



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



LAUANA RODRIGUES

**APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DE CULTIVO DE MICROALGAS VERDES COM
VISTAS À BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES E PRODUÇÃO DE BIOATIVOS**

UBERLÂNDIA

2022

LAUANA RODRIGUES

**APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DE CULTIVO DE MICROALGAS VERDES COM
VISTAS À BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES E PRODUÇÃO DE BIOATIVOS**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros

UBERLÂNDIA

2022

APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DE CULTIVO DE MICROALGAS VERDES COM
VISTAS À BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES E PRODUÇÃO DE BIOATIVOS

Aprovada a monografia da disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso de Lauana
Rodrigues apresentada à Faculdade de
Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia (MG) pela banca
examinadora formada por:

Uberlândia, 16 de agosto de 2022.

Prof.^a Dr.^a Fabiana Regina Xavier Batista

Eng. Me. Igor Geraldo Fiuza Costa

Resumo

Percebe-se na atualidade a mudança ideológica em direção a linhas de processos, produtos, economia e políticas mais sustentáveis e ecologicamente corretas, em detrimento da até então prática imprudente de geração de resíduos e uso indiscriminado de combustíveis fósseis. Com vistas a corroborar com essa nova realidade, impulsionada ainda mais pelo cenário pandêmico, a biotecnologia potencial das microalgas verdes vem protagonizando cada vez mais setores devido a sua versatilidade. Com essa motivação, este trabalho de caráter de revisão bibliográfica buscou reunir informações de diversos estudos quanto a aplicabilidade das microalgas. Quanto a isso, percebe-se a capacidade metabólica intrínseca destes microrganismos na produção e absorção de compostos de interesse, sejam eles substâncias orgânicas de diferentes grupos funcionais, bioativos, nutrientes ou ainda metais pesados. A pluralidade de funções das microalgas pode ser reflexo das diversas espécies existentes ao redor do globo, o que significa que existe tanta diversidade metabólica quanto adaptativa em se tratando das microalgas. Tornando as microalgas alternativas viáveis no tratamento de efluentes, atuando na biorremediação de águas residuais pela remoção de nutrientes e de metais pesados do meio, agindo isoladamente ou em simbiose. Por outro lado, alguns dos compostos da biomassa microalgal podem ser usados em processos geradores de biocombustíveis de terceira geração, ou mesmo as próprias microalgas podem promover ativamente por via bioquímica a produção de biocombustíveis. Atenta-se, neste trabalho de revisão, para os fatores que regem a eficiência destas aplicações biotecnológicas, e os obstáculos na busca por viabilidade econômica e por projetos de larga escala. Apresentando também resultados obtidos por trabalhos já desenvolvidos e pesquisas bibliográficas para melhor vislumbre do contexto das microalgas.

Palavras-chave: biotecnologia; microalgas; biocombustíveis; bioativos; biorremediação.

Abstract

Currently, the ideological shift towards more sustainable and ecologically correct lines of processes, products, economy and policies is perceived. For that, frivolous practice of waste generation and indiscriminate use of fossil fuels should be avoided. In order to corroborate this new reality, driven even more by the pandemic scenario, the biotechnology potential of green microalgae has been starring in more and more sectors due to its versatility. With this motivation, this bibliographic review work sought to gather information from several studies regarding the applicability of microalgae. In this regard, we can see the intrinsic metabolic capacity of these microorganisms in the production and absorption of compounds of interest, whether organic substances from different functional groups, bioactives, nutrients or even heavy metals. The plurality of microalgae functions may be a reflection of the various species existing around the globe, which means that there is as much metabolic and adaptive diversity in the case of microalgae. It makes them viable alternatives in the treatment of effluents, acting in the bioremediation of wastewater by removing nutrients and heavy metals from the medium, alone or in symbiosis. On the other hand, some of the microalgal biomass compounds are used in third-generation biofuel generating processes, or even the microalgae themselves can actively biochemically promote the production of biofuels. Therefore, attention in the factors that govern the efficiency of these biotechnological applications are verified. In addition, the obstacles in the search for economic viability and large-scale projects are also investigated. Finally, the findings obtained by works already developed and bibliographic research for a better glimpse of the context of microalgae.

Keywords: biotechnology; microalgae; biofuels; bioactives; bioremediation.

Agradecimentos

Sou imensamente grata aos meus guias, que sempre estiveram caminhando comigo, me fortalecendo e instruindo, mesmo quando eu acreditava estar sozinha e mesmo quando eu não tinha clareza para ouvir.

Agradeço de coração e alma à minha família, que sabe até demais das minhas angústias e lutas desde os primeiros passos na Engenharia Química, e espero orgulhá-la da mesma maneira com que me apoiam e amam incondicionalmente. Meu amor é imperfeito, mas mesmo assim é de vocês.

Meus mais sinceros, e talvez desesperados, agradecimentos à minha orientadora Prof.^a Dr.^a Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros. Sem você eu ainda estaria procurando o caminho para começar! Obrigada por toda confiança, instrução e transparência. Foi uma honra tê-la como orientadora. Espero ter correspondido às expectativas.

Meu obrigada à banca avaliadora, a que tenho orgulho de ter pessoas que contribuíram em peso na minha trajetória acadêmica e de pesquisa. Agradeço às oportunidades e ao acolhimento que me ofereceram no decorrer da Iniciação Científica.

Não deixo de fora meus amigos, que me aguentaram durante toda a graduação e ainda me tiravam sorrisos nos dias mais difíceis.

Por fim, agradeço à Faculdade de Engenharia Química da UFU, por toda instrução e crescimento que me proporcionou.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos Gerais	3
1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Natureza bibliográfica e organização do trabalho	3
2 Fundamentação teórica e contextualização.....	5
2.1 Histórico da produção de águas residuais	5
2.2 Classificação e caracterização dos efluentes	8
2.3 Combustíveis fósseis e crise energética	12
3 Microalgas	16
3.1 Definições gerais	16
3.2 Tecnologias de cultivo	18
3.3 Aplicação comercial das microalgas	21
4 Microalgas no tratamento de efluentes	25
4.1 Mecanismos de biossorção de metais pesados.....	25
4.2 Resultados de remoção de metais pesados por microalgas - Revisão.....	29
4.3 Remoção de nutrientes.....	34
4.4 Resultados de remoção de nutrientes por microalgas - Revisão	42
5 Microalgas na produção de biocombustíveis	45
6 Considerações finais.....	47
Referências	48

1 Introdução

Em uma visão geral, as algas podem ser descritas como organismos fotossintetizantes que integram diversos nichos aquáticos naturais, incluindo tanto corpos d'água doce quanto de água salgada (MORCELLI, 2021). Porém, não se restringem apenas a ambientes naturais, como também a uma variedade de efluentes e meios de cultura definidos. Deste grande grupo, divide-se em macroalgas e microalgas, sendo as últimas o foco do presente estudo, caracterizando-se como microrganismos unicelulares.

Por sua vez, as microalgas possuem clorofila e outros pigmentos fotossintéticos, a partir dos quais executam fotossíntese oxigênica. E, além disso, englobam seres com estrutura celular dos tipos procariótica e eucariótica (DERNER, 2006), sendo que as microalgas verdes, em função de sua pigmentação, compõem o grupo das eucarióticas *Chlorophyceae* (DOS SANTOS, 2017).

Nota-se a aplicação das algas, e aqui inclui-se as microalgas verdes, na alimentação humana desde vários séculos atrás, o que pode ser exemplificado pelos povos Astecas, que cultivavam microalgas como *Spirulina* e *Chlorella vulgaris* (SILVA, 2006). Esta relação se estreitou ao longo dos anos e permitiu aprimoramento no uso destes organismos na indústria alimentícia atual. Sob este aspecto, verifica-se que as microalgas apresentam efeitos positivos não somente na alimentação humana, mas também na produção de ração animal, como suplemento. Segundo Bertoldi, Sant'anna e Oliveira (2008), as microalgas são bastante utilizadas como suplementos dietéticos humanos e aplicadas em aquicultura com ótimos resultados em alimentação de peixes.

Esta aplicação, em grande parte, se deve à composição química das microalgas, que possuem um alto teor de proteínas, somado à presença de aminoácidos essenciais aos humanos e animais (SPOLAORE, 2006). O que evidencia biomoléculas de interesse comercial na indústria alimentícia.

Por esta razão, é realizado o cultivo de microalgas por diversas empresas, porém as técnicas simples são as mais optadas, visto que, na maioria das vezes, os sistemas de cultivo são a céu aberto em condições naturais de luminosidade e temperatura, com mínimo controle destas variáveis. Em alguns dos casos, em contrapartida, faz-se uso de fotobiorreatores, visando uma melhor produtividade e rigor no controle dos parâmetros (DERNER, 2006).

Além do emprego das microalgas no setor alimentício, pode-se observar também aplicações nas indústrias farmacêutica, química e cosmética, abarcando áreas da nutrição e da saúde. Neste quesito, justifica-se o uso das mesmas por meio de comprovação biomédica de benefícios microalgais como possível ação antitumoral, atenuação de úlceras gástricas, e ações preventivas contra aterosclerose e hipercolesterolemia (RODRIGUES, 2019).

Conjuntamente, existe a contribuição biotecnológica das microalgas no âmbito sustentável, contribuindo com propostas promissoras na atenuação de problemas ambientais de cunho energético e tratamento de efluentes. O que, dada a realidade de desafios problemáticos quanto ao abastecimento de alimentos e energia, à escassez e segurança de água e à proteção ambiental, representa soluções, ou mesmo atenuações destes problemas (BATISTA, 2015).

Com relação ao tratamento de efluentes, verifica-se o uso das microalgas na biorremediação de metais pesados e também de nutrientes como nitrogênio, fósforo e azoto. Simbioticamente, pode-se citar a aplicação das microalgas em lagoas fotossintéticas em Portugal, nas quais as microalgas interagem com bactérias, fornecendo oxigênio para estas, de forma a melhorar a eficiência da degradação de matéria orgânica das águas residuais, tornando mais rápida a remoção de nutrientes causadores de eutrofização (DINIS, 2004).

Apesar do exemplo com relação de simbiose, já é comprovada a capacidade das microalgas de reduzir a quantidade de nutriente dos meios, devido a necessidade metabólica desses microrganismos. Nesse processo, a matéria orgânica e nutritiva presente no meio, podendo ser algum tipo de efluente, é consumida pela microalga, promovendo sua perpetuação e multiplicação. O que indica, em segundo plano, o aumento de biomassa, acarretando a produção de ácidos graxos, pigmentos e isótopos bioquímicos estáveis, ou seja, bioprodutos de elevado valor comercial (SPOLAORE, 2006).

A biorremediação de metais pesados de efluentes por meio das culturas de microalgas utilizam outro mecanismo, adsorção, no qual incorporam os metais à sua parede celular (SILVA, 2006). Justifica-se essa capacidade de incorporação com a carga elétrica superficial negativa associada às células das microalgas, que resulta em uma afinidade com os metais pesados, normalmente na forma de cátions (DINIS, 2004).

Partindo, então, para a potencialidade bioenergética das microalgas, tem-se a possibilidade de produção de biodiesel, bioetanol, biometano e ainda bio-hidrogênio, em uma sequência de processos associados às demais aplicações das microalgas, a que se nomearia biorrefinaria de microalgas (REIS, 2013). Entretanto, os estudos realizados até agora, por falta de catalogação ou mesmo levantamento de dados experimentais quanto a exploração das diversas culturas de microalgas, indicam que o maior desafio na produção de biocombustíveis pelas microalgas, se deve ao elevado custo de aplicação das técnicas (DELRUE, 2016). O que torna a técnica uma potencialidade a ser investigada, e que traria muitos benefícios sobre os problemas ambientais enfrentados.

Tendo em vista a relevância científica e socioambiental do cultivo microalgal, o presente trabalho, então, visa revisar e reunir os dados e estudos realizados até agora quanto a aplicação biotecnológica das microalgas.

1.1 Objetivos Gerais

Realizar um levantamento bibliográfico acerca das técnicas de cultivo de diferentes microalgas verdes e suas potencialidades na produção de bioenergia, no tratamento de efluentes e produção de biomoléculas de interesse comercial.

1.2 Objetivos Específicos

- Efetuar um levantamento quanto a caracterização metabólica das algas em sua aplicabilidade biotecnológica.
- Investigar diferentes técnicas de cultivo das microalgas em estudo.
- Estudar a produção de biomoléculas de valor comercial por diferentes microalgas.
- Avaliar a viabilidade da aplicação das algas no tratamento de efluentes, por meio de biorremediação de metais pesados e nutrientes.
- Realizar um estudo sobre o potencial bioenergético das microalgas.

1.3 Natureza bibliográfica e organização do trabalho

O presente trabalho possui caráter de revisão bibliográfica sistemática descritiva, especificamente de natureza integrativa. A qual assume uma seleção

criterosa e antecipada do material científico de pesquisa e estudo, diversificando a literatura consultada, e que irá analisar a qualidade metodológica utilizada nos estudos, sejam eles pesquisas primárias ou revisões teóricas, e de caráter quanti e qualitativo (MATTOS, 2015).

Como sugerido pela terminologia, a revisão integrativa cunha-se por meio de uma integração de teses, definições e compreensões provenientes de demais pesquisas, contribuindo para um entendimento mais amplo e claro de um dado campo ou fenômeno de estudo (BOTELHO *et al.*, 2011), uma vez que complementa conclusões e resultados já evidenciados por estudos de credibilidade comprovada cientificamente.

Dessa forma, a reunião bibliográfica utilizada no trabalho foi buscada em bancos de dados científicos tais como Scholar Google, Portal de Periódicos da Capes, Scielo, *Research Gate* e demais plataformas de material científico que possam comprovar procedência confiável dos dados. Assim, os estudos utilizados na compilação deste trabalho foram selecionados de acordo com os tópicos de interesse do mesmo, atentando-se para o grau de observação e apuração de cada um a fim de se esclarecer e assimilar o máximo possível acerca dos temas.

A organização desta monografia foi feita em 6 capítulos. Quanto a distribuição do conteúdo exibido nesta revisão, o Capítulo 1, introdutório, atenta-se para a relevância científica do tema e os conceitos básicos e motivadores do mesmo, delimitando os objetivos do estudo. Também abrange as diretrizes adotadas na redação e no método de pesquisa, e a estrutura proposta para seu desenvolvimento.

No Capítulo 2, optou-se pela abordagem inicial de contextualização das problemáticas ambientais e sociais responsáveis pela justificativa do estudo biotecnológico das microalgas. Por meio da contextualização, intenta-se esclarecer a relevância das soluções biotecnológicas propostas por investigações científicas realizadas e evidenciar a sua aplicabilidade. Nesse sentido, e vislumbrando o que será detalhado a frente, são tratadas no Capítulo 2 a dinâmica da geração de efluentes e águas residuais, a contaminação por metais pesados e suas consequências, e a problemática energética que confirma a necessidade de fontes sustentáveis de energia.

Em seguida, o Capítulo 3 reúne informações sobre as microalgas, trazendo um panorama geral quanto a esses microrganismos e introduzindo suas classificações básicas. Em seguida, serão discutidas as tecnologias de cultivo de biomassa e os

principais meios empregados. Somado a esses tópicos, é tratado o potencial de comercialização de microalgas e seus produtos nutricionais e pigmentares. Com vistas a demonstrar a lucratividade e funcionalidade das microalgas por si só, e a importância de métodos de otimização de cultivo.

Dando sequência a valorização das microalgas, o Capítulo 4 traz a aplicação biotecnológica desses microrganismos no tratamento de efluentes. Primeiro, no campo de adsorção de metais pesados por meio de biossorção. Segundo, na remoção de nutrientes tais como nitrogênio (N) e fósforo (P). Quanto a isso, são feitas duas abordagens distintas: remoção por metabolismo microalgal, e remoção por ação simbiótica – em que as microalgas atuam em favor de outros microrganismos responsáveis pela remoção em proporções maiores. É discutido ainda neste Capítulo 4, a atuação das microalgas na redução da demanda química e biológica de oxigênio (DQO e DBO, respectivamente), e no monitoramento de qualidade de águas.

O Capítulo 5, por sua vez, apresenta os dados quanto a atuação de microalgas na geração de bioenergia. E por fim, o Capítulo 6 compreende as considerações finais acerca da revisão bibliográfica realizada.

2 Fundamentação teórica e contextualização

2.1 Histórico da produção de águas residuais

Um dos recursos mais substanciais responsáveis pela ocorrência e manutenção de total biodiversidade presente no planeta é sem dúvidas a água. É sabido que a água é um recurso indispensável para a sobrevivência humana, e, mais do que isso, essencial para o desenvolvimento tecnológico e dinâmica produtiva no mundo. Apesar da aparente abundância, já se tornou evidente que a disponibilidade hídrica destinada ao consumo é restrita a uma pequena porcentagem potável, motivo pelo qual, segundo Mansour *et al.*, 2020, a água também atende por “Ouro Azul”. Porém, esta taxa potável aproximada de 3% de água na Terra tem sofrido ainda maiores reduções ao longo do tempo, em decorrência majoritária das ações antropológicas que afetam não apenas a própria humanidade, mas todo o ecossistema global.

