

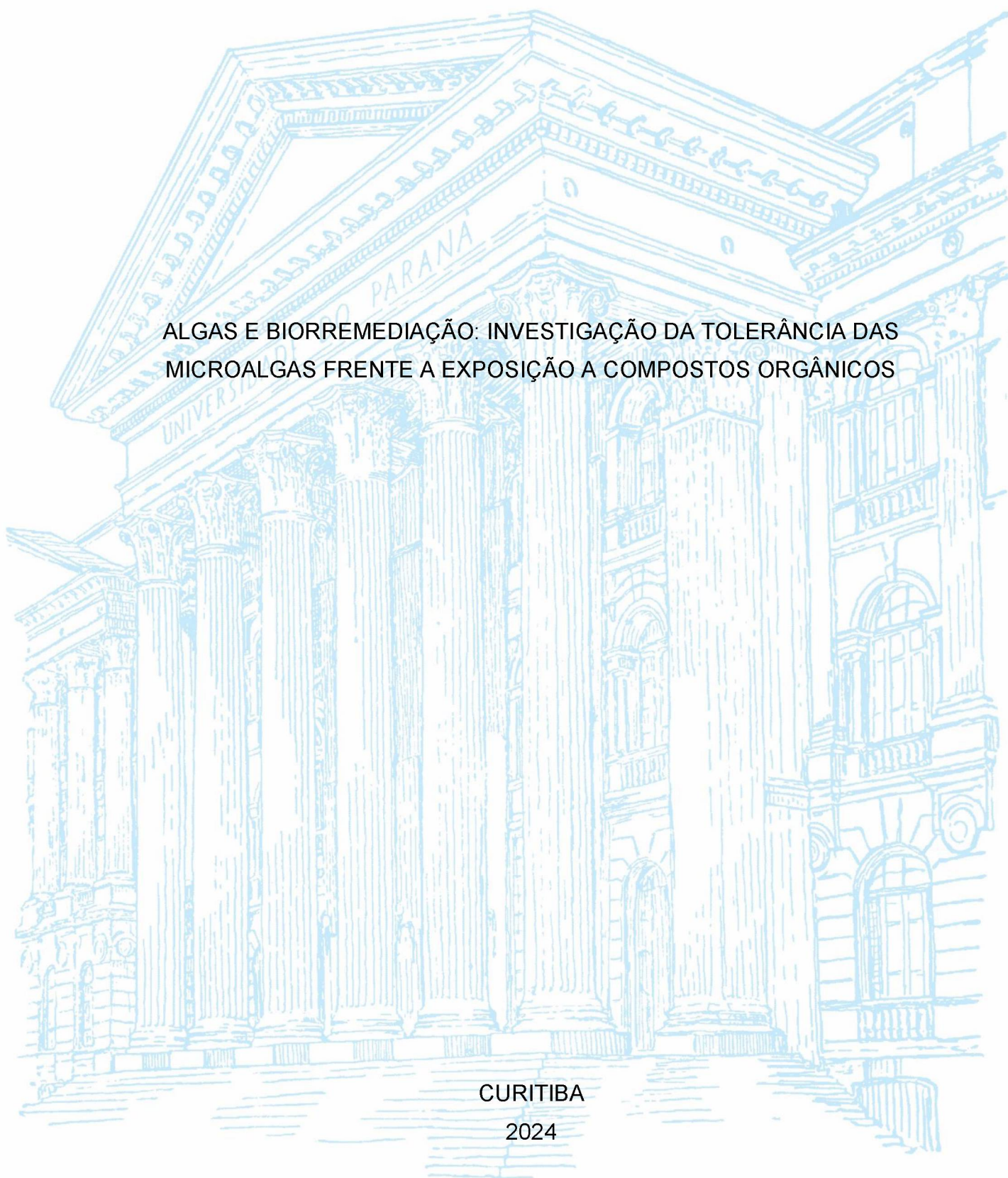
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA FONTES DE CARVALHO

ALGAS E BIORREMEDIAÇÃO: INVESTIGAÇÃO DA TOLERÂNCIA DAS  
MICROALGAS FRENTA A EXPOSIÇÃO A COMPOSTOS ORGÂNICOS

CURITIBA

2024



MARIANA FONTES DE CARVALHO

ALGAS E BIORREMEDIAÇÃO: INVESTIGAÇÃO DA TOLERÂNCIA DAS  
MICROALGAS FRENTE A EXPOSIÇÃO A COMPOSTOS ORGÂNICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso de Gestão Ambiental do Programa de  
Educação Continuada em Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como pré-  
requisito para obtenção do título de especialista.

