOGI et al., 2020).

Os sistemas abertos geralmente absorvem luz eminente para garantir que cultivo de microalgas aloque a luz de forma constante e assim as células de microalgas cresçam para conversão eficiente em biomassa (VUPPALADADIYAM et al., 2018). Fatores como a profundidade da lagoa e a dispersão de sólidos também afetam a disponibilidade de luz, do mesmo modo que elevadas intensidades de luz também podem causar foto inibição e diminuir o crescimento de microalgas (RAEISOSSADATI et al., 2019).

No estudo conduzido por Sivakaminathan et al. (2020), a aplicação de guias de luz em lagoas de alta taxa levou a um aumento na produtividade de biomassa de microalga por área de lagoa em 3,9 vezes e, segundo esses autores, os principais efeitos observados depois do fornecimento das guias luminosas foram uma maior distribuição de luz, um aumento na eficiência de conversão de fótons, uma diminuição em zonas escuras e, ainda, menores perdas respiratórias.

Temperatura

A análise das variações de temperatura e seleção de espécies tolerantes para sistemas abertos se faz importante ao processo, visto que a temperatura é um fator importante para o crescimento de microalgas, com crescimento ideal entre 25 e 35 °C (ZHUANG et al., 2018).

Estudos apontam que, temperaturas além da faixa indicada levam a danos celulares e inibição do crescimento, e que as espécies marinhas de microalgas são as mais suscetíveis a esses danos. Por conta das configurações estruturais dos sistemas abertos, a temperatura se torna um fator de difícil controle por depender da taxa de evaporação local, do período de luz solar, das condições do ar circundante, da localização geográfica e da estação do ano. Baixas temperaturas em decorrência desses fatores ambientais se tornam desfavoráveis para a atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (RuBisCo) - a enzima mais abundante em plantas que influencia diretamente na taxa de fotossíntese. Em comparação, temperaturas mais elevadas tendem a impedir a taxa metabólica e a solubilidade de CO₂ no meio, situação que leva a enzima RuBisCo a se ligar ao O₂ livre e, por isso, causar processos de fotorrespiração que podem reduzir de 20 a 30% a taxa de bioconversão de carbono no sistema (DOLGANYUK et al., 2020).

Concentração de CO₂ e Mudanças de pH

A absorção de CO₂ proveniente da atmosfera não é suficiente para suprir a exigência de carbono para o crescimento de microalgas em sistemas abertos, especificamente em intervalos diferentes de melhor irradiação (JO et al., 2020). Com isso, em sistemas abertos, o fornecimento de CO₂ depende de vários fatores como o pH, coeficiente de transferência de massa, existência de sistema de mistura, tipo de aspersor, e tempo de contato gás-líquido. Em sistemas abertos, o oxigênio dissolvido se acumula devido à menor transferência de oxigênio produzido na fotossíntese para o ecossistema. Este acúmulo de oxigênio pode também levar à inibição da fotossíntese em muitas espécies de microalgas que resulta em foto-oxidação quando sob altas faixas de irradiação (BANERJEE e RAMASWAMY, 2017).

Por sua vez, o pH é um fator eminente que define a produtividade da biomassa em sistemas abertos, de modo que diferentes meios podem variar de pH 6 a 8,76, que é a faixa preferida por espécies de microalgas para crescerem (JERNEY e SPILLING, 2018). Nessa faixa, um pH intracelular de 7,5 mantém viável o crescimento ideal de microalgas, no entanto, valores elevados de pH resultam em variações nos processos celulares que causam o colapso das culturas de células. Para tanto, o sistema de aeração deve ser compilado com controle de pH pela adição de produtos químicos alcalinos nas microalgas (TABATABAEI et al., 2020).

Disponibilidade de Nutrientes

O crescimento e desenvolvimento de microalgas requer certos nutrientes inorgânicos, como N, C, P, K, Mg e S, bem como a presença de sais a depender da espécie de microalga. Assim, a indisponibilidade de nutrientes é um fator de estresse que leva a diminuição da produção e do acúmulo de lipídios, bem como a diminuição da divisão e crescimento celular. Ou seja, se faltam nutrientes no meio de cultivo, mas há luz e CO₂ suficientes, as microalgas produzem mais ácidos graxos que, por sua vez, são convertidos em acilgliceróis ao invés de indesejáveis lipídios em membrana ou outros compostos (ISHIKA et al., 2017; ZHUANG et al., 2018).