Estas interferências de natureza humana passaram a ganhar maior potencial de impacto através de uma série de estímulos verificados no século XVIII. Com a

culminância da Revolução Industrial, junto ao crescimento demográfico e a propagação do cultivo irrigado, a demanda de água também aumentou (CAVALCANTE e SILVA, 2011, DA COSTA e DE BARROS JÚNIOR, 2005), propiciando um cenário futuro de crise de escassez de água. Nesse sentido, com a crescente atuação industrial o uso de tecnologias agrícolas de irrigação, que tornassem mais eficientes e práticas o cultivo; as maiores oportunidades de trabalho em centros urbanos, contribuindo para o êxodo rural; e ainda as cadeias produtivas em desenvolvimento colaboraram para a necessidade cada vez maior de água, seja para abastecimento da população, ou da exigência em manufatura e cultura.

Essa nova realidade, em que uma maior quantidade de água é utilizada, leva a uma outra subsequente, em que maior também será a quantia de água residuária produzida e, logo, devolvida para as fontes hídricas superficiais (ARCHELA *et al.*, 2003). Diante deste quadro, percebe-se os primórdios da problemática de poluição e contaminação dos mananciais aquáticos. De acordo com Schagerl (2022), esse cenário urbano do século XVIII, pioneiramente europeu, promoveu o estabelecimento das primeiras estações de águas residuais municipais, perdurando até a atualidade um tratamento de efluentes constituído por etapas preliminares de processos físicos ou mecânicos e, finalmente, pela etapa de tratamento por processos biológicos, geridos principalmente por consórcios bacterianos heterotróficos.

Desde então, o desenvolvimento exponencial das tecnologias como um todo, sobretudo desde a década de 1960, estimulado pelas mudanças de paradigma socioeconômicas do cenário pós-guerra, tornou os incentivos ao consumo indiscriminado e o fomento monetário à indústria ainda mais intensificados nos centros urbanos em rápida expansão (ARCHELA *et al.*, 2003). Este agravamento de realidade sobrecarregou a demanda dos recursos hídricos superficiais, tais como rios, lagos e lençol freático, levando, como esperado, a uma maior e mais acelerada degradação dos mesmos.

O contexto atual é responsável, por sua vez, pela produção de efluentes industriais, domésticos e agroindustriais, cada qual com diferentes características de composição e impacto ambiental, classificadas dessa maneira de acordo com os processos de origem das águas residuárias. Como sugerido pela designação, os efluentes domésticos são aqueles oriundos de instalações residenciais, incluindo hotéis, bares, clubes, comércios e centros comerciais e de serviços, e constituem-se essencialmente por fezes, restos alimentares, sabões e detergentes. Sendo assim

contaminados, em suma, por bactérias e substâncias recalcitrantes (ARCHELA *et al.*, 2003).

Por sua vez, os industriais são provenientes dos diferentes processos industriais. Devido a isso, a caracterização dos efluentes industriais varia conforme os âmbitos da cadeia processual de cada estabelecimento, podendo estar contaminados por constituintes orgânicos e inorgânicos e também metais pesados. De forma geral, ambas categorias são ricas em nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, em diferentes proporções. Por fim, as águas residuárias agroindustriais provêm de instalações industriais de processamento de alimentos botânicos, a exemplo fábricas de óleo vegetal. Conforme pesquisa de Aditya *et al.* (2022), diferenciam-se dos domésticos pelo teor de nutrientes como nitrogênio e fósforo contido, usualmente maior nos efluentes agroindustriais.

Considerando a carga de nutrientes, metais pesados e compostos variados presente nos efluentes, pode-se ter uma ideia básica da interferência de seu despejo fora de conformidade normativa. Assim, as problemáticas alarmantes quanto escassez e qualidade de água tornaram-se públicas, atentando para as consequências em saúde, sustentabilidade e economia. Com isso, a rigidez da legislação ambiental seguiu este mesmo padrão, estrategicamente se elevando, em concordância com as medidas de gestão sustentável recomendadas nas diversas agendas científicas, sociais e políticas ao redor do globo (ABDEL-RAOUF, AL-HOMAIDAN e IBRAHEEM, 2012).

Diante das inúmeras situações de precariedade e dispersão de doenças em consequência da má qualidade das águas em várias regiões do mundo (DA COSTA e DE BARROS JÚNIOR, 2005), tais eventos de cunho emergencial no combate às causas desses problemas, tem motivado e recorrido a novas formas de tratamento de efluente e mesmo até de reaproveitamento dos mesmos, com vistas a interagir e solucionar impasses de ordem social, ambiental e econômica. Uma das formas de modificações nas etapas de tratamento de águas residuais, seria a introdução de consórcios de microalgas na fase de processos biológicos, onde majoritariamente as bactérias são aplicadas

Não apenas úteis na tarefa de redução de nitrogênio e fósforo dos efluentes devido ao metabolismo fotoautotrófico a mixotrófico, como também na biossorção de metais pesados e aumento de oxigênio dissolvido, as algas tornam-se potenciais soluções sustentáveis em alternativas de tratamento.

Aplicado em conjunto a outras biotécnicas, o cultivo de microalgas em efluentes já tem sido estudado e oferecido bons resultados na redução desejada de nutrientes em águas residuais, não somente domésticos, mas também “laticínios, suinocultura, refino de petróleo, águas residuais têxteis e digeridos líquidos de resíduos orgânicos agroindustriais e municipais”, conforme pesquisa realizada por Schagerl *et al.* (2022). Evidenciando também uma possível agregação de valor aos processos devido ao crescimento paralelo de células microalgais de interesse comercial.

2.2 Classificação e caracterização dos efluentes

Como evidenciado no tópico anterior, a classificação dos efluentes varia conforme procedência do mesmo. Assim, a mais generalizada categorização abrange efluentes dos tipos domésticos, industriais e agroindustriais. Além dessas denominações, há ainda trabalhos científicos e normas regulamentadoras que fazem uso de outra categoria, os efluentes municipais, ou ainda chamados de comunitários. No caso das águas residuárias municipais, segundo consta em normas do Ministério do Meio Ambiente e da Luta contra Alterações Climáticas de Québec (2022), além dos constituintes de atividades domésticas recorrentes, há possibilidade de uma parcela de efluentes de origem industrial. Em suma, os efluentes municipais podem ser considerados aqueles de origem urbana, englobando além do efluente doméstico, possíveis traços de resíduos industriais.

Com relação aos efluentes domésticos, são compostos por águas de despejos de sanitários, e das chamadas águas cinzas, oriundas de cozinhas, casas de banho, lavanderias, e demais atividades domiciliares, públicas ou não, além dos banheiros (KHANAM e PATIDAR, 2022). Nesse sentido, o montante é constituído em grande parte por dejetos humanos, produtos de limpeza e desinfetantes variados, restos alimentícios e mesmo pesticidas. A parcela de microrganismos encontrada nestes tipos de efluente tem origem majoritária nos excrementos humanos (GIORDANO *et al.*, 2004).

Essa composição microbiológica dos efluentes domésticos é formada particularmente por vírus, bactérias e protozoários, sendo que grande parte é inócua à saúde humana e ainda conveniente na etapa biológica de tratamento de efluentes. Apesar dessa microbiota inofensiva, de acordo com o trabalho de Abdel-Raouf, Al-Homaidan e Ibraheem (2012), esses despejos inevitavelmente incluem

microrganismos patogênicos, geralmente depositados por indivíduos doentes, contaminados ou portadores sintomáticos, tornando as águas residuais fontes infecciosas de bactérias, como as causadoras de cólera e tuberculose, vírus de hepatite e protozoários agentes de desintéria. A eliminação desses patogênicos é estimada pela eficiência da remoção de coliformes fecais.

Por conta da origem desses despejos, as águas residuais domésticas – e municipais em maioria – possuem, por via de regra, uma demanda química de oxigênio (DQO/L) menor que efluentes industriais, contando com uma porcentagem de nutrientes equivalente à de meios de cultura sintéticos, a serem citados: BG-11 e TAP, e, apesar da possível patogenicidade desses efluentes, as taxas de substâncias químicas venenosas é bastante baixa (KUMAR *et al.*, 2022). Com essa caracterização nutricional e ausência de baixas taxas de contaminantes químicos, constituem um meio adequado no tratamento à base de microalgas.

A elevada quantidade de nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) nos efluentes domésticos, segundo Giordano *et al.* (2004), é oriunda dos dejetos humanos, porém há uma grande contribuição por parte dos produtos saneantes, por exemplo detergentes e amaciantes de roupas. E além dos constituintes já mencionados nas águas residuais domésticas, também pode-se complementar acerca do caráter orgânico e inorgânico. A saber, os componentes orgânicos presentes nos efluentes domésticos, responsáveis majoritários da fonte de carbono, são normalmente proteínas, açúcares, óleos e gorduras, os próprios microrganismos, sais orgânicos e inclusive substâncias de produtos de limpeza (VON SPERLING, 1996).

Ainda de acordo com Von Sperling (1996), já a contribuição inorgânica nas águas residuais domésticas são sais, usualmente compostos por cátions de sódio, cálcio, potássio, ferro e magnésio, e ânions cloretos, nitratos, fosfatos e sulfatos. Dito isso, associa-se a capacidade já averiguada das microalgas de processar formas mineralizadas de nitrogênio e fósforo, ou seja, nitrato e amônia, e fosfato somada também a capacidade de metabolizar substâncias de carbono variadas, tais quais simples carboidratos e moléculas complexas (DELRUE *et al.*, 2016).

Dessa maneira, fica evidente que apesar das características básicas de proveniência e composição dos efluentes domésticos, a caracterização minuciosa dos mesmos depende de diversos fatores intrínsecos a cada comunidade geradora. Justamente por depender do estilo e padrão de vida daquela população, bem como

das estatísticas de pirâmides etárias (SHAIKH e AHAMMED, 2020). Em outras palavras, conforme a fração populacional de cada faixa etária, e de cada gênero, pode haver influência nos perfis de águas cinzas geradas.

Da mesma forma, e isso aplica-se também às demais categorias de efluentes, as tecnologias utilizadas e os hábitos culturais em cada comunidade, interagindo com a demanda estipulada pelo estilo de vida, também alteram as características particulares de cada efluente (KHANAM e PATIDAR, 2022). Pois isso interfere nos tipos de produtos mais usados pelos residentes, nas tecnologias de tratamento e na logística de abastecimento de água. Tornando cada efluente particular, e um reflexo sociocultural.

Agora tratando dos efluente industriais, fica evidente que a variedade das tecnologias produtivas, e ainda das práticas mais empregadas de limpeza na manutenção das linhas de processo são capazes de diversificar os efluentes. Diferentemente dos efluentes domésticos, que possuem uma caracterização em termos de proveniência mais estrita, os efluentes industriais abrangem todo o tipo de águas residuais produzidas pelo setor industrial. E visto que a indústria cobre diversas áreas e instâncias produtivas, cada uma possui atributos diferentes, tornando vastas as possíveis composições dos efluentes.

Genericamente, cita-se como as principais provedoras dos efluentes industriais as indústrias farmacêutica, química, petrolífera, papel e celulose, têxtil, cosmética, de curtume e várias outras manufatureiras (TKACZYK, MITROWSKA e POSYNIK, 2020). Essa classe de águas residuais é geralmente mais veloz na produção de efluente, sendo estes caracterizados por DQO/L e DQO/L mais elevadas, bem como, comparado com os domésticos, um nível mais alto de toxicidade e mais baixo de nutrientes (N e P) (DELRUE *et al.*, 2016).

A toxicidade dos efluentes industriais está em grande parte associada à presença de produtos nocivos, como corantes, metais pesados, aromáticos, fenóis, compostos orgânicos voláteis, fluorados ou clorados. E devido a diversidade quali e quantitativa dos efluentes industriais, as características de cada um são ditadas em suma pela concentração de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), DBO, DQO, total de metais pesados, pH, turbidez, cor, e parâmetros biológicos pertinentes ao setor industrial (KUMAR *et al.*, 2022).

A pesquisa realizada por Mansour *et al.* (2020) contabilizou a porcentagem de trabalhos científicos acerca de poluentes orgânicos detectados em efluentes. De

acordo com o exposto por tal pesquisa, aproximadamente 77% dos trabalhos abordam o impacto de corantes e tratamentos propostos para sua remoção das águas, seguidos pelos compostos fenólicos (9%), farmacêuticos (3%) e pesticidas (3%).

Essa porcentagem exorbitante, demonstra, dentre os contaminantes orgânicos, a preocupação da comunidade científica a respeito dos compostos colorantes, indicando o potencial danoso que os corantes podem ter se despejados inadequadamente. Diante disso, dentre as diferentes indústrias envolvidas na produção e manejo destas substâncias, destacam-se a têxtil, de papel, de plásticos, de corantes alimentícios e para drogarias, e ainda a de produção de tintas e lacas (ARUTSELVAN *et al.*, 2022).

Destas mencionadas, a têxtil é uma das que mais possui artigos dedicados à caracterização. Assim sendo, a revisão feita por Vasconcelos *et al.* (2022) indicou que majoritariamente, além dos corantes, as águas residuais produzidas no decorrer do processamento têxtil são contaminadas por uma mistura bastante tóxica de metais, amaciantes, detergentes, e uma variedade de substâncias químicas perigosas – como soda cáustica, carbonato de sódio, sais e outros aditivos –, levando a elevadas DBO, DQO, alcalinidade, salinidade e taxas de nitrogênio total.

Especificamente, os grupos químicos responsáveis pela coloração nas indústrias têxteis são os cromóforos – dentre eles temos o grupo azo, carbonil e quinóide –, que em alguns casos também atuam em conjunto com os auxocromos – grupamentos amina, carboxila, sulfonato e hidroxila (BIDU *et al.*, 2021). A fim de demonstrar o potencial de risco dos efluentes descartados inadequadamente, exemplifica-se com o caso estudado por De Lima *et al.* (2007), que evidenciou altos níveis de mutagenicidade em *Salmonella* causados em parte pela contribuição de corante azo oriundo de indústria têxtil.

Dessa forma, exemplificando com a variedade de compostos poluentes e contaminantes possível de se encontrar em águas residuais de um único setor industrial, pode-se ter uma dimensão da complexidade característica dos efluentes industriais como um todo. Com particularidades a depender da tecnologia e insumos utilizados no processo, bem como da própria natureza da indústria.

Por fim, a categoria de efluentes agroindustriais é aquela proveniente das inúmeras atividades agrícolas, principalmente pautadas em processamento de produtos agrícolas ou alimentação animal. Dentre esses, cita-se descarga de criadouros, lixiviados de compostagem de biomassa ou estrume, águas residuais de

processamento de alimentos, de matadouros, de lavagem de cavalos – ou outras espécies animais, e de lavagem de ovos, não sendo restritas a apenas estas operações mencionadas (MUHMOOD *et al.*, 2019). Com destaque para os efluentes de operações de laticínios, bovinos, suínos e avícolas, a carga de nutriente dessas águas residuais é bastante alta, o que corrobora para o cultivo de biomassa microalgal nas mesmas.

2.3 Combustíveis fósseis e crise energética

O setor energético, em todo o mundo, é extremamente arraigado pela dependência dos combustíveis fósseis, sobretudo o petróleo, o carvão e o gás natural, de tal forma que a elevada demanda por esses recursos tem comprometido suas reservas existentes. A previsão feita até então sobre o uso destes combustíveis indica a escassez em um futuro próximo, indicando uma possível crise energética derivada do esgotamento desses recursos não renováveis.

O aumento da demanda por combustíveis fósseis está atrelado principalmente ao aumento da industrialização, em especial, em países emergentes, onde se nota uma taxa crescente de aquisição de veículos próprios e a redução da velocidade nas vias de trânsito, sendo uma consequência direta desses fatores o crescente gasto com combustíveis (RODRIGUES, 2020). Juntamente ao aumento do consumo de combustíveis fósseis, a repercussão dos efeitos negativos de seu uso vai se tornando mais evidente, e cada vez mais dissertada.

Isso se deve aos impactos prejudiciais do emprego de combustíveis fósseis, que englobam desde os processos de obtenção, extração e produção até a combustão dos mesmos. A serem citados: derramamentos de águas residuais oriundos da exploração de petróleo nos oceanos, contaminação atmosférica, com emissões de gases do efeito estufa (GEE) em grandes quantidades e erosão do solo, sem mencionar as decorrências que esses diversos danos podem ter sobre as comunidades humanas, fauna e flora de uma maneira geral (BUENO, 2010, ARUTSELVAN *et al.*, 2022).