Orientador/Professor: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA

2024

## RESUMO

O presente trabalho explora o potencial das algas, especificamente microalgas marinhas e de água doce, na biorremediação de ambientes contaminados por compostos orgânicos. Investigou-se a capacidade de resistência e adaptação das microalgas quando expostas a concentrações de compostos orgânicos, visando o entendimento dos mecanismos de tolerância e seu potencial biotecnológico. Os resultados bibliográficos indicam que certas espécies de microalgas possuem uma alta capacidade de remoção de poluentes. A maioria das espécies encontradas são provenientes de ambientes de água doce, dentre elas as do gênero *Chlorella*, *Nannochloropsis* e *Selenastrum*, tornando-se candidatas promissoras para aplicações em processos de biorremediação, como áreas afetadas por derramamentos de petróleo, efluentes industriais e outros poluentes. Entretanto, é necessário um maior aprofundamento no conhecimento sobre os processos bioquímicos e fisiológicos envolvidos, na otimização das condições de cultivo e identificação de novas espécies de microalgas promissoras, visando aplicações biotecnológicas utilizando a biomassa gerada como subproduto do processo de biorremediação.

Palavras-chave: Microalga; Biorremediação; Compostos orgânicos; Cultivo; Biomassa.

## ABSTRACT

This study explores the potential of algae, specifically marine and freshwater microalgae, in the bioremediation of environments contaminated by organic compounds. The resistance and adaptation capacity of microalgae when exposed to concentrations of organic compounds was investigated, aiming at understanding the tolerance mechanisms and their biotechnological potential. The bibliographic results indicate that certain microalgae species have a high capacity for pollutant removal. Most of the species found come from freshwater environments, including those of the genus *Chlorella*, *Nannochloropsis* and *Selenastrum*, making them promising candidates for applications in bioremediation processes, such as areas affected by oil spills, industrial effluents, and other pollutants. However, it is necessary to deepen further the knowledge about the biochemical and physiological processes involved, to optimize cultivation conditions and identify new promising microalgae species, aiming at biotechnological applications using the biomass generated as a byproduct of the bioremediation process.

Keywords: Microalgae; Bioremediation; Organic Compounds; Cultivation; Biomass.

## 1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos são essenciais para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, fornecendo recursos vitais como água potável, alimentos, e regulando o clima. Contudo, esses ecossistemas enfrentam uma série de ameaças devido à atividade antrópica, entre as quais se destaca a poluição por compostos orgânicos. Compostos como hidrocarbonetos, pesticidas e outros poluentes químicos resultantes de atividades industriais e agrícolas têm se acumulado nos corpos d'água, causando sérios danos à fauna e flora aquática.

Os compostos orgânicos são extremamente tóxicos para os ecossistemas aquáticos, inclusive aos seres humanos devido às suas propriedades mutagênicas e carcinogênicas (Othman *et al.* 2023), perturbando processos biológicos fundamentais e, em última análise, ameaçando a sobrevivência de muitas espécies. Além disso, esses poluentes podem se bioacumular na cadeia alimentar, representando riscos à saúde humana.