Carbono, nitrogênio e fósforo são os principais nutrientes limitantes para o crescimento destas microalgas. Durante o crescimento fotoautotrófico, o carbono necessário para o crescimento desses organismos é fornecido principalmente na forma de CO₂. Por outro lado, na fase de absorção do CO₂, o OH normalmente se acumula no meio, devido à dissociação do HCO₃. (BANERJEE e RAMASWAMY, 2017).

MICROALGAS NA COMPOSIÇÃO DE INSUMOS AGRÍCOLAS

Apesar das limitações para produção deste biocomposto, as microalgas já estão sendo utilizadas como insumos agrícolas ou até mesmo para revestimento na conservação de algumas culturas. Pode-se citar estudos como o de Dias et al. (2019), que avaliando a biomassa de microalgas via raiz sob a produção de mudas de Maracujá amarelo, verificaram que as doses influenciaram o número de folhas, massa fresca da raiz, massa seca da raiz, comprimento da parte aérea e massa fresca da parte aérea significativamente.

Trabalhando com o aproveitamento de *Chlorella* sp. como o bioestimulante na germinação de sementes de melão (*Cucumis melo* L.), Lima e colaboradores (2020), verificaram que a modulação do cultivo de *Chlorella* sp. é uma viável estratégia para a produção de compostos ativos. Além disso, os hidrolisados de *Chlorella* sp. demonstraram um potencial bioestimulante e pode ser uma fonte de moléculas para muitas aplicações na agricultura.

O teor mineral de cálcio, ferro, potássio, magnésio, manganês e fósforo no espinafre tratado com algas de água doce, *Chlorella* sp., foi maior em comparação com o não tratado (KIM et al., 2018). O mesmo estudo concluiu que o rendimento da cebolinha chinesa tratada com a mesma microalga foi 18,3% maior do que o não tratado. Seus resultados indicaram que os fertilizantes de microalgas são bioestimulantes eficientes e econômicos para melhorar o crescimento das plantas e a qualidade da cebolinha chinesa e do espinafre na fazenda orgânica estudada.

Estudando o revestimento de *Spirulina platensis* para conservação de romã, Oliveira et al., (2020) verificaram que o revestimento com 1% dessa microalga proporcionou os melhores resultados, retardando o desenvolvimento da cor, aumentando brilho, mantendo os teores de açúcares e ácido ascórbico e reduzindo a adstringência.

Analisando a produção de mudas de mamão com *Spirulina platensis* como um bioestimulante aplicado na folha e raiz, Guedes et al., (2018) verificaram que 1,08% de *S. platensis* aplicadas na raiz proporcionaram o melhor crescimento e produção de biomassa das mudas.

Desta forma, a utilização de microalgas oferece um grande benefício para uma agricultura sustentável, uma vez que são produtos naturais, que contêm uma diversidade de substâncias que estimulam o crescimento e a produtividade das culturas promovem a atividade microbiana e melhoraram os nutrientes do solo. absorção pelas raízes. Além disso, conferem às plantas resistência efetiva ao estresse abiótico, pois contêm substâncias com alta atividade antioxidante (PADRÓN et al., 2020).

CONCLUSÕES

Os efluentes domésticos e industriais representam um impacto ambiental de grande relevância, uma vez que a alta carga orgânica pode gerar a eutrofização de rios, se não tratado adequadamente. Por essa razão, o emprego de tratamentos, cultivos e manutenção de microalgas como ferramenta para biorremediação se apresenta como uma das principais potencialidades de processos biotecnológicos para obtenção de bioprodutos.