Esses infortúnios da utilização de combustíveis fósseis agridem diretamente a natureza e a saúde pública e animal, prejudicando fontes hídricas, intoxicando o ar com a emissão de substâncias nocivas como óxidos de carbono, de nitrogênio e de enxofre, hidrocarbonetos – alguns com potencial cancerígeno, e partículas suspensas

inaláveis. Esses males, além de diretamente impactar no equilíbrio do sistema ecológico e afetar as comunidades sociais em termos sanitários, podem também prejudicar a qualidade de culturas agrícolas e da vegetação no geral, provocar deterioração de bens culturais de lazer, agravar intensamente o efeito estufa, levando a alterações climáticas pavorosas (AZUAGA *et al.*, 2000, RODRIGUES, 2020).

Os perigosos efeitos, principalmente da combustão, das fontes não renováveis de energia já haviam sido documentadas a bastante tempo, porém as estratégias de se combater os prejuízos e mesmo até desenvolver medidas adaptativas para uma economia sustentável não foi incentivada ou apoiada pelos governos e grandes indústrias (WRIGHT, NYBERG e BOWDEN, 2021). Ainda segundo o trabalho de Wright e coautores (2021), houve inclusive uma negação climática, o que provocou um atraso nas ações de mitigação de emissões atmosféricas e de reversão do quadro climático alarmante.

Recentemente, com o advento da pandemia de Covid-19, houve uma mudança de paradigma quanto aos investimentos no setor energético. Como resultado das quarentenas, *lockdowns*, restrição de viagens e de transportes públicos, bem como de atividades culturais, houve uma queda na demanda energética ao redor de todo o mundo, gerando um desequilíbrio no setor energético (GOLLAKOTA e SHU, 2022). Como resultado, houve uma diminuição nos investimentos em combustíveis como um todo, porém, apesar deste declínio, foi evidenciado que os investimentos em energia limpa superaram os de combustíveis fósseis em 2020 após o cenário pandêmico (CHEN *et al.*, 2022).

Segundo demonstrado por WAN *et al.* (2021), esta queda na demanda de energia no primeiro trimestre de 2020 chegou a 3,8%, explicitando em especial uma baixa procura por carvão, petróleo e gás natural, enquanto proporcionalmente a demanda por energias renováveis seguiu a tendência oposta, e ultrapassou a procura dos fósseis.

Essa mudança na tendência do mercado financeiro provocada pelo coronavírus, revela um cenário onde fez-se ouvir as inúmeras vozes requisitando, por necessidade, a transição inadiável para um futuro baseado em energia limpa. Evidenciando um protagonismo cada vez mais crescente do ativismo climático, em busca da manutenção da estabilidade do setor energético e incentivo de economia sustentável, esses estudos mostram o grande potencial de uma recuperação verde

do setor energético após a pandemia (WRIGHT, NYBERG e BOWDEN, 2021, WAN *et al.*, 2021).

É muito importante salientar que essa transformação na dinâmica energética está atrelada aos demais problemas humanitários e ecológicos já mencionados neste trabalho. Os desafios expostos até então – quanto a escassez e qualidade de água, abastecimento alimentar e energético, e a manutenção equilibrada do ambiente e clima do globo – estão conectados, já que as causas dinâmicas de cada um estão sustentando umas às outras, e por esse motivo, as ações corretivas também devem estar em concordância (BATISTA *et al.*, 2015).

Nesse sentido, fica claro que o aumento da participação de energia limpa no mundo pode ajudar na possível crise energética e climática. Porém, apesar do investimento em eficiência energética limpa, deve-se ter em mente que as particularidades de cada país ou região ao redor do mundo afetam a viabilidade de algumas alternativas de energia mais comuns, como solar e eólica. Respectivamente, essas fontes de energia dependem diretamente do período de luminosidade solar, e propensão a ventos, características geográficas que não se aplicam igualmente a todos os locais da Terra (RODRIGUES, 2020).

Por isso a importância de se explorar diversas formas de energia limpas e renováveis, bem como a sua eficiência energética. Assim, uma das formas de bioenergia mais comuns e mais pesquisadas atualmente é a de biomassa, em que os processos de produção de combustíveis e geração de energia envolvem basicamente processamentos termoquímicos e bioquímicos de biomassa. O que abrange pirólise, liquefação termoquímica, gaseificação e hidrogenação, e fermentação e digestão anaeróbica (KUMAR *et al.*, 2022).

Dentre as principais vantagens da energia de biomassa sobre as demais formas de energia renovável, pode-se elencar o alto potencial energético, conversão e facilidades com relação ao armazenamento e transporte (RODRIGUES, 2020). À vista disso, a energia de biomassa pode ser utilizada para produzir biodiesel, um combustível promissor na substituição dos fósseis, que a depender de sua origem é classificado como de primeira, segunda ou, ainda, terceira geração. As oleaginosas constituíram a fonte do biodiesel de primeira geração, enquanto os resíduos agrícolas da segunda, e além dessas, as microalgas são aceitas como fonte para a terceira geração de biodiesel (GAO *et al.*, 2022).

Já especificamente quanto às vantagens possibilitadas pelo emprego de microalgas na geração de bioenergia e biocombustíveis, destaca-se o fato de as culturas microalgais não competirem com a produção de alimentos, taxa de crescimento mais alta se comparada com as culturas terrestres – cerca de 5 a 10 vezes mais rápida que as de culturas alimentares convencionais –, sequestro de dióxido de carbono (CO₂), possibilidade de cultivo em águas residuais e redução das pegadas ambientais (ADITYA *et al.*, 2022, GONDI *et al.*, 2022).

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Show (2022), enquanto na pandemia de Covid-19 em 2022 o mercado global de cultivo de microalgas foi orçado em US\$ 3,4 bilhões, foi feita uma projeção para o ano de 2027, em que se espera que este mercado seja estimado em US\$ 4,6 bilhões, baseado em uma alta taxa de crescimento. Essa valorização do mercado de microalgas é consequência dos potenciais biotecnológicos já percorridos neste presente trabalho, e ainda da versatilidade comercial das microalgas.

Dentre os países e blocos econômicos mais incisivos quanto a valorização e exploração das aplicabilidades microalgais estão o Japão e a União Europeia. Quanto ao incentivo ao uso de microalgas, o objetivo central do governo japonês está na redução: da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de CO₂, além da orientação de suas comunidades à cultura da reciclagem e da educação no combate às alterações climáticas. Já nos países da União Europeia, sustentavelmente, visa-se com a aplicação de microalgas proteger a biodiversidade e promover uma economia circular (SHOW, 2022).

Esses incentivos estão se expandindo para os demais países, conforme os estudos e viabilidade da biomassa de microalgas na produção de bioenergia e biocombustíveis vem sendo comprovados e otimizados. Segundo Cheirsilp e Maneechote (2022), a partir das microalgas pode-se obter bioetanol de fração de carboidratos, biodiesel de fração lipídica, biogás e biohidrogênio de biomassa total ou biomassa residual após a extração de lipídios. Além desses, há também a possibilidade de se conseguir biometano, e outros combustíveis de hidrocarbonetos, tais como combustível JP-8, e combustíveis de aviação sustentáveis (BATISTA *et al.*, 2015, ADITYA *et al.*, 2022).

Portanto, a averiguação biotecnológica das microalgas em termos de energia é justificada, demonstrando já comprovadamente as diversas opções de biocombustíveis alternativos, que podem auxiliar no processo de transição mundial

para um setor energético sustentável e limpo, bem como em um possível cenário de crise energética por escassez de fontes não-renováveis.

3 Microalgas

3.1 Definições gerais

Em se tratando das definições características das microalgas, bem como de sua classificação, é importante frisar que o termo em si não expressa uma denominação taxonômica, já que o grupo constituinte das microalgas é polifilético. O que implica na detecção de diversos filos no grande grupo das microalgas, sendo que os representantes podem pertencer a pelo menos cinco grandes linhagens eucarióticas e a um importante grupo procariótico (WOJCIECHOWSKI *et al.*, 2013, DERNER *et al.*, 2006).

Devido a diversidade de espécies, ainda é desconhecida a quantidade total existente no globo, estimada na ordem de muitos milhares. Associada a esta vasta multiplicidade, as microalgas podem se apresentar em diferentes formas e tamanhos, comumente compreendidos entre 2 e 50 μm (ELISABETH, RAYEN e BEHNAM, 2021). De tal modo que a pluralidade microalgal é responsável pela produção de diversos compostos, porém não ainda totalmente averiguados e catalogados, vários com aptidão mercadológica, e alguns de caráter tóxico – inclusive para o ser humano, o que evidencia o versátil potencial produtor destes microrganismos a ser explorado em pesquisas futuras (DERNER *et al.*, 2006).

Em razão da variedade de espécies de microalgas, a classificação das mesmas em categorias varia conforme diversos critérios. De acordo com o exposto por Wojciechowski *et al.* (2013), a mais comum e adotada classificação se baseia nos tipos de pigmentos, natureza química dos produtos de reserva e constituintes da parede celular. Porém não se limitando a somente estes padrões, diferentes estudos também têm levado em consideração os aspectos citológico e morfológico, o que inclui avaliar a ocorrência de células flageladas, a estrutura deles, processos de geração do núcleo e de divisão celular, a caracterização (caso exista) do envoltório de cloroplastos.

Com base na divisão mais usual das microalgas, temos as *Cyanophyta* e *Prochlorophyta*, ambas com estrutura celular procariótica, e as *Chlorophyta*,

Euglenophyta, *Rhodophyta*, *Haptophyta*, *Heterokontophyta*, *Cryptophyta* e *Dinophyta*, essas de estrutura celular eucariótica (HOEK *et al.*, 1995).

A depender da fonte de carbono e energia utilizada pelas microalgas, seu metabolismo pode ser denominado foto-autotrófico, heterotrófico, mixotrófico ou ainda foto-heterotrófico (DOS SANTOS, 2017). Este caráter multimetabólico das microalgas favorece para que possam ser encontradas em diversos tipos de *habitats* aquáticos, marinhos ou de água doce, abrangendo lagos, lagoas, rios e até os efluentes, como já indicado anteriormente (MORCELLI, 2021).

A observação de microalgas em diferentes ambientes indica também um alto potencial de adaptabilidade, sendo que muitas espécies conseguem se manter e multiplicar em condições extremas, em termos de luminosidade, temperatura, salinidade e pH (DOS SANTOS, 2017). Além disso, o seu cultivo pode ser efetuado isoladamente, apenas com as cepas de microalgas, ou ainda simbioticamente, manifestando relação de cooperação com outros organismos, em especial bactérias (MOREIRA, 2014, MORCELLI, 2021).

De modo geral, o grupo das microalgas se caracteriza pela natureza fotossintetizante bastante eficaz. Nesse sentido, o metabolismo é semelhante ao das plantas, apesar das distinções estruturais e morfológicas. Sendo que esses microrganismos atuam de forma a converter luz solar, CO₂ e nutrientes em biomassa. O diferencial das microalgas reside em sua estrutura celular simplificada e caráter aquático, levando a uma eficiência fotossintética maior do que aquela alcançada pelas plantas terrestres, podendo esta eficiência ser de 10 a 50 vezes maior (BARATA, 2016, PIGNOLET *et al.* 2013).

De fato, a contribuição microalgal na realização de fotossíntese é notável, representando cerca de 40% da fotossíntese global (ELISABETH, RAYEN e BEHNAM, 2021). Esse processo biológico é realizado pelas organelas cloroplastos, estes que são um conjunto de membranas lipoproteicas com fase aquosa ou estroma (matriz semifluida) e diversos pigmentos coletores de luz. Destes, as microalgas possuem clorofila do tipo a como pigmento fotossintético primário, porém possuem outros tipos de clorofila bem como carotenoides, ficocianina e ficoeritrina, que atuam como pigmentos acessórios (WOJCIECHOWSKI *et al.*, 2013, ELISABETH, RAYEN e BEHNAM, 2021).

O metabolismo das microalgas, pautado em suma na fotossíntese, é responsável por uma contribuição bastante rica na base da cadeia alimentar,

desempenhando papel de produtores primários – a que se atribui aproximadamente 60% de toda a produção primária da Terra – e de fonte de oxigênio, servindo produtos necessários para o metabolismo de consumidores (DERNER *et al.*, 2006, WOJCIECHOWSKI *et al.*, 2013)

3.2 Tecnologias de cultivo

A tecnologia de cultivo de microalgas é bastante diversa, e vem sendo desenvolvida e otimizada de inúmeras formas, na tentativa de se tornar mais viável econômica e sustentavelmente, bem como elevar os níveis de produtividade e crescimento de biomassa microalgal. A escolha da tecnologia e sistema de cultivo, é muito dependente da espécie que se deseja desenvolver, bem como da finalidade do cultivo (YAP *et al.*, 2021).

No cultivo de microalgas, é importante se ter em mente que a proliferação de uma população é produto da interação entre fatores biológicos e físico-químicos. Quanto ao aspecto biológico, se diz estarem atrelados às particularidades metabólicas próprias das espécies de interesse no cultivo, além de demais organismos que possam influenciar o crescimento microalgal (DERNER *et al.*, 2006). Já com relação aos fatores físico-químicos, estão incluídos parâmetros como temperatura, luminosidade, disponibilidade de nutrientes, nível de pH e salinidade (SHOW, 2022).

Por esse motivo, durante a escolha do sistema de cultivo são levados em consideração fatores climáticos e externos (ARUTSELVAN *et al.*, 2022), típicos de cada região ou país. Diante disso, existem diversas configurações possíveis para um sistema de cultivo, e para melhor visualização e assimilação das alternativas já propostas e aplicadas, este trabalho elaborou um fluxograma, apresentado conforme Figura 1, que ilustra as ramificações das possíveis categorias e classificações de técnicas e sistemas de cultivo, com base nas informações e discussões dos trabalhos referenciados no presente tópico 3.2 desta monografia.

É possível notar que as duas categorias mais amplas de cultivo são quanto a mobilidade dos microrganismos, podendo ser sistemas suspensos ou imobilizados.

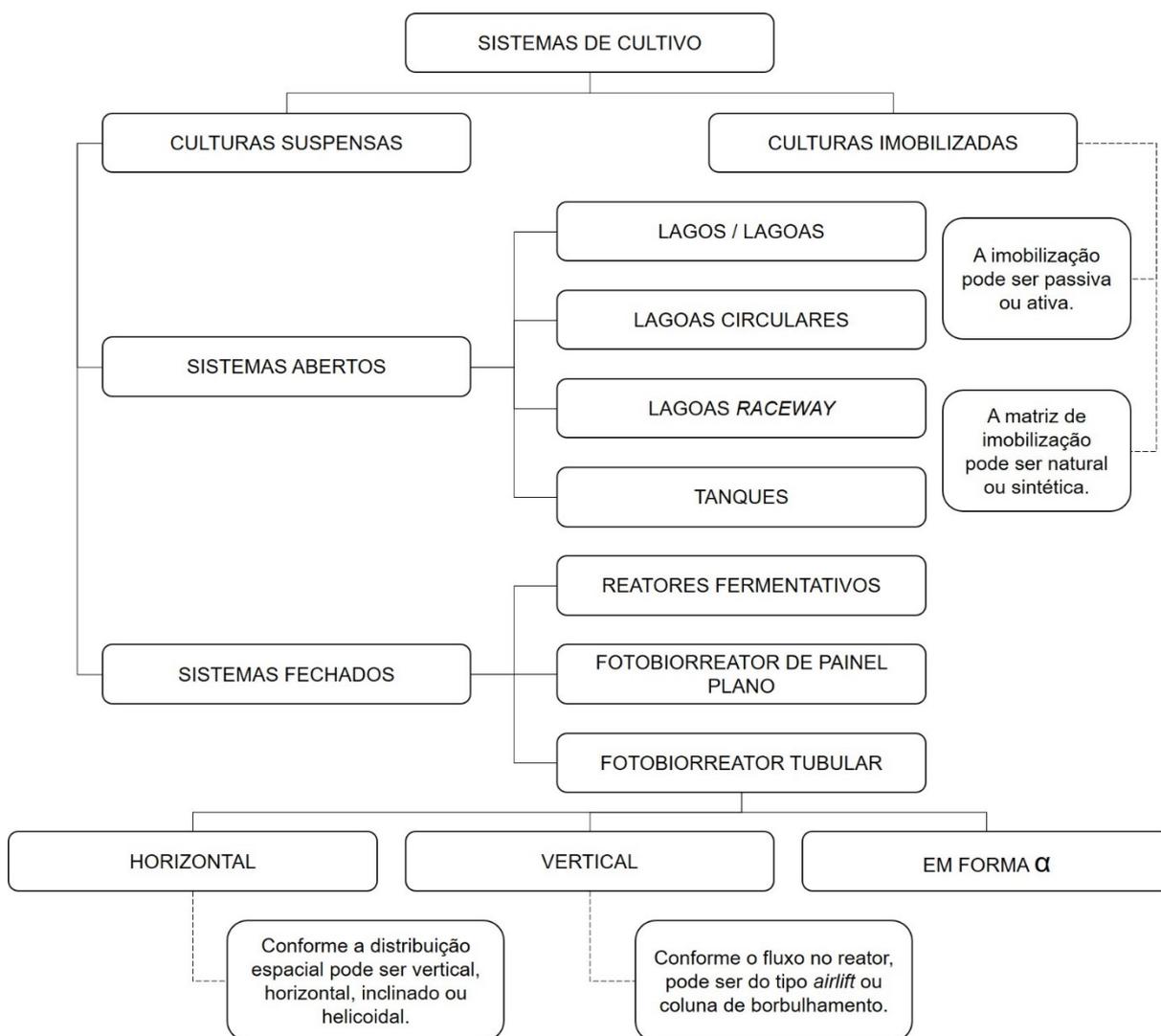


Figura 1 - Classificação dos sistemas de cultivo de microalgas.