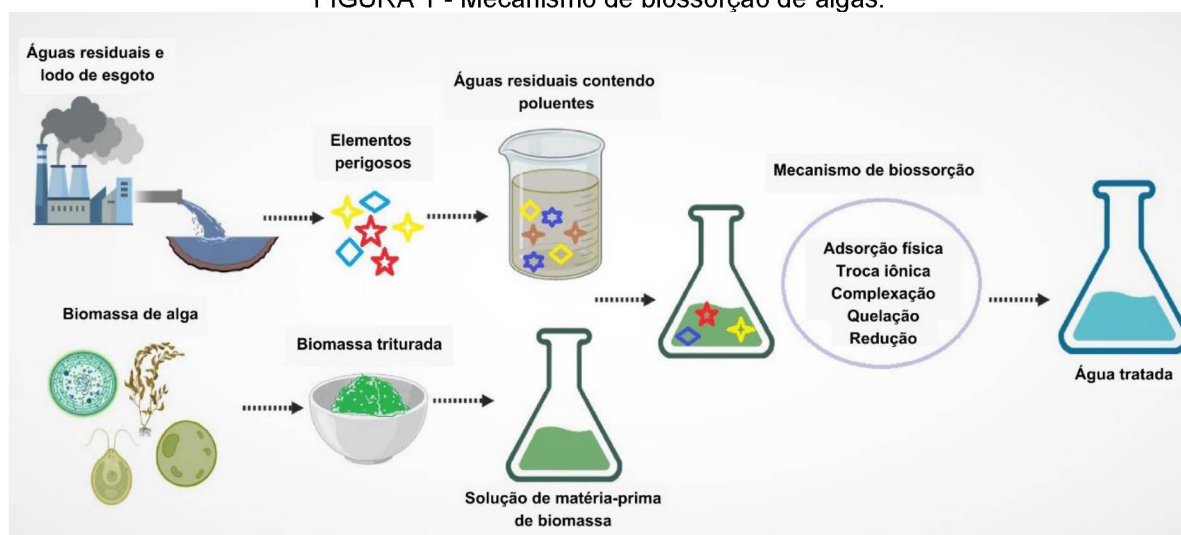
O aumento da industrialização e da superexploração dos recursos naturais afeta diretamente ao meio ambiente. As atividades antrópicas resultantes da combustão de combustíveis fósseis, escoamento industrial e urbano sem tratamento, a exploração e processamento de petróleo ou ainda derramamentos acidentais de óleo mineral (Nizzetto *et al.* 2008; Boehm, Neff, Page, 2007; Yunker *et al.* 2002) são exemplos de eventos que aumentam drasticamente a carga de compostos orgânicos nos ambientes aquáticos. Quando essas atividades não são controladas adequadamente, podem ocasionar grandes impactos negativos à biodiversidade, mortalidades de espécies aquáticas e alterações significativas no ambiente.

Sabe-se que vazamentos provenientes de fontes de substâncias orgânicas liberam substâncias nocivas nos corpos hídricos, como por exemplo, aqueles derivados de hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, entre outros.

Na recuperação de áreas degradadas provenientes de substâncias orgânicas, a biorremediação surge como uma alternativa interessante. Essa técnica utiliza organismos biológicos para a degradação de compostos orgânicos e restauração do ambiente afetado. A aplicação de microalgas tem ganhado destaque devido à sua capacidade de absorver e metabolizar uma variedade de poluentes orgânicos, sendo eficientes na remoção de contaminantes, redução significativa de cargas poluentes, minimizando os impactos ambientais e melhorando a qualidade da água.

De acordo com a literatura, a constituição bioquímica das microalgas viabiliza processos de bioissorção (Dias *et al.* 2019), devido a esses organismos apresentarem uma eficiência fotossintética que as permitem utilizar tanto carbono orgânico quanto inorgânico como fonte de nutrientes (Franco *et al.* 2013), desempenhando uma função no tratamento de efluentes e absorção de compostos e nutrientes. A bioissorção caracteriza-se por ser um processo de remoção de poluentes orgânicos em determinado substrato, utilizando-se de um material biológico, ocasionado por interações físicas e/ou reações químicas (Mrvčić *et al.* 2012), conforme exemplificado na Figura 1 abaixo.

FIGURA 1 - Mecanismo de bioissorção de algas.



Fonte: Adaptado de Ramesh *et al.* (2023).

Embora diversos mecanismos biológicos apresentem características particulares para remoção de contaminantes, as algas têm recebido atenção devido à sua natureza renovável e alta capacidade de bioissorção (Ramesh *et al.* 2023; Shamshad *et al.* 2020; Vilar *et al.* 2008). Em razão de sua grande área superficial e forte capacidade de