As microalgas são um importante recurso inexplorado com grande potencial no setor agrícola, e pesquisas devem ser conduzidas para potencializar sua utilização. Conforme a literatura apresentada, os biofertilizantes à base de algas mostraram benefícios significativos no desenvolvimento da agricultura. O fato de os biofertilizantes de algas poderem ser produzidos como subprodutos metabólicos durante os processos de tratamento de águas residuárias, torna-os fontes renováveis para a agricultura sustentável.

Assim, os sistemas de microalgas podem promissores para energia, custo e biorremediação de águas residuárias, gerando água limpa e produzindo biomassa que podem ser utilizadas como bioestimulante orgânico, estabelecendo assim uma agricultura mais sustentável em uma abordagem de bioeconomia circular.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, A.L., WEYERS, S.L., GOEMANN, H. M., PEYTON, B. M., GARDNER, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, v. 54, 102200, 2021.
- BANERJEE, S.; RAMASWAMY, S. Dynamic process model and economic analysis of microalgae cultivation in open raceway ponds. *Algal Research*, v. 26, p. 330-340, 2017.
- BECKINGHAUSEN, A., ODLARE, M., THORIN, E., & SCHWEDE, S. (2020). From removal to recovery: An evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater. *Applied Energy*, 263(October 2019), 114616.
- BELLO, A.S., SAADAOU, I., BEN-HAMADOU, R. (2021). "Beyond the Source of Bioenergy": Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Agronomy*, v. 11, n. 8, 2021.
- BELOHLAV, V. et al. Effect of hydrodynamics on the formation and removal of microalgal biofilm in photobioreactors. *Biosystems Engineering*, v. 200, p. 315 - 327, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.10.014>.
- BOSE, A., O'SHEA, R., LIN, R., MURPHY, J.D. (2022). Optimisation and performance prediction of photosynthetic biogas upgrading using a bubble column, *Chemical Engineering Journal*, Volume 437, Part 1, 2022, 134988, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134988>
- DE MENDONÇA, H.V., OTENIO, M.H., MARCHÃO, L., LOMEU, A., DE SOUZA, D.S., REIS, A. (2022). Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production, *Science of The Total Environment*, Volume 824, 2022, 153838, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153838>.
- DE MORAIS, M.G., DE MORAIS, E.G., DUARTE, J.H., DEAMICI, K.M., MITCHELL, B.G., COSTA, J.A.B. (2019). Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 35, a.n. 78, 2019.
- DIAS, G. A.; ARAÚJO, R. H. C. R.; ALVES, W. G.; OLIVEIRA, A. M. F. DE; SOUSA, D. D. A. DE; LIMA, J. F. DE; SANTOS, I. DE M.; ALVES, K. DE A.; SOUSA, D. D. A. DE; ARAÚJO, J. L. Biomass of Microalgae via Root Under the Production of Yellow Passionfruit Seedlings. *Journal of Agricultural Science*; v.11, n.6; p.105-112, 2019.
- DOLGANYUK, V.; BELOVA, D.; BABICH, O.; PROSEKOV, A.; IVANOVA, S.; KATSEROV, D.; PATYUKOV, N.; SUKHIKH, S. Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. *Biomolecules*, v. 10, n. 8, p. 1153, 2020.
- FERREIRA, A., MELKONYAN, L., CARAPINHA, S., RIBEIRO, B., FIGUEIREDO, D., AVETISOVA, G., GOUVEIA, L. (2021). Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, v. 4, 2021.

GALÈS, A., RUANO, M. V., SIALVE, B., FERRER, J., & STEYER, J. P. (2020). Microalgae-bacteria consortia in high-rate ponds for treating urban wastewater: Elucidating the key state indicators under dynamic conditions. *Journal of Environmental Management*, 261, 2020.

GITAU, M.M., FARKAS, A., ÖRDÖG, V., MARÓTI, G. (2022). Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (*Solanum lycopersicum*), *Journal of Cleaner Production*, Volume 364, 2022, 132689, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132689>.

HUANG, Y. et al. Comparison of *Chlorella vulgaris* biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide. *Bioresource Technology*, v. 222, p. 267-373, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.099>.