Nos sistemas imobilizados, as microalgas de interesse são fixadas a um meio sólido que as imobiliza, contudo, permitindo trocas de substrato e de produtos pelos poros do material matriz (DOS SANTOS, 2017). Esse material em que as microalgas são fixas podem ser de carácter natural, como ágar, ou sintético, como superfícies poliméricas, poliuretano e alginato (GONDI *et al.*, 2022, DOS SANTOS, 2017, SCHAGERL *et al.*, 2022).

Segundo posto por Gondi *et al.* (2022), a imobilização dessa classe de sistema pode ser do tipo passiva ou ativa, também chamadas de natural e artificial, respectivamente, e a biorremediação realizada pelas microalgas fixadas costuma ser mais eficiente do que de sistemas suspensos, a serem discutidos a frente.

Alguns dos aspectos relevantes quanto aos sistemas imobilizados e que devem ser ainda bastante estudados referem-se ao custo da matriz porosa, à complexidade

e custo do processo de imobilização – visto a dificuldade ao se fixar microalgas devido a sua baixa estabilidade mecânica – e o acúmulo de subprodutos (GONDI *et al.*, 2022). Dessa forma, trabalhos futuros que vislumbrem alternativas de facilitar a metodologia de fixação das células microalgais são uma forte tendência.

Já com relação ao modo de cultivo suspenso, pode-se dividi-lo em outras duas categorias: sistemas abertos ou fechados (DELRUE *et al.*, 2016). Em se tratando de sistemas abertos, percebe-se que as vantagens mais evidentes são o baixo custo e simplicidade na instalação e operação (FRANCO *et al.*, 2013). Apesar disso, por serem bastante expostos ao ambiente, são mais suscetíveis a condições climáticas e sofre com uma taxa de evaporação de água maior (DOS SANTOS, 2017, SCHAGERL *et al.*, 2022).

Ainda devido a exposição, outra desvantagem é a alta propensão à contaminação, seja por outros heterótrofos de crescimento rápido, predadores, herbívoros, fungos ou bactérias (SCHAGERL *et al.*, 2022, ARUTSELVAN *et al.*, 2022). Somado a isto, outra limitação dos sistemas abertos é a dificuldade no processo de *scale up*, por conta de variações entre produção em pequena e larga escala, tais como modulação de luz, temperatura, agitação e incrustação, conforme relatado por Arutselvan *et al.* (2022).

Dentre as modalidades de sistemas abertos mais comuns, é ainda admissível que se subclassifiquem em naturais, incluindo os lagos e lagoas, ou artificiais, em que temos as lagoas circulares, tanques ou ainda as lagoas tipo *raceway* (DOS SANTOS, 2017). Destas, as mais empregadas são as lagoas *raceway*, que se constituem em um canal com curvas de recirculação de circuito fechado, com profundidade média de 0,3 m, onde a mistura e circulação da esteira é realizada por uma roda de pás (CHISTI, 2007).

Por outro lado, os sistemas fechados são aqueles com um contato muito mais restrito com o ambiente externo. São sistemas em que há um controle bem maior sobre as condições de crescimento, por exemplo pH, temperatura, arejamento e concentração de O₂ e CO₂, permitindo também que contaminações sejam evitadas (DERNER *et al.*, 2006). Além disso, estão aptos a contornar o problema de evaporação de água verificado nos sistemas abertos (DA CUNHA GONÇALVES, 2017).

Ademais, os sistemas fechados podem atingir concentrações de biomassa mais elevadas, comparadas com os abertos. E devido ao isolamento mais eficiente

do cultivo, permitem o crescimento de cepas de microalgas mais frágeis, que podem ser assistidas de maneira mais cuidadosa (DELRUE *et al.*, 2016). Pelo mesmo motivo, esses sistemas também são capazes de manter o cultivo de uma única espécie por longos períodos, possibilitando o estudo e caracterização de espécies separadamente (CHISTI, 2007).

As desvantagens mais expressivas dos sistemas fechados são a complexidade operacional e o custo elevado tanto para o investimento inicial quanto para manutenção. Comparativamente, os custos com sistemas fechados podem ser até 10 vezes superiores que de sistemas abertos para uma mesma capacidade de produção (DELRUE *et al.*, 2016).

Dentre os sistemas fechados mais usuais, temos as categorias: fotobiorreatores tubulares, fotobiorreatores de painel plano e reatores fermentativos. Destes, os tubulares são as instalações mais frequentes. São projetados para garantir ótima luminosidade e trocas gasosas, constituídos normalmente por vidro ou plásticos transparentes e com diâmetro reduzido, para que a luz possa adentrar até a área mais central do tubo (RODRIGUES, 2020).

Cabe ainda mencionar que uma terceira modalidade de instalação de cultura suspensa é estudada, os chamados sistemas híbridos. Neste caso, o inóculo de microalgas inicialmente é mantido em reatores fechados e posteriormente transferidos para sistemas abertos, geralmente lagoas. A vantagem dessa configuração é evitar contaminações na fase inicial do crescimento, porém o custo da primeira etapa limita sua aplicação em larga escala (CAI, PARK e LI, 2013).

3.3 Aplicação comercial das microalgas

As microalgas de maneira geral possuem bastante potencial para aplicabilidade diversa devido aos compostos funcionais que acumulam em sua biomassa, de modo que comercialmente há bastante valorização e interesse. Sucintamente, a composição basilar desses microrganismos engloba lipídios, proteínas – majoritariamente encontradas na forma de aminoácidos – e hidrocarbonetos, sendo que ainda podem ser produzidos diversos pigmentos, carotenóides, vitaminas, antioxidantes, compostos fenólicos, minerais e polissacarídeos (ADITYA *et al.*, 2022, YAP *et al.*, 2021).

Essas substâncias, compostos bioativos, podem ser verificadas devido à produção por metabolismo primário ou ainda sintetizadas a partir do metabolismo secundário. Além disso, pode-se destacar que a maioria é encontrada internamente na biomassa das microalgas, porém em alguns casos averiguou-se que são expelidos no meio (MOBIN, CHOWDHURY e ALAM, 2019). Essa sintetização de compostos por parte das microalgas, assim como evidenciado anteriormente quanto seu próprio desenvolvimento e cultivo, está intimamente ligada a fatores como condições ambientais, sazonalidade, região geográfica, e mesmo o estágio do ciclo de vida em que os microrganismos se encontram (ANBUCHZHIAN, KARUPPIAH e LI, 2015).

Segundo estudos realizados por Yap *et al.* (2021), com base nessas variações metabólicas em função de condições externas, o cultivo induzido em ambientes de estresse pode ser uma forma de otimizar a produção de bioativos, uma vez que modifica fisiologicamente as microalgas, possibilitando alterações nos teores de nutrientes e composição de biomassa. Assim, com vistas a uma aplicação comercial específica e uma maior viabilidade, essas formas assistidas de cultivo podem aumentar a porcentagem de compostos de interesse, como proteínas e carboidratos.

Discorrendo acerca das aplicações dos compostos bioativos e das microalgas, percebe-se que seu emprego industrial não se restringe a apenas produtos finais, como também a ingredientes para formulação de outros produtos (JUNIOR *et al.*, 2020). Já está bem estabelecida a comercialização de microalgas e seus bioativos na indústria de alimentos e rações em virtude do alto valor nutricional, mas além destas, a aplicação se estende a produção de bioplásticos, corantes alimentícios, cosméticos e cosmeceuticos, biofertilizantes, biocarvão, medicamentos e nutracêuticos (ADITYA *et al.*, 2022, JUNIOR *et al.*, 2020, PRIYA *et al.*, 2022 e KANDASAMY *et al.*, 2022).

Como corroborado pelo já citado trabalho de Yap *et al.* (2021), foi proposto por Spolaore *et al.* (2006) que as pesquisas a serem desenvolvidas deveriam se concentrar na melhoria dos sistemas de produção, assim como na modificação genética das linhagens de forma a tornar os produtos microalgais mais diversificados e economicamente competitivos, para integrarem o mercado definitivamente.

Conforme foi reunido pelo estudo de Milledge (2011), a produção de microalgas pelo mundo fica majoritariamente a cargo dos países China, Índia, Estados Unidos, Austrália, Taiwan, Alemanha, Japão, Israel e Myanmar, responsáveis pela produção das microalgas mais cultivadas. O que indica que os estudos de viabilidade e aumento produtivo das microalgas ainda não é uma realidade destaque no cenário brasileiro.

Em termos quantitativos de produção anual, expressos em toneladas de biomassa seca, Milledge (2011) destacou o cultivo de *Spirulina* (3000 t), *Chlorella* (2000 t), *Dunaliella* (1200 t), *Aphanizomenon* (500 t) e *Haematococcus* (300 t).

Para que uma ideia geral pudesse ser concebida quanto aos principais compostos bioativos identificados na biomassa das microalgas, e as aplicações e funções das biomoléculas em cada setor e área produtiva, o presente trabalho elaborou o Quadro 1, reunindo informações dos estudos científicos realizados por Priyadarshani e Rath, 2012; Chu, 2012; Aditya *et al.*, 2022; Junior *et al.*, 2020; Priya *et al.*, 2022; Kandasamy *et al.*, 2022; Yap *et al.*, 2021; Mobin, Chowdhury e Alam, 2019. Nele, para cada classe de biomoléculas tentou-se indicar algumas substâncias exemplificadoras, e, na sequência, para cada área em que se vê aplicação de bioativos de microalgas, especificou-se a utilidade a que prestam.

Tratando dos pontos apresentados no Quadro 1, vale ressaltar que as ações do mercado mundial de alimentos saudáveis relativo a produtos de microalgas, setor mais expressivo no que diz respeito ao emprego das microalgas, é avaliado em torno de US\$ 20 a 25 milhões atualmente (KANDASAMY *et al.*, 2022). O que tende a uma maior valorização, visto que os alimentos microalgais são aplicados na dieta vegana, que soma cada vez mais adeptos, como substitutos de outras fontes de proteínas e carboidratos (JUNIOR *et al.*, 2020).

Além desses setores mencionados, uma outra grande área em que as microalgas vêm demonstrando alto potencial é o de biocombustíveis. Que vem ao encontro de soluções sustentáveis para a iminente falta de recursos fósseis e também para a crise climática vivenciada. Neste sentido, a produção de biocombustíveis à base de microalgas também pode estar aliada ao tratamento de efluentes por meio de remediação de microalgas. Assim, associa-se o crescimento da biomassa nos efluentes, em que ocorrerá a remoção de metais e nutrientes, ao uso da biomassa na geração de biocombustíveis, seja a partir das biomoléculas ou da própria ação metabólica dos microrganismos.

Quadro 1 – Representantes de cada grupo funcional dos compostos bioativos e a aplicabilidade das biomoléculas microalgais como um todo em cada setor.

Compostos bioativos	
Pigmentos/Carotenóides: β -caroteno, astaxantina, clorofilas, luteína, zeaxantina, cantaxantina, ficocianina, ficoeritrina, fucoxantina	Vitaminas: A, B1, B6, B12, C, E, biotina, riboflavina, ácido fólico, ácido nicotínico, ácido pantotênico
Antioxidantes: Polifenóis, catalase, superóxido dismutase, tocoferol	PUFAs (ácidos graxos polinsaturados): DHA, EPA, ARA, GAL
Ficobiliproteínas: Ficocianina, ficoeritrina	Ficotoxinas: Ácido ocadaico, gonyautoxinas (GTX), yessotoxinas (YTX)
Lipídeos: Triglicerídeos e hidrocarbonetos	Polissacarídeos
Proteínas diversas	Outros: Compostos antimicrobianos, antifúngicos, antivirais, toxinas, aminoácidos, proteínas, esteróis
Áreas de Aplicação	Funcionabilidade
Indústria alimentícia	<ul style="list-style-type: none"> - Enriquecimento de macarrão, biscoito, barras nutricionais, sucos, chá verde, sopas, pães, sorvetes e molho de soja. - Suplemento dietético (em pílulas, cápsulas e misturas nutricionais fortificadas). - Corantes alimentícios naturais. Usados pigmentos em balas, refrigerantes, laticínios, picolés, sorvetes e chicletes.
Ração e suplementação alimentar animal	<ul style="list-style-type: none"> - Ação imunoestimulante e aumento de fertilidade animal. - Usada para alimentação de cavalos, gado, aves e principalmente piscicultura (ideal para peixes em todos os estágios, moluscos, gastrópodes, camarões e zooplâncton). - Melhora nas características de cor em salmões, gemas de ovos e frangos.
Biofertilizantes	<ul style="list-style-type: none"> - Ação antifúngica, estimulantes de crescimento. - Melhora na fixação de nitrogênio e solubilização de fosfato. - Aumenta a absorção de nutrientes, e a tolerância a estresses abióticos. - Aumento de produtividade, qualidade e vida útil de produtos colhidos.
Bioplásticos	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de bioplásticos como polihidroxialcanoatos (PHAs), ácido polilático (PLA), plásticos de amido, plásticos de celulose e plásticos de proteínas.
Cosméticos	<ul style="list-style-type: none"> - Insumos para cremes antienvelhecimento, regeneradores, emolientes, peelings, proteção solar, antimicrobianos e produtos para cabelos. - Pigmentos naturais.
Medicina	<ul style="list-style-type: none"> - Fonte de bioativos com propriedades: redutora de colesterol, anticancerígena, antibacteriana, imunoestimulante, antioxidante, anti-inflamatória, antitrombótica, antiviral. - Potencial para tratamento de doenças degenerativas.

4 Microalgas no tratamento de efluentes

4.1 Mecanismos de bioadsorção de metais pesados

A aplicação de microalgas em tratamento de águas residuais contaminadas por metais se deve a elevada capacidade das mesmas de reter e imobilizar metais tóxicos, sendo que não apenas no tratamento de efluentes industriais e residenciais elas são eficazes, mas também na desintoxicação biológica em águas naturais (SCHMITZ, MAGRO e COLLA, 2012, DAL MAGRO *et al.*, 2013). Nesse sentido, as microalgas podem ser empregadas como uma solução alternativa ou método de ação conjunta nas operações de tratamento de efluentes (DIAS *et al.*, 2019).

A capacidade de remoção de metais do meio não é um potencial das microalgas descoberto a pouco, pelo contrário, sabe-se que a facultade de bioadsorção desses microrganismos já é conhecida a bastante tempo. Porém, sua aplicabilidade em tratamento de efluentes só tem sido estudada nas últimas décadas (DIAS *et al.*, 2019), embora as análises reais de engenharia e de custo não tenham sido realizadas na íntegra até o momento (MONTEIRO, CASTRO e MALCATA, 2012).

Nos estudos feitos até então, o cádmio é o metal mais analisado nos ensaios de remoção, uma vez que sua toxicidade é assustadoramente alta e daí a urgência na retirada deste metal pesado dos meios. Além do cádmio (Cd), demais metais como chumbo (Pb), níquel (Ni) e cobre (Cu) também são examinados, com satisfatória eficiência de remoção por diferentes cepas de microalgas (SPAIN, PLÖHN e FUNK, 2021).

A bioadsorção ocorre quando há absorção de metais tóxicos por microrganismos, estes sendo bactérias, fungos, algas ou ainda uma associação de mais de uma cultura. Essa adsorção, ligação rápida e reversível, ocorre de forma que os íons metálicos carregados positivamente são atraídos pelos sítios ativos na superfície da partícula adsorvente, na qual se encontram diversos grupos funcionais carregados negativamente (DE QUADROS *et al.*, 2018, SPAIN, PLÖHN e FUNK, 2021).

Em termos mais particulares, a remoção de íons metálicos ocorre por meio de interações eletrostáticas, formação de complexos, troca iônica e reações de precipitação verificadas na superfície celular, que permitem a fixação das partículas metálicas, podendo esses mecanismos atuar em conjunto ou não (HEIDELMANN *et al.*, 2017, DIAS *et al.*, 2019). Essas diversas formas de captação e imobilização de

metais são estratégias que as espécies de microalgas encontram, em alguns casos, para autoproteção contra a toxicidade de metais pesados (LEONG e CHANG, 2020).

Dentre as mais expressivas vantagens da bioadsorção por microalgas, estão o baixo custo de operação e do próprio bioadsorvente, elevada eficiência de remoção, possibilidade de regeneração da biomassa sorvente, rápida cinética de adsorção e dessorção, além de não necessitar de produtos químicos agressivos, e, por isso, representar uma metodologia sustentável e ecologicamente correta (MONTEIRO, CASTRO e MALCATA, 2012, PRIYA *et al.*, 2022, UBANDO *et al.*, 2017).

Como já enunciado, percebe-se que a parede celular das microalgas desempenha um papel importante no processo de bioadsorção, sendo capaz de acumular metais externamente por meio de mecanismos físicos, químicos e biológicos (DAL MAGRO *et al.*, 2013). A caracterização das paredes celulares, ou seja, sua composição, estrutura e espessura, depende muito da cepa de microalga, sua fase de crescimento e também das condições ambientais às quais a cultura está sendo desenvolvida (SPAIN, PLÖHN e FUNK, 2021).

Esse revestimento celular de maneira geral é formado por polissacarídeos e proteínas, que por sua vez apresentam uma gama extensa de grupos carboxílicos – tidos como os principais responsáveis pela interação metal-microalgas –, aniônicos, grupos fosfatos e grupos sulfatos, capazes de se ligar passivamente aos metais (DE QUADROS *et al.*, 2018, HEIDELMANN *et al.*, 2017).

Esses grupamentos de carga negativa, em maioria orgânicos, como carbonila, amino, hidroxila, fosfato, sulfidril, amidas, aromáticos, radicais alquila, sulfato, e outros, fornecem os sítios de ligação para cátions metálicos, possibilitando assim as interações célula-metal (TRIPATHI e POLURI, 2021, NATERAS-RAMÍREZ *et al.*, 2021).

Dado o protagonismo da parede celular nos processos de bioadsorção, um conhecimento mais rigoroso e aprofundado de suas características é um caminho para a otimização desta metodologia no tratamento de águas residuais, levando também a uma possível redução de custos globais no emprego da tecnologia (LEONG e CHANG, 2020).

Além disso, a eficiência do bioadsorvente, e por consequência da bioadsorção, está atrelada a muitos fatores físico-químicos, como pH, temperatura, agitação, área superficial, tempo de contato, concentração e espécie metálica, presença de outro metal contaminante concorrente, existência de uma fase de pré-tratamento e

concentração inicial de biomassa (MONTEIRO, CASTRO e MALCATA, 2012). Ademais, a tendência geral indica que quanto maior a concentração metálica inicial, mais veloz é a ocupação de sítios ativos na superfície da célula, tornando a biomassa saturada mais rapidamente (NATERAS-RAMÍREZ *et al.*, 2021).

Acerca da influência da temperatura e do pH, o trabalho de Dias *et al.* (2019) relata que a temperatura atua sobre a constante de velocidade de reação, enquanto o pH influi na determinação de carga da superfície biossorvente.

Com relação à adsorção, diz executar-se em dois estágios distintos. Sendo a fase primária de caráter rápido, reversível e passivo, não dependente do metabolismo microalgal e ocorrendo na superfície externa do revestimento celular. Em contrapartida, o segundo estágio é exclusivo de células vivas, sendo um processo bem lento, irreversível e ativo, já que ocorre em termos do metabolismo da microalga, que absorve os íons metálicos e os acumula dentro das células, ou seja, a chamada bioacumulação (AKSU, 1998, PRIYA *et al.*, 2022).

Como insinuado acima, o processo de biossorção pode ser executado por células ativas ou vivas, mas também por biomassa inativa ou morta. E de fato, na maioria dos casos é preferível o emprego de células mortas, já que não requerem nutrientes ou condições ambientais específicas (UBANDO *et al.*, 2017), podem ser usadas em amplo espectro de variáveis experimentais, ser facilmente armazenadas por longos períodos sem detrimento de eficácia, e além disso permitem a regeneração pela dessorção dos metais, o que promove a reutilização da biomassa (NATERAS-RAMÍREZ *et al.*, 2021).

Somando a essas vantagens, o uso de células mortas facilita a imobilização e a modelagem matemática da cinética processual (SPAIN, PLÖHN e FUNK, 2021). O uso de microalgas vivas é inviável mesmo até durante o processo de recuperação do metal, que pode ser bastante difícil, além de que mantê-las vivas em ambientes hostis como o de efluentes industriais com alta toxicidade pode ser improvável (AKSU, 1998).

Comentando sobre o processo de dessorção, que permite a reutilização da biomassa, atenta-se para a escolha do eluente, ou solução dessorvente, que será responsável pela separação dos metais após serem sorvidos. A preferência deve ser do agente que possa preservar a capacidade de biossorção, e assim, não causar alterações físicas ou químicas irreversíveis ou qualquer dano às células (MONTEIRO, CASTRO e MALCATA, 2012).

Esses mecanismos de remediação promovidos pelas microalgas descritos neste tópico podem ser esquematizados visualmente para melhor compreensão, conforme exposto pela Figura 2 (adaptada de TRIPATHI e POLURI, 2021), a seguir.

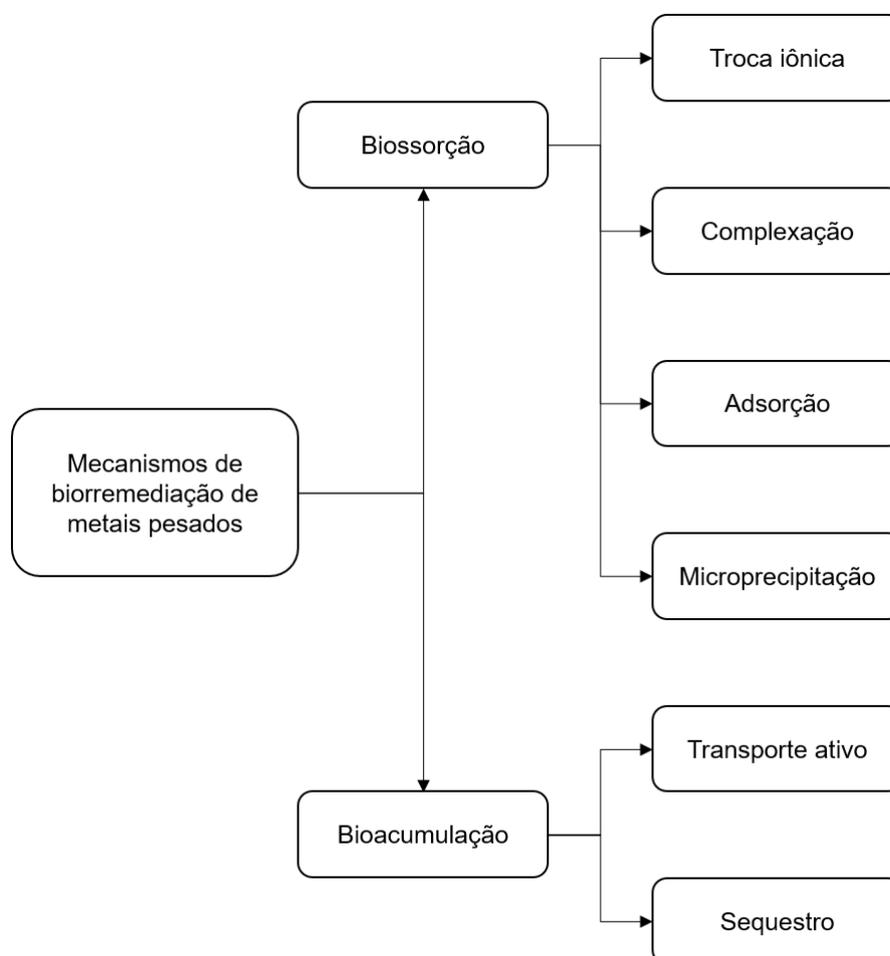


Figura 2 – Mecanismos de remediação de metais pesados por microalgas. Adaptado de TRIPATHI e POLURI, 2021.

A partir da Figura 2, percebe-se que a remoção dos metais pesados do meio promovida pelas microalgas é resultado de diversos mecanismos, o que mostra a versatilidade da técnica, uma vez que a remediação pode ser executada mesmo que alguns fatores impeçam certos mecanismos de serem realizados, já que serão compensados pelas demais formas de remoção do meio. Atenta-se, ainda de acordo com a figura, que as ferramentas de bioacumulação necessitam da célula microalgal viva, já que remete a vias ativas de remoção que contam com o metabolismo vital da célula do microrganismo. Assim, é mais comum, pelos motivos já citados, que os mecanismos predominantes na remoção sejam aqueles de biossorção.

4.2 Resultados de remoção de metais pesados por microalgas - Revisão

Como bem indicado no tópico precedente, as remoções de metais pesados por microalgas dependem de diversos fatores, e por isso a diversidade de estudos na literatura busca averiguar melhor os impactos de cada uma dessas variáveis, principalmente em termos de cepas microalgais e a espécie metálica contaminante, bem como suas respectivas concentrações no meio processual. Ademais, tem-se uma atenção especial com as condições de temperatura e pH.

Dados esses parâmetros, e a relevância de se viabilizar em grande escala a aplicação sustentável e ecológica da biossorção por microalgas, esse atual estudo buscou reunir diversas fontes de revisões bibliográficas a fim de se construir uma tabela geral com resultados sobre remoções de metais, a partir do mecanismo de biossorção por microalgas, já investigadas ao redor do mundo.

Assim, possibilitando um vislumbre do cenário contemporâneo, com as espécies microalgais e metálicas mais pesquisadas, e as condições do meio mais simuladas. Sobre isso, vale enfatizar que apesar do objetivo científico ser a aplicação dos microrganismos no tratamento de efluentes reais, a maioria dominante de artigos retrata resultados sobre condições sintéticas de águas residuais, ou seja, ambientes simulados das condições de efluentes.

Sendo assim, a Tabela 1 é apresentada na sequência. Onde atenta-se para a relação entre as variáveis eficiência de remoção [%] e resultado de remoção [mg/g]. A eficiência é dada pela razão entre a remoção total e a concentração inicial de metal, sendo que a remoção total pode ser obtida pelo produto entre a concentração de biomassa e o resultado de remoção, nas unidades indicadas na tabela.

Com base na repetibilidade e reprodutividade dos resultados de muitos estudiosos, expostos na Tabela 1, percebe-se que a tecnologia de remoção de metais pesados por microalgas ainda está em estágio de avaliação da consistência deste potencial, o que fica evidente pelo estudo continuado e persistente de condições ambientes semelhantes, e ótimas em termos de eficiência, e caracterização cada vez mais rigorosa das espécies promissoras mais abundantes.

Tabela 1 – Resultados de remoção de metais pesados por diferentes microalgas.

Microalga	Metal pesado	Condições operacionais					Tempo de inoculação [min]	Resultado de remoção [mg/g]	Eficiência de remoção [%]	Referência / Adaptado de
		pH	Temperatura [°C]	Concentração inicial de metal [mg/L]	Concentração de biomassa [g/L]	Observações				
<i>Maugeotia genuflexa</i>	As	6	20	10	4	-	60	2,4	96	LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	As	9,5	-	12	1	-	180	4,63	38,6	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlorella vulgaris</i>	As	5,5	-	12	1	-	180	3,89	32,4	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	As	9,5	-	12	1	-	180	5	41,7	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlorella minutissima</i>	Cd	6	28	-	4	-	20	303	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella sp.</i>	Cd	6	-	10	1,3	Células imobilizadas	-	15,51	92,5	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Parachlorella sp.</i>	Cd	7	35	100	1	-	-	962	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Scenedesmus-24</i>	Cd	6	-	200	1,5	-	-	48,4	60,5	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020

Microalga	Metal pesado	Condições operacionais				Observações	Tempo de inoculação [min]	Resultado de remoção [mg/g]	Eficiência de remoção [%]	Referência / Adaptado de
		pH	Temperatura [°C]	Concentração inicial de metal [mg/L]	Concentração de biomassa [g/L]					
<i>Spirulina platensis</i>	Cr (VI)	1	60	500	-	-	90	59,6	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Spirulina platensis</i>	Cr (VI)	1,5	25	250	1	-	600	148,64	59,5	LEONG e CHANG, 2020
<i>Spirulina platensis</i>	Cr (VI)	2	25	250	1	Células imobilizadas	-	49	19,6	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cr (VI)	1,5	25	250	1	-	600	140	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Spirulina platensis</i>	Cr (VI)	-	-	-	-	Efluente real	-	0,6	95	NATERAS-RAMÍREZ <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cr (VI)	2	25	147	1	-	600	63,2	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Cr (III)	6	25	100	2	-	120	-	98,3	LEONG e CHANG, 2020
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Cr (VI)	1	25	100	2	-	120	-	47,6	LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlorella minutissima</i>	Cr (VI)	2	30	100	60 ^d	Células imobilizadas	2160	57,33	99,7	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020

Microalga	Metal pesado	Condições operacionais					Tempo de inoculação [min]	Resultado de remoção [mg/g]	Eficiência de remoção [%]	Referência / Adaptado de
		pH	Temperatura [°C]	Concentração inicial de metal [mg/L]	Concentração de biomassa [g/L]	Observações				
<i>Chlorella sp.</i>	Pb	6	25	20	1,5	-	180	10,4	78	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Pb	6	25	500	-	Células imobilizadas ^b	120	308,7	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Hg	6	25	500	-	Células imobilizadas ^b	120	106,6	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella sp.</i>	Hg	-	30	8	0,3	-	120	3,33	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella sp.</i>	Hg	-	30	8	0,3	Células transgênicas ^a	120	7,33	27,5	UBANDO <i>et al.</i> , 2021 e LEONG e CHANG, 2020
<i>Chlorella vulgaris</i>	Hg	5	20	48	2	-	120	17,49	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Spirogyra sp.</i>	Hg	4	4	1	3	-	30	0,253	-	UBANDO <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella vulgaris</i>	Ni	-	-	100	-	Células imobilizadas	-	28,6	-	MONTEIRO, CASTRO e MALCATA, 2012
<i>Spirulina platensis</i>	Ni	-	-	-	-	Efluente real	-	0,65	90	NATERAS-RAMÍREZ <i>et al.</i> , 2021

Microalga	Metal pesado	Condições operacionais				Observações	Tempo de inoculação [min]	Resultado de remoção [mg/g]	Eficiência de remoção [%]	Referência / Adaptado de
		pH	Temperatura [°C]	Concentração inicial de metal [mg/L]	Concentração de biomassa [g/L]					
<i>Sargassum sp.</i>	Ni	5	30	-	-	Células imobilizadas ^b	-	1,69 ^b	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Sargassum sp.</i>	Cu	5	30	-	-	Células imobilizadas ^b	-	2,06 ^c	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
A título de complementação, cita-se aqui demais trabalhos com resultados acerca de remoção de metais pesados por microalgas. Neles, trata-se de condições operacionais mais específicas nos ensaios experimentais, a fim de se testar diferentes influências ambientais e de imobilização na retirada de metais, e também abrangem a eficiência de remoção de metais por consórcios de microalgas de diferentes espécies.									SALAM, 2019	
									CHU e PHANG, 2019	
									LIU <i>et al.</i> , 2021	

a (transformado com gene *merA* da cepa MB1 de *Bacillus megaterium*), b (matriz alginato de cálcio), c (mmol/g), d (% m/v).

4.3 Remoção de nutrientes

Como verificado em tópicos anteriores deste trabalho, os principais poluentes de águas residuais urbanas são o carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), sendo que esses nutrientes podem se apresentar na forma orgânica ou inorgânica. Em função da atividade metabólica das microalgas, esses nutrientes podem ser assimilados por elas, que removem altas cargas de excesso dos efluentes e os acumulam em sua biomassa (MUSTAFA *et al.*, 2021).

Essa capacidade das microalgas de remoção de nutrientes do meio foi extensamente analisada em simulações laboratoriais, averiguando especialmente microrganismos unicelulares da categoria *Chlorophyceae*, devido a sua dominância e fácil crescimento em nichos de água doce (WHITTON *et al.*, 2015).

De acordo com os muitos estudos, sistemas de tratamento avançado à base de microalgas são eficientes na remoção de nitrogênio e fósforo, bem como em promover o aumento do oxigênio dissolvido (WANG *et al.*, 2017). Em pesquisas mais recentes, foi evidenciado que culturas isoladas ou mesmo mistas de microalgas puderam alcançar remoções de N e P inorgânicos em taxas entre 80 e 100% (MUSTAFA *et al.*, 2021, FALLAHI *et al.*, 2021).

A remoção de nutrientes do meio pode ser realizada de maneira direta, também chamada de biológica, ou de maneira indireta. A primeira delas, maneira direta, envolve o metabolismo do microrganismo, ou seja, é obtida por vias bioquímicas interconectadas a fim de se absorver os nutrientes alvos necessários à produção de compostos essenciais para a manutenção e reprodução de biomassa, já a segunda forma, indireta, ocorre em função de alterações no meio promovidas pelo crescimento das culturas, como alteração de pH e temperatura. (WHITTON *et al.*, 2015).