HUSSAIN SHADID, et al. Arsenic and heavy metal (Cadmium, lead, mercury and nickel) contamination in plant-based foods. *Plant and Human Health*, v. 2, 2019. p. 447-490. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03344-6_20.

ISHIKA, T.; MOHEIMANI, N. R.; BAHRI, P. A. Sustainable saline microalgae co-cultivation for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 356-368, 2017.

JERNEY, J.; SPILLING, K. Large Scale Cultivation of Microalgae: Open and Closed Systems. *Methods in Molecular Biology*. [S. l.]: Springer New York, 2018. p. 1-8.

JO, S.-W.; DO, J.-M.; NA, H.; HONG, J. W.; KIM, I.-S.; YOON, H.-S. Assessment of biomass potentials of microalgal communities in open pond raceways using mass cultivation. *PeerJ*, vol. 8, p. e9418, 2020.

LIMA, J. F. DE; QUEIROZ, A. J. DE M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; SOUZA, W. R. DE; DEBONSI, H. M.; SANTOS, V. F. DOS; DANTAS, A. M. N.; ARAÚJO, R. H. C. R. Utilization of *Chlorella* sp. as biostimulant in the germination of melon seeds (*Cucumis melo* L.). *Journal of Agricultural Studies*, v.8, n.2, p.750-773, 2020.

MORENO-GARCIA et al. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 493 - 506, 2017.

PENG, Y-Y. et al. Simultaneous removal of nutrient and sulfonamides from marine aquaculture wastewater by concentrated and attached cultivation of *Chlorella vulgaris* in an algal biofilm membrane photobioreactor (BFMPBR). *Science of the Total Environment*, v. 725, p. 138524, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138524>.

RAEISOSSADATI, M.; MOHEIMANI, N. R.; PARLEVLIE, D. Luminescent solar concentrator panels for increasing the efficiency of mass microalgal production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 47-59, 2019.

RASTOGI, R. P., MADAMWAR, D., NAKAMOTO, H., & INCHAROENSAKDI, A. (2020). Resilience and self-regulation processes of microalgae under UV radiation stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 43, 100322.

SIVAKAMINATHAN, S.; WOLF, J.; YARNOLD, J.; ROLES, J.; ROSS, I. L.; STEPHENS, E.; HENDERSON, G.; HANKAMER, B. Light guide systems enhance microalgae production efficiency in outdoor high-rate ponds. *Algal Research*, v. 47, p. 101846, 2020.

SONG, C., LIU, Q., QI, Y., CHEN, G., SONG, Y., KANSHA, Y., KITAMURA, Y. Absorption-microalgae hybrid CO₂ capture and biotransformation strategy—A review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 88, 2019, Pages 109-117, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.06.002>.

SUN, Y. et al. Optimizing light distributions in a membrane photobioreactor via optical fibers to enhance CO₂ photobiochemical conversion by a *Scenedesmus obliquus* biofilm. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 59, p. 21654-21662, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03854>.

TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; VALIJANIAN, E.; KAZEMI SHARIAT PANAHI, H.; NIZAMI, A.-S.; GHANAVATI, H.; SULAIMAN, A.; MIRMOHAMADSADEGHI, S.; KARIMI, K. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1392-1407, 2020.

VERMA, P. GOSWAMI, R. K.; MEHARIYA, S.; OBULISAMY, P. K.; Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review. *Bioresource Technology*, vol. 320, p. 124301, 2021.

VUPPALADADIYAM, A. K.; PRINSEN, P.; RAHEEM, A.; LUQUE, R.; ZHAO, M. Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 12, n. 2, p. 304-324, 2018.

ZERIOUH, O. ET AL. Biofouling in photobioreactors for marine microalgae. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 37, p. 1006-1023, 2017. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1299681>.

ZHANG, Y., XIAO, Z., AGER, E., KONG, L., TAN, L. (2021). Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, Volume 1, Issue 1, 2021, Pages 58-66, ISSN 2772-5669, <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>.

ZHUANG, L.-L.; YU, D.; ZHANG, J.; LIU, F.; WU, Y.-H.; ZHANG, T.-Y.; DAO, G.-H.; HU, H.-Y. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 1110-1119, 2018.