O nitrogênio inorgânico se mostra presente nos ambientes residuais em três formas, sendo elas nitrito (NO_2^-) nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) (WANG *et al.*, 2017). Destas, o nitrato é a forma mais oxidada e mais estável termodinamicamente em meios aquáticos oxidados, e por isso é a forma predominantemente constatadas (CAI, PARK e LI, 2013). Apesar disso, a forma preferencialmente absorvida pelas microalgas não é o nitrato, e sim amônio.

De forma geral, a preferência na absorção de nitrogênio inorgânico na forma de amônio por esses microrganismos deve-se a forma de assimilação celular em que é transportada pela membrana celular (PIRES *et al.*, 2013). Por meio desse

mecanismo a demanda de energia é menor, já que não há envolvimento de reação redox durante a assimilação, contribuindo também para que a velocidade de extração do meio seja superior se comparada com a de retirada de nitrato (CAI, PARK e LI, 2013, WHITTON *et al.*, 2015).

De acordo com o trabalho de Cai, Park e Li (2013), seguindo essa tendência de predileção entre as formas inorgânicas de nitrogênio, as microalgas usualmente atuam na remoção de amônio até que seja quase totalmente consumido antes de partirem para a retirada de nitrato.

A metabolização de nitrogênio pelas microalgas se justifica pelo protagonismo do N no desenvolvimento e crescimento das células, no qual este nutriente atua na síntese de substâncias essenciais à manutenção da cultura, tais quais proteínas, ácidos nucleicos, moléculas de clorofila, enzimas, peptídeos, glutamina e também moléculas de transferência de energia (ADP, ATP) (WANG *et al.*, 2017, KONG *et al.*, 2021).

Como N na forma de amônio é tóxico, apesar da preferência das microalgas e da promoção de taxas de crescimento de biomassa elevadas em altas concentrações de amônio, foi averiguado que o excesso dele no meio de cultivo pode surtir um efeito repressivo (CAI, PARK e LI, 2013). Segundo pesquisado em revisão de Kong *et al.* (2021), alguns estudos já perceberam que a concentração de amônio possui sua faixa ótima, surtindo efeitos tóxicos para valores que ultrapassam os limites de otimização, variando de espécie para espécie.

A ser citado, exemplifica-se com o trabalho de Cho *et al.* (2019), que verificou que na concentração de nitrogênio total (NT) igual a 70 mg/L o montante de biomassa microalgal foi bem maior do que nas concentrações de NT de 50 mg/L e 100 mg/L. Por esses resultados, percebe-se que existe uma concentração ótima de nitrogênio para favorecimento da multiplicação celular, de tal forma que se a concentração ultrapassar a faixa ótima, o efeito tóxico passa a inibir o crescimento. Nesse aspecto, a tolerância ao efeito tóxico dependerá da cepa e espécie de microalgas (CAI, PARK e LI, 2013).

Quanto aos resultados de remoção de nitrogênio por culturas de microalgas, Wang *et al.* (2017) ainda verificaram um detalhe interessante no estudo de diversos ensaios já feitos. Segundo seu trabalho, as pesquisas científicas normalmente expressam a remoção de nutriente N na forma genérica de NT, sem detalhamento de qual das formas inorgânicas, e sua respectiva contribuição, foi removida do meio.

Assim, há ainda necessidade de se especificar essa remoção de nitrogênio em estudos futuros, uma vez que pode auxiliar na escolha das espécies a serem utilizadas no tratamento de efluentes com caracterização bem descrita e auxiliar na eficiência de remoção de um composto alvo, no caso, uma das formas inorgânicas de nitrogênio.

Passando para a remoção de fósforo do meio, tem-se que este nutriente se encontra como ortofosfato nas águas residuais, preferencialmente na forma de H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , que são internalizados nas células de microalgas via transporte ativo na membrana plasmática (MUSTAFA *et al.*, 2021, CAI, PARK e LI, 2013, KONG *et al.*, 2021).

Essa incorporação é realizada via transporte energizado e os compostos são assimilados em nucleotídeos após fosforilação para síntese majoritária de RNA ribossômico. Por ser utilizado nessa síntese, a assimilação do fósforo necessita, concomitante, de nitrogênio. Assim, em um ambiente em que haja limitação de qualquer um destes nutrientes, a consequência direta na composição de biomassa é o baixo teor de proteína, e logo, reduzido crescimento da cultura (WHITTON *et al.*, 2015).

Além da utilização de fósforo em sínteses, as microalgas também podem acumulá-lo em sua biomassa como polifosfato (PIRES *et al.*, 2013). Esse consumo seguido de armazenamento interno, é chamada de via de absorção de luxo, e ocorre quando os microrganismos removem um excesso de fosfato (LIU *et al.*, 2017).

Assim, PO_4^{3-} é armazenado como grânulo de polisfosfato insolúvel para ser utilizado futuramente pelas células em situações de escassez de fósforo no meio externo, sendo que essa prática é verificada principalmente em algumas espécies de cianobactérias e algas verdes eucarióticas (WHITTON *et al.*, 2015, WANG *et al.*, 2017).

A absorção de fósforo pelas microalgas está diretamente associada a importância metabólica do P para esses microrganismos, uma vez que esse nutriente atua na mediação de transferência de energia e da síntese de ácidos nucleicos (KONG *et al.*, 2021). Ou seja, são incorporados fundamentalmente em compostos orgânicos como DNA, RNA e mesmo lipídios e carboidratos – em que o fosfato constitui um intermediário), por fosforilação, e a outra parcela de P assimilado é usado na geração de ATP a partir do ADP (LIU *et al.*, 2017, MUSTAFA *et al.*, 2021).

Apesar de absorção de fósforo ser preferivelmente realizada nas formas inorgânicas, sendo em muitas vezes o ortofosfato solúvel o único componente

assimilativo de maioria das espécies (WANG *et al.*, 2017), foram identificados alguns casos em que certas variedades de algas puderam utilizar fósforo encontrado em ésteres orgânicos (CAI, PARK e LI, 2013).

Até o momento, as vias de absorção de nitrogênio e fósforo percorridas faziam menção à remoção direta/biológica, porém uma segunda forma, a indireta, de remoção é também verificada nos meios de tratamento de efluentes à base de microalgas. Devido ao metabolismo fotossintético desses microrganismos, o pH do meio pode se elevar, e, em ambientes com pH acima de 7 e temperaturas um pouco mais altas, o nitrogênio pode se volatilizar e o fosfato precipitar (PIRES *et al.*, 2013).

Quanto ao N, a volatilização ocorre, pois, em ambiente de alto pH há uma alteração no equilíbrio cinético das formas inorgânicas de N do meio que promove a produção de NH_3 em estado gasoso, que por essa razão é retirado do meio líquido em tratamento (WHITTON *et al.*, 2015). Apesar de esse efeito auxiliar nas altas taxas de remoção de NT, grandes volumes de nitrogênio volatilizado devem ser monitorados pelo potencial de poluição atmosférica (WANG *et al.*, 2017).

No caso do fosfato, visto que ele não pode existir em estado gasoso, a remoção indireta ocorre por meio da precipitação por complexação com íons metálicos, normalmente de Ca, Mg e Fe, estimulado pelo alto pH (maior que 8,5) e alta concentração de oxigênio dissolvido, gerando $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ mais usualmente (WANG *et al.*, 2017, PIRES, *et al.*, 2013, LIU *et al.*, 2017).

Considerando a demanda das microalgas por N e P simultaneamente, é importante reconhecer as influências da razão N:P, tanto no meio externo quanto em composição de biomassa. Como regra geral, a proporção molar de N:P na biomassa das microalgas demonstra consistentemente um teor maior de nitrogênio, sendo que os valores dependem da espécie e cepa, variando desde 4:1 até 40:1 (LI *et al.*, 2019).

Por essa razão, a escolha da espécie adotada para o tratamento de águas residuais influencia bastante nos resultados de remoção, pois cada uma requer nitrogênio e fósforo em proporções determinadas e ótimas para seu crescimento, e demonstra que a remoção de nitrogênio ocorre em taxas superiores que de fósforo (WHITTON *et al.*, 2015, ABINANDAN *et al.*, 2018).

Segundo Li *et al.*, (2019), os diferentes tipos de águas residuais acarretam diferentes razões N:P, porém os valores normalmente característicos dos efluentes não coincidem com os preferíveis pelas microalgas. A proporção média ideal para o cultivo é cerca de 5:1, pra maioria das espécies, o que não corrobora para as razões

de águas residuais normalmente acima de 30:1, com carência de fósforo, por isso, a caracterização de ambos, biomassa e efluente, são uma etapa importante na análise de viabilidade (WANG *et al.*, 2017).

A dinâmica de remoção de nutriente é por esses motivos muito afetada pela razão N:P, o que reflete em ensaios com alta taxa de remoção de N em fase inicial seguida por inibição de remoção de N por esgotamento de P. Em contrapartida, as concentrações de N devem ser ótimas, sem que a toxicidade seja expressiva, para estimular a remoção concomitante de P (WANG *et al.*, 2017, CAI, PARK e LI, 2013).

Outro nutriente muito importante para o metabolismo das microalgas é o carbono (C), o qual é capturado na forma de CO₂ ou HCO₃ dissolvido no meio, juntamente com a energia solar na forma de fótons, para uso em fotossíntese (KONG *et al.*, 2021). Mesmo que as forma inorgânicas de C sejam bastante utilizadas, carbono orgânico (OC), como carboidratos, ácidos graxos e aminoácidos também são usados pelos microrganismos, uma vez que não apenas o metabolismo autotrófico, apesar de predominante, é praticado pelas microalgas, que podem atuar mixo e heterotroficamente (LI *et al.*, 2019).

A forma mixotrófica de metabolismo de microalgas, efetuada por algumas *Chlorellas* (CAI, PARK e LI, 2013), é assumida por alguns estudiosos como simples adição de processos autotróficos e heterotróficos, porém, outros já propuseram que a dinâmica e interação dessas duas formas quando executadas influencia positivamente o desenvolvimento dos microrganismos, intensificando seu crescimento (KONG *et al.*, 2021).

De maneira geral, a eficiência de remoção dos nutrientes do meio depende de fatores variados, a citar: concentrações iniciais, proporção N:P, da espécie e cepa de microalgas, das condições ambientais de crescimento tais como pH e temperatura, da forma inorgânica do nutriente existente no meio, da disponibilidade de luz, presença de compostos tóxicos, ocorrência de mudanças repentinas do ambiente e do sistema de cultivo adotado e tempo de retenção (ABINANDAN *et al.*, 2018, PIRES *et al.*, 2013, WANG *et al.*, 2017).

Com relação aos sistemas de cultivo, tem-se que o conceito e modo convencionalmente aplicado no tratamento a base de microalgas é o suspenso. De tal forma que a maioria dos estudos já feitos para avaliação do potencial das microalgas utilizou essa forma de cultivo, no entanto, a desvantagem associada a dificuldade de colheita da biomassa tem sido um obstáculo (PIRES *et al.*, 2013).

Pires *et al.* (2013) demonstraram que mesmo que maioria dos sistemas suspensos apresentem taxas mais elevadas de remoção de nutrientes que os sistemas imobilizados, o que pode ser justificado pelo aumento da resistência em transferência de massa na matriz de imobilização, já existem estudos que indicam taxas equivalentes nos dois sistemas, sendo que o material usado para fixação das microalgas foi o ponto de otimização. Quitosana e alginato foram alguns dos materiais empregados em matriz de imobilização que evidenciaram alta eficiência de remoção, mesmo que, assim como outros sistemas imobilizados, passem por fase lag, de adaptação.

Além disso, o trabalho de Wang *et al.* (2017) foi bastante pertinente ao se atentar para as dificuldades comparativas entre esses dois tipos de cultivo, em virtude da unidade utilizada para expressar os resultados de remoção em cada caso. O que revela a importância de uma interconversão confiável dos resultados permitindo uma avaliação comparativa válida.

A avaliação de eficiência dos microrganismos na retirada de nutrientes do meio tem avaliado também a capacidade de culturas mistas nessa atividade, em especial na ação simbiótica de microalgas e bactérias, trazendo benefícios mútuos no crescimento de ambas as culturas.

No caso de culturas mistas com mais de uma espécie de microalga, percebe-se como principal vantagem a compensação de uma cultura pela outra em caso de mudanças no ambiente que possam prejudicar uma das culturas, tornando mais adaptativa e dinâmica a atividade microalgal (PIRES *et al.*, 2013).

Li *et al.* (2019), demonstraram que o benefício mútuo no caso de culturas com microalgas e bactérias se deve a complementação metabólica desses microrganismos. Visto que as bactérias assimilam carbono orgânico e fornecem CO₂ que é preferível para as microalgas, ao passo que as microalgas produzem oxigênio, descartando demanda de aeração externa, e outros nutrientes proveitosos para as bactérias, otimizando o crescimento das duas culturas.

Ademais, o efeito de biofloculação promovido pelas bactérias é uma vantagem extra, que propõe uma solução na dificuldade de colheita da biomassa em sistemas de cultivo suspenso (LI *et al.*, 2019). Dentre as bactérias mais adequadas, de acordo com estudos até então, tem-se a *Azospirillum sp*, facilitando bastante a absorção de nutrientes por parte das microalgas (PIRES *et al.*, 2013).

A escolha das espécies de bactérias e microalgas para constituição de uma cultura deve estar atenta à coexistência competitiva, em que ao invés de um comportamento simbiótico, esses microrganismos sejam inibidores da outra espécie. Como enfatizado por Liu *et al.* (2017), existem espécies de microalgas famosas por seu potencial na produção de compostos antibacterianos, da mesma forma que algumas bactérias também produzem metabólitos algicidas e antibióticos.

Generalizando, durante a escolha das cepas microalgais para uso em tratamento de efluentes, deve-se atentar para capacidade de crescimento rápido, altas demandas de nutrientes – estimulando consumo de nutrientes do meio, resistência à contaminação bacteriana ou fúngica e predação de zooplâncton, e facilidade na colheita da biomassa (WANG *et al.*, 2017). Whitton *et al.* (2015) ainda frisa que essa escolha deve levar em conta as características do ambiente onde serão cultivadas, principalmente com relação aos períodos de luz e temperatura, já que microalgas nativas e acostumadas às condições ambientais tendem a ser mais viáveis.

Como esperado por todas essas informações elucidadas, o controle e previsão do comportamento dos microrganismos é difícil, devido a mudanças constantes na dinâmica do sistema. Os sistemas, em suma, são afetados pela concentração inicial tanto dos microrganismos quanto dos nutrientes no meio; sendo que mesmo até a proporção dos nutrientes pode impactar na tendência do sistema. Além disso, pode-se elencar a disponibilidade de luz e dióxido de carbono no meio, e a temperatura.

Tendo isso em mente, percebe-se que uma área de pesquisa e estudo importante quanto ao tratamento de águas residuais à base de microalgas é a cinética e modelos preditivos da remoção de nutrientes. Wang *et al.* (2017), citaram alguns estudos com esta temática, de onde este trabalho adaptou seu texto no Quadro 2 em seguida, enunciando os trabalhos em ordem alfabética de sobrenome dos autores, além de elencar à esquerda os principais fatores que afetam o comportamento de crescimento das culturas, e conseqüentemente, sua modelagem.

Quadro 2 – Trabalhos científicos tematizados por modelagem de sistemas microalgais. Adaptado de WANG *et al.*, 2017.

Fatores de influência	Trabalhos com propostas de modelos	Descrição chave do trabalho desenvolvido
Concentração e proporção de nutrientes externos Enriquecimento de CO ₂ Iluminação Temperatura Características operacionais diversas, como tempo de residência	ARBIB <i>et al.</i> , 2014	Estudo de modelagem e caracterização em biorreator tipo <i>airlift</i> e em lagoa no tratamento de águas residuais, e avaliação comparativa dos resultados.
	COPPENS <i>et al.</i> , 2014	Foco na avaliação de propostas cinéticas da remoção de nitrato por microalgas e a potencial recuperação de nutrientes.
	KUNIKANE e KANEKO, 1984	Estudo de modelo cinético e avaliação da remoção de nutrientes pela microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i> e discussão do impacto da proporção N:P.
	LACERDA <i>et al.</i> , 2011	Uso de modelagem preditiva e simulação na otimização do aumento de biomassa em águas residuais com foco na biofixação de CO ₂ .
	RUIZ <i>et al.</i> , 2013 (a)	Estudo do desempenho de reator de painel plano, uso de modelo preditivo a partir de experimento batelada.
	RUIZ <i>et al.</i> , 2013 (b)	Modelo cinético para crescimento de biomassa microalgal e para remoção de nutrientes em fotobiotratamento.
	SCHUMACHER e SEKOULOV, 2002	Avaliação de biofilme de microalgas no tratamento de efluente.
	TALBOT <i>et al.</i> , 1991	Modelagem com vistas ao impacto da temperatura e luz no crescimento de 3 microalgas distintas com potencial no tratamento de efluentes, avaliação comparativa dos resultados.
	TRAVIESO <i>et al.</i> , 2004	Estudo de desempenho de lagoa de cultivo microalgal de grande escala, com vistas ao tratamento de efluentes e recuperação de nutrientes.
	XU <i>et al.</i> , 2015	Influência do tempo de retenção hidráulica (HRT) e do tempo de retenção de sólidos (SRT) em biorreator de membrana no cultivo de microalgas e tratamento de efluentes.
YANG <i>et al.</i> , 2011	Foco no crescimento e capacidade de acúmulo de lipídios pela microalga <i>Chlorella ellipsoidea</i> em efluentes domésticos.	

4.4 Resultados de remoção de nutrientes por microalgas - Revisão

Neste tópico, será apresentada, na Tabela 2 para melhor visualização, a reunião de dados referente à remoção de nutrientes por diferentes espécies microalgais. Além das informações relativas à retirada de nitrogênio e fósforo, foi também adicionada à tabela a capacidade de redução das demandas de oxigênio do meio, seja química ou biológica. A elaboração da Tabela 2 contou com a colaboração de diferentes fontes, indicadas na própria tabela na coluna à direita.

Com base na observação da seguinte Tabela 2, bem como da Tabela 1, percebe-se uma aparição frequente de alguns gêneros microalgais, tais como *Chlorella*, *Spirulina* e *Scenedesmus*. Essa constatação, associada às diversas condições de simulações a que essas microalgas foram submetidas levam a concluir que as pesquisas focam principalmente nas espécies e gêneros mais propensos ao cultivo e com um potencial biotecnológico mais estudado.

Assim, verifica-se a tendência do setor de biotecnologia na busca de repetibilidade de respostas dos microrganismos. Esse comportamento, em grande parte, objetiva tornar cada vez mais exploradas as alternativas e possibilidades de otimização, tanto do cultivo quanto da eficiência dos tratamentos de remoção de nutrientes e metais.

Com isso, as variáveis capazes de impactar os processos podem se tornar mais controláveis e previsíveis, aumentando a viabilidade dessas propostas sustentáveis de tratamento de efluentes. O que leva a um domínio científico maior sobre o fenômeno e também favorece em termos econômicos.

Dessa maneira, o alto custo, um dos principais obstáculos à implementação em grande escala das estações de tratamento à base de microalgas, pode ser reduzido a valores que permitam sua competitividade no mercado.

Tabela 2 – Resultados de remoção de nutrientes por microalgas.

Microalga	Redução de DBO e DQO [%]	Eficiência de remoção de amônio [%]	Eficiência de remoção de nitrito [%]	Eficiência de remoção de NT [%]	Eficiência de remoção de P [%]	Ambiente	Referência
<i>Chlorella sp.</i>	DQO 32,14	-	-	67	88	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella sp.</i>	-	93,9	-	-	80,9	Efluente municipal	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Chlorella sorokiniana</i>	-	-	-	70	89	Efluente farmacêutico	KURNIAWAN <i>et al.</i> , 2022
<i>Chlorella sorokiniana</i>	DBO 57-80 e DQO 27-45	-	-	53-96	59-92	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	-	89,1	-	-	70,3	Efluente de processamento de soja	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Scenedesmus obliquus</i> (imobilizada)	-	96,6	-	-	55,2	Efluente urbano	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Scenedesmus obliquus</i>	-	-	-	34	65	Efluente de suínocultura	KURNIAWAN <i>et al.</i> , 2022
<i>Scenedesmus rubercens</i>	-	96	95	-	90	Efluente sintético	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Scenedesmus sp. ZTY1</i>	DQO 72,1	-	-	> 90	97	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Spirulina sp.</i>	-	84-96	-	-	72-87	Efluente de suínocultura	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Spirulina platensis</i>	-	-	-	92,58	94,13	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021

Microalga	Redução de DBO e DQO [%]	Eficiência de remoção de amônio [%]	Eficiência de remoção de nitrito [%]	Eficiência de remoção de NT [%]	Eficiência de remoção de P [%]	Ambiente	Referência
<i>Chlorella vulgaris</i>	-	95	-	-	95	Efluente agroindustrial	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Chlorella vulgaris</i>	-	96,90-97,26	-	81,04-84,81	32,26-36,26	Efluente sanitário	KURNIAWAN <i>et al.</i> , 2022
<i>Chlorella vulgaris</i> (imobilizada)	-	100	-	-	95	Efluente doméstico sintético	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Chlorella vulgaris</i>	-	-	-	94,18	97,69	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	DBO 70,91 e DQO 70,97	-	-	70,32	81,34	-	MUSTAFA <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlorella minutissima</i>	-	-	-	88	99	Efluente de aquicultura	KURNIAWAN <i>et al.</i> , 2022
<i>Selenastrum sp.</i>	-	98,9-99,5	-	75,4-89,2	84,3-95,7	Efluente de aquicultura	KURNIAWAN <i>et al.</i> , 2022
<i>Botryococcus braunii</i>	-	-	79,63	-	100	Efluente doméstico	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Haematococcus pluvialis</i>	-	-	100	-	100	Efluente doméstico	PIRES <i>et al.</i> , 2013
<i>Dunaliella salina</i>	-	42,2	62	-	64,7	Esgoto sintético	PIRES <i>et al.</i> , 2013

A título de complementação, cita-se aqui demais trabalhos com resultados acerca de remoção de nutrientes por microalgas. Neles, trata-se de condições operacionais mais específicas nos ensaios experimentais (como tipo de reator e geometria utilizada no cultivo), a fim de se testar diferentes influências ambientais e de imobilização na retirada de metais, e também abrangem a eficiência de remoção de metais por consórcios.

ABINANDAN *et al.*, 2018; CAI, PARK e LI, 2013; LI *et al.*, 2019; SANTOS e PIRES, 2018; LIU *et al.*, 2017; LU *et al.*, 2020; NIE *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2022

5 Microalgas na produção de biocombustíveis

Conforme já averiguado nos tópicos iniciais deste capítulo, foi verificada a capacidade das microalgas de bioacumular enormes quantidades de moléculas densas em energia sob condições ótimas de cultivo, sendo que tais moléculas ricas em energia podem ser refinadas, processadas para a geração de biocombustíveis (KHAN *et al.*, 2022).

Devido a gama de possibilidades, a seguir, temos um esquema de subdivisões que demonstram a origem e a natureza dos processos geradores de biocombustíveis a partir de biomassa de microalgas, de acordo com organização proposta por Brennan e Owende (2010), apresentado na Figura 3.

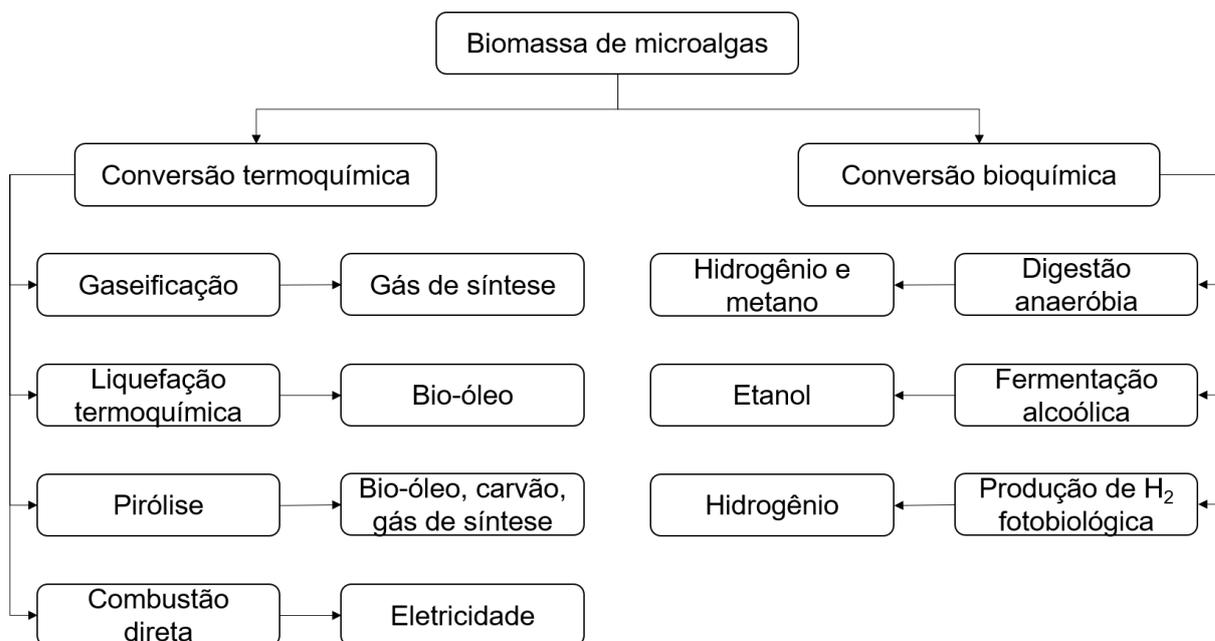


Figura 3 – Mecanismos de obtenção de biocombustíveis por microalgas.

A partir desta esquematização, fica evidente que de forma geral as conversões de biomassa podem ser de caráter termoquímico ou bioquímico. A categoria termoquímica envolve decomposição de térmica de componentes orgânicos na biomassa, e assim, gerar os produtos combustíveis, enquanto a categoria bioquímica depende da ação dos microrganismos para que os processos sejam realizados (BRENNAN e OWENDE, 2010).

Um dos principais biocombustíveis, e foco de diversos trabalhos científicos, é o biodiesel, definido como uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos, apresentando propriedades de combustão equiparadas às do diesel comum (MATA, MARTINS e CAETANO, 2010). O processo de obtenção do biodiesel é a transesterificação monoalcoólica, realizada a partir de triglicerídeos obtidos da biomassa de microrganismos, sendo que o potencial das microalgas neste sentido deve-se a sua capacidade de acumulação de lipídios, podendo alcançar até 30-50% em base de peso seco (KHAN *et al.*, 2022, LI *et al.*, 2008).

O trabalho de Khan *et al.* (2022) evidenciou ainda algumas das principais espécies na produção de biodiesel, sendo elas *Nanno chloropsis*, *Chlorella*, gêneros *Botryococcus*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* e *Dunaliella*.

Outro biocombustível de destaque é o bioetanol, obtido por fermentação biológica, evidenciando o potencial microalgal em função da grande quantidade de carboidratos na composição de sua biomassa (SARATALE *et al.*, 2022). Além do metabolismo habitual, percebeu-se que as quantidades de celulose ou amido poderia ser ainda melhorada ao induzir estresse ambiental nos sistemas de cultivo das microalgas, em especial de gêneros como *Chlamydomonas*, *Chlorella* e *Scenedesmus* (KHAN *et al.*, 2022).

Por fim, cabe citar a produção de biohidrogênio, alcançada pela ação microalgal, seja com foto-fermentação ou ainda fermentação escura. Sendo que a via escura se dá por um mecanismo heterotrófico a partir de piruvato gerado pela decomposição de substratos orgânicos na ausência de luminosidade (SARATALE *et al.*, 2022).

Ademais, cabe ressaltar que o obstáculo mais significativo na aplicação das microalgas para a produção de biocombustíveis está no quão oneroso ainda é o processo, seja com relação a instalação, operação e manutenção dos sistemas de cultivo, principalmente na etapa de colheita de biomassa e de conversão da matéria lipídica. Segundo análises econômicas, tem-se que a produção de combustíveis por microalgas deve ter seu custo reduzido em 10 vezes para que se torne competitivo com o preço do petróleo bruto no mercado internacional (QARI, REHAN e NIZAMI, 2017).

E, sendo o procedimento de colheita da biomassa uma das fases mais custosas do processo, percebe-se que o custo também reflete nas demais aplicações, que contam com a recuperação da biomassa para coleta dos bioativos de valor comercial.

6 Considerações finais

Com base no exposto na presente monografia, o cenário atual, influenciado até pela ocorrência da pandemia, apresenta um vasto potencial de desenvolvimento econômico sustentável, por meio do emprego de, como foi o foco, microalgas verdes em vários setores produtivos e também em conjunturas de ações corretivas. Nesse sentido, foi confirmado por diversos estudos científicos a versatilidade das microalgas.

Em termos de biomoléculas de valor comercial, foi verificada importância das microalgas em diversos contextos, inclusive como incentivo sociocultural, promovendo uma mudança no pensamento coletivo de forma a valorizar a economia circular, produtos ecológicos e alimentos mais saudáveis, incluindo também uma nova ideologia de cadeia produtiva, menos poluidora.

Nesse sentido, os bioativos presentes nas células microalgais mostraram-se bastante úteis também em áreas de saúde, sendo promissores em tratamento médico, formulações farmacêuticas, funcionais em produtos cosméticos e suplementares.

Toda essa mudança de paradigma, motivada pela necessidade urgente de controle de mudanças climáticas e combate à poluição, é consequência de eventos históricos e dinâmica humana, que resultou também em uma realidade com grandes volumes gerados de águas residuais. Quanto a isso, as microalgas são avaliadas, seja em culturas puras ou mistas (de microalgas ou microalgas-bactérias), no seu potencial já confirmado de remoção de metais pesados e nutrientes dos efluentes de fontes diversas.

Atenta-se para o fato de que os resultados obtidos até então quanto a eficiência das remoções depende de muito fatores, externos ou internos às culturas, o que dificulta a previsão e modelagem dos sistemas de tratamento de efluente à base de microalgas. Isso acaba refletindo na aplicabilidade desta biotécnica, que não possui muitas estações de grande escala em funcionamento, e os trabalhos de avaliação de desempenho das culturas continuam sendo realizados. Por conta da necessidade cada vez mais detalhada e precisa de dados que comprovem a reprodutibilidade dos resultados.

Além da reprodutibilidade, a avaliação técnica e, principalmente, econômica tem sido um aspecto de preocupação, já que os métodos de operação dos sistemas de tratamento e, mais ainda, de recuperação da biomassa microalgal e a subsequente

extração de compostos celulares ainda são monetariamente inviáveis, demandando um alto capital de investimento e de manutenção.

Igualmente, os obstáculos do emprego de microalgas na biorremediação de efluentes também são verificados na aplicação para biocombustíveis. Atrelados a múltiplas variáveis de impacto no desempenho e alto custo dos processos.

Além disso, com a revisão dos trabalhos aqui citados, percebeu-se que mesmo nos países e regiões em que o cultivo de microalgas já é bastante otimizado e implementado, as dificuldades permanecem, e para tanto a realização de estudos e fortemente incentivada, contando com recursos especializados para simulação de ensaios e novas propostas de processamento.

Pensando nisso, entende-se que o mercado das microalgas ainda está em etapa de concretização e incorporação às economias e sistemas de produção. E com isso, vê-se que para a realidade brasileira, ainda resta bastante pesquisa e infraestrutura a ser compensada para se tornar viável a real execução de cultivo integrado de microalgas.

Apesar desta avaliação, pode-se dizer que a extensão geográfica continental do país e a intrínseca biodiversidade são vantagens que tornam o Brasil um excelente local para o desenvolvimento das técnicas discutidas neste trabalho, já que muitas espécies de microalgas poderiam se adaptar aos diferentes biomas.

Portanto, o potencial, seja nacionalmente ou não, das microalgas como veículos de ideologias sustentáveis, compostos bioativos, soluções em tratamento de efluentes e fontes alternativas de biocombustíveis de terceira geração já é uma realidade comprovada e aferida por muitos estudos ao redor do mundo. Apenas resta tornar todo esse projeto viável em grande escala.

Referências

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A. A.; IBRAHEEM, IBM4052567. Microalgae and wastewater treatment. Saudi journal of biological sciences, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012.

ABINANDAN, Sudharsanam *et al.*. Nutrient removal and biomass production: advances in microalgal biotechnology for wastewater treatment. Critical reviews in biotechnology, v. 38, n. 8, p. 1244-1260, 2018.

ADITYA, Lisa *et al.*. Microalgae-bacteria consortium for wastewater treatment and biomass production. *Science of The Total Environment*, p. 155871, 2022.

AKSU, Zümriye. Biosorption of heavy metals by microalgae in batch and continuous systems. In: *Wastewater treatment with algae*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998. p. 37-53.

ANBUCHZHIAN, Ramasamy; KARUPPIAH, Valliappan; LI, Zhiyong. Prospect of marine algae for production of industrially important chemicals. In: *Algal biorefinery: An integrated approach*. Springer, Cham, 2015. p. 195-217.

ARBIB, Zouhayr *et al.*. Long term outdoor operation of a tubular airlift pilot photobioreactor and a high rate algal pond as tertiary treatment of urban wastewater. *Ecological engineering*, v. 52, p. 143-153, 2013.

ARCHELA, Edison *et al.*. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. *Geografia (Londrina)*, v. 12, n. 1, p. 517-526, 2003.

ARUTSELVAN, Chithirai *et al.*. Review on wastewater treatment by microalgae in different cultivation systems and its importance in biodiesel production. *Fuel*, v. 324, p. 124623, 2022.

AZUAGA, Denise *et al.*. Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ, COPPE, 2000.

BARATA, Ana Filipa Lima. Microalgas: produção econômica e ambientalmente sustentável. 2016. Tese de Doutorado.

BATISTA, Ana Paula *et al.*. Combining urban wastewater treatment with biohydrogen production—an integrated microalgae-based approach. *Bioresource technology*, v. 184, p. 230-235, 2015.

BERTOLDI, Fabiano Cleber; SANT'ANNA, Ernani; OLIVEIRA, Jorge Luiz Barcelos. Revisão: Biotecnologia de microalgas. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, v. 26, n. 1, p. 9-20, 2008.

BIDU, Jerome Michael *et al.*. Current status of textile wastewater management practices and effluent characteristics in Tanzania. *Water Science and Technology*, v. 83, n. 10, p. 2363-2376, 2021.

BOTELHO, Louise Lira Roedel; DE ALMEIDA CUNHA, Cristiano Castro; MACEDO, Marcelo. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e sociedade*, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

BRENNAN, Liam; OWENDE, Philip. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2010.

BUENO, Régis Diogo da Rosa. Energia e desenvolvimento sustentável: as fontes alternativas de energia e as políticas energéticas no âmbito nacional e internacional. 2010.

CAI, Ting; PARK, Stephen Y.; LI, Yebo. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 360-369, 2013.

CAVALCANTE, Zedequias Vieira; SILVA, Mauro Luis Siqueira da. A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. 2011.

CHEN, Chien-fei *et al.*. The impacts of COVID-19 on clean energy labor markets: Evidence from multifaceted analysis of public health interventions and COVID-health factors. *Energy Policy*, v. 164, p. 112880, 2022.

CHEIRSILP, Benjamas; MANEECHOTE, Wageeporn. Insight on zero waste approach for sustainable microalgae biorefinery: Sequential fractionation, conversion and applications for high-to-low value-added products. *Bioresource Technology Reports*, p. 101003, 2022.

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

CHO, Kichul *et al.*. Nitrogen modulation under chemostat cultivation mode induces biomass and lipid production by *Chlorella vulgaris* and reduces antenna pigment accumulation. *Bioresource technology*, v. 281, p. 118-125, 2019.

CHU, Wan-Loy. Biotechnological applications of microalgae. *IeJSME*, v. 6, n. 1, p. S24-S37, 2012.

CHU, Wan-Loy; PHANG, Siew-Moi. Biosorption of heavy metals and dyes from industrial effluents by microalgae. In: *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment*. Springer, Singapore, 2019. p. 599-634.

COPPENS, Joeri *et al.*. Kinetic exploration of nitrate-accumulating microalgae for nutrient recovery. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 98, n. 19, p. 8377-8387, 2014.

DA COSTA, Djeson Mateus Alves; DE BARROS JÚNIOR, Antônio Carlos. Avaliação da necessidade do reúso de águas residuais. *Holos*, v. 2, p. 81-101, 2005.

DA CUNHA GONÇALVES, Ana Luísa. Microalgal cultivation for biomass production, carbon dioxide capture and nutrients uptake. 2017.

DAL MAGRO, Clinei *et al.*. Biossorção passiva de cromo (VI) através da microalga *Spirulina platensis*. *Química Nova*, v. 36, p. 1139-1145, 2013.

DE LIMA, Rodrigo Otávio Alves *et al.*. Mutagenic and carcinogenic potential of a textile azo dye processing plant effluent that impacts a drinking water source. *Mutation*

Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, v. 626, n. 1-2, p. 53-60, 2007.

DELRUE, Florian *et al.*. The environmental biorefinery: Using microalgae to remediate wastewater, a win-win paradigm. *Energies*, v. 9, n. 3, p. 132, 2016.

DE QUADROS, Juliana *et al.*. UTILIZAÇÃO DE MICROALGA PARA A BIODISSORÇÃO DO METAL PESADO CHUMBO (PB). *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 10, n. 2, 2018.

DERNER, Roberto Bianchini *et al.*. Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural*, v. 36, p. 1959-1967, 2006.

DIAS, Guilherme *et al.*. Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas-uma revisão. *Química Nova*, v. 42, p. 891-899, 2019.

DINIS, Maria Alzira Pimenta; MONTEIRO, Álvaro; BOAVENTURA, Rui. Tratamento de águas residuais: o papel das microalgas. 2004.

DOS SANTOS, Francisca Maria Loureiro Ferreira. Crescimento de Microalgas e Remoção de Nutrientes em Ambientes Poluídos com Metais Pesados. 2017.

ELISABETH, Bermejo; RAYEN, Filali; BEHNAM, Taidi. Microalgae culture quality indicators: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 41, n. 4, p. 457-473, 2021.

FALLAHI, Alireza *et al.*. Interactions of microalgae-bacteria consortia for nutrient removal from wastewater: A review. *Chemosphere*, v. 272, p. 129878, 2021.

FRANCO, André Luiz Custódio *et al.*. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, v. 36, p. 437-448, 2013.

GAO, Feng *et al.*. High-efficiency biofuel production by mixing seawater and domestic sewage to culture freshwater microalgae. *Chemical Engineering Journal*, v. 443, p. 136361, 2022.

GIORDANO, Gandhi *et al.*. Tratamento e controle de efluentes industriais. *Revista ABES*, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004.

GOLLAKOTA, Anjani RK; SHU, Chi-Min. COVID-19 and Energy sector—Unique opportunity for switching to clean energy. *Gondwana Research*, 2022.

GONDI, Rashmi *et al.*. Wastewater based microalgae valorization for biofuel and value-added products recovery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 53, p. 102443, 2022.

HEIDELMANN, Gisele Petronilho *et al.*. Uso de biomassa de microalga para biofixação de lantanídeos. *Holos*, v. 6, p. 170-179, 2017.

HOEK, Christiaan *et al.*. *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge university press, 1995.

JUNIOR, Wilson G. Morais *et al.*. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. *Aquaculture*, v. 528, p. 735562, 2020.

KANDASAMY, Sabariswaran *et al.*. Microalgae as a multipotential role in commercial applications: Current scenario and future perspectives. *Fuel*, v. 308, p. 122053, 2022.

KHAN, Shamshad *et al.*. Production and harvesting of microalgae and an efficient operational approach to biofuel production for a sustainable environment. *Fuel*, v. 311, p. 122543, 2022.

KHANAM, Khadija; PATIDAR, S. K. Greywater characteristics in developed and developing countries. *Materials Today: Proceedings*, v. 57, p. 1494-1499, 2022.

KONG, Wenwen *et al.*. Review on carbon dioxide fixation coupled with nutrients removal from wastewater by microalgae. *Journal of Cleaner Production*, v. 292, p. 125975, 2021.

KUMAR, Niwas *et al.*. Valorization of wastewater through microalgae as a prospect for generation of biofuel and high-value products. *Journal of Cleaner Production*, p. 132114, 2022.

KUNIKANE, S.; KANEKO, M. Growth and nutrient uptake of green alga, *Scenedesmus dimorphus*, under a wide range of nitrogen/phosphorus ratio—II. Kinetic model. *Water research*, v. 18, n. 10, p. 1313-1326, 1984.

KURNIAWAN, Setyo Budi *et al.*. Potential of microalgae cultivation using nutrient-rich wastewater and harvesting performance by biocoagulants/bioflocculants: Mechanism, multi-conversion of biomass into valuable products, and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, p. 132806, 2022.

LACERDA, Lucy Mara Cacia Ferreira *et al.*. Improving refinery wastewater for microalgal biomass production and CO₂ biofixation: Predictive modeling and simulation. *Journal of petroleum science and engineering*, v. 78, n. 3-4, p. 679-686, 2011.

LEONG, Yoong Kit; CHANG, Jo-Shu. Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresource technology*, v. 303, p. 122886, 2020.

LI, Kun *et al.*. Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource technology*, v. 291, p. 121934, 2019.

LI, Yanqun *et al.*. Biofuels from microalgae. *Biotechnology progress*, v. 24, n. 4, p. 815-820, 2008.

LIU, Junzhuo *et al.*. Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: a review. *Bioresource Technology*, v. 241, p. 1127-1137, 2017.

LIU, Linhai *et al.*. Biosorption of copper ions through microalgae from piggery digestate: Optimization, kinetic, isotherm and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, v. 319, p. 128724, 2021.

LU, Weidong *et al.*. Critical processes and variables in microalgae biomass production coupled with bioremediation of nutrients and CO₂ from livestock farms: A review. *Science of the Total Environment*, v. 716, p. 135247, 2020.

MANSOUR, Sahar *et al.*. Wastewater problems and treatments. In: *Current trends and future developments on (bio-) membranes*. Elsevier, 2020. p. 151-174.

MATA, Teresa M.; MARTINS, Antonio A.; CAETANO, Nidia S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

MATTOS, Paulo de Carvalho. Tipos de revisão de literatura. UNESP. São Paulo, v. 2, 2015.

MILLEGE, John J. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 10, n. 1, p. 31-41, 2011.

Ministério do Meio Ambiente e da Luta contra Alterações Climáticas de Québec. Domestic, community, and municipal wastewater. Disponível em: <<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domest-communautaire-municipal-en.htm>>. Acesso em: 15/07/2022.

MOBIN, Saleh MA; CHOWDHURY, Harun; ALAM, Firoz. Commercially important bioproducts from microalgae and their current applications—A review. *Energy Procedia*, v. 160, p. 752-760, 2019.

MONTEIRO, Cristina M.; CASTRO, Paula ML; MALCATA, F. Xavier. Metal uptake by microalgae: underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnology progress*, v. 28, n. 2, p. 299-311, 2012.

MORCELLI, Allan Valcareggi. Aplicação de tecnologias de extração de clorofilas e carotenoides de microalgas e uso da biomassa microalgal na adsorção de metais pesados. 2021.

MOREIRA, Catarina. Simbiose. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 1, 2014.

MUHMOOD, Atif *et al.*. Formation of struvite from agricultural wastewaters and its reuse on farmlands: Status and hindrances to closing the nutrient loop. *Journal of environmental management*, v. 230, p. 1-13, 2019.

MUSTAFA, Shazia *et al.*. Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, v. 41, p. 102009, 2021.

NATERAS-RAMÍREZ, O. *et al.*. An overview of microalgae for Cd²⁺ and Pb²⁺ biosorption from wastewater. *Bioresource Technology Reports*, p. 100932, 2021.

NIE, Xifan *et al.*. Current progress, challenges and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, p. 124209, 2020.

PIGNOLET, Olivier *et al.*. Highly valuable microalgae: biochemical and topological aspects. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 40, n. 8, p. 781-796, 2013.

PIRES, J. C. M. *et al.*. Wastewater treatment to enhance the economic viability of microalgae culture. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, n. 8, p. 5096-5105, 2013.

PRIYA, A. K. *et al.*. Heavy metal remediation from wastewater using microalgae: Recent advances and future trends. *Chemosphere*, v. 305, p. 135375, 2022.

PRIYADARSHANI, Indira; RATH, Biswajit. Commercial and industrial applications of micro algae—A review. *Journal of Algal Biomass Utilization*, v. 3, n. 4, p. 89-100, 2012.

QARI, Huda; REHAN, Mohammad; NIZAMI, Abdul-Sattar. Key issues in microalgae biofuels: a short review. *Energy Procedia*, v. 142, p. 898-903, 2017.

REIS, Alberto; GOUVEIA, Luísa. Biorrefinarias de microalgas. *Boletim de Biotecnologia*, v. 3, p. 28-29, 2013.

RODRIGUES, Amanda Oliveira. Avaliação do uso de biomassa de microalga como substrato para leveduras na síntese de etanol. 2020.

RODRIGUES, L.; PIRES, T. A.; BATISTA, F. R. X. Aplicação de efluente de soro de queijo no cultivo da microalga *Chlorella vulgaris*. 2019. COBEQ IC.

RUIZ, J. *et al.*. Performance of a flat panel reactor in the continuous culture of microalgae in urban wastewater: prediction from a batch experiment. *Bioresource technology*, v. 127, p. 456-463, 2013. (a)

RUIZ, J. *et al.*. Photobiotreatment model (PhBT): a kinetic model for microalgae biomass growth and nutrient removal in wastewater. *Environmental technology*, v. 34, n. 8, p. 979-991, 2013. (b)

SALAM, Kamoru A. Towards sustainable development of microalgal biosorption for treating effluents containing heavy metals. *Biofuel Research Journal*, v. 6, n. 2, p. 948, 2019.

SANTOS, Francisca M.; PIRES, José CM. Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-char. *Bioresource Technology*, v. 267, p. 725-731, 2018.

SARATALE, Rijuta Ganesh *et al.*. Microalgae cultivation strategies using cost-effective nutrient sources: recent updates and progress towards biofuel production, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127691>. *Bioresource Technology*, 2022.

SCHAGERL, Michael *et al.*. The efficiency of microalgae-based remediation as a green process for industrial wastewater treatment. *Algal Research*, v. 66, p. 102775, 2022.

SCHMITZ, Roberta; MAGRO, Clinei D.; COLLA, Luciane Maria. Aplicações ambientais de microalgas. *Revista CIATEC-UPF*, v. 4, n. 1, p. 48-60, 2012.

SHAIKH, Irshad N.; AHAMMED, M. Mansoor. Quantity and quality characteristics of greywater: a review. *Journal of environmental management*, v. 261, p. 110266, 2020.

SHOW, Pau Loke. Global market and economic analysis of microalgae technology: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, p. 127329, 2022.

SCHUMACHER, G.; SEKOULOV, I. Polishing of secondary effluent by an algal biofilm process. *Water science and technology*, v. 46, n. 8, p. 83-90, 2002.

SILVA, Fabiana da *et al.*. Biorremocão de nitrogênio, fósforo e metais pesados (Fe, Mn, Cu, Zn) do efluente hiropônico, através do uso de *Chlorella vulgaris*. 2006.

SPAIN, Olivia; PLÖHN, Martin; FUNK, Christiane. The cell wall of green microalgae and its role in heavy metal removal. *Physiologia Plantarum*, v. 173, n. 2, p. 526-535, 2021.

SPOLAORE, Pauline *et al.*. Commercial applications of microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering*, v. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.

TALBOT, P. *et al.*. A comparative study and mathematical modeling of temperature, light and growth of three microalgae potentially useful for wastewater treatment. *Water research*, v. 25, n. 4, p. 465-472, 1991.

TKACZYK, Angelika; MITROWSKA, Kamila; POSYNIAK, Andrzej. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the total environment*, v. 717, p. 137222, 2020.

TRAVIESO, L. *et al.*. Evaluation of a laboratory and full-scale microlage pond for tertiary treatment of piggery wastes. *Environmental technology*, v. 25, n. 5, p. 565-576, 2004.

TRIPATHI, Shweta; POLURI, Krishna Mohan. Heavy metal detoxification mechanisms by microalgae: Insights from transcriptomics analysis. *Environmental Pollution*, v. 285, p. 117443, 2021.

UBANDO, Aristotle T. *et al.*. Microalgal biosorption of heavy metals: a comprehensive bibliometric review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 402, p. 123431, 2021.

VASCONCELOS, Marina Wust *et al.*. Textile effluent toxicity trend: A scientometric review. *Journal of Cleaner Production*, p. 132756, 2022.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG, 1996.

WAN, Daoxia *et al.*. The impact of investor attention during COVID-19 on investment in clean energy versus fossil fuel firms. *Finance Research Letters*, v. 43, p. 101955, 2021.

WANG, Jing-Han *et al.*. Microalgae-based advanced municipal wastewater treatment for reuse in water bodies. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 101, n. 7, p. 2659-2675, 2017.

WHITTON, Rachel *et al.*. Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment. *Environmental Technology Reviews*, v. 4, n. 1, p. 133-148, 2015.

WOJCIECHOWSKI, Juliana *et al.*. Isolamento e cultivo de microalgas. 10.13140/2.1.3353.3767. (2013).

WRIGHT, Christopher; NYBERG, Daniel; BOWDEN, Vanessa. Beyond the discourse of denial: The reproduction of fossil fuel hegemony in Australia. *Energy Research & Social Science*, v. 77, p. 102094, 2021.

XU, Meng *et al.*. Roles of SRT and HRT of an algal membrane bioreactor system with a tanks-in-series configuration for secondary wastewater effluent polishing. *Ecological Engineering*, v. 85, p. 257-264, 2015.

Yang, J., Li, X., Hu, H., Zhang, X., Yu, Y., & Chen, Y. (2011). Growth and lipid accumulation properties of a freshwater microalga, *Chlorella ellipsoidea* YJ1, in domestic secondary effluents. *Applied Energy*, 88(10), 3295-3299.

YAP, Jiunn Kwok *et al.*. Advancement of green technologies: A comprehensive review on the potential application of microalgae biomass. *Chemosphere*, v. 281, p. 130886, 2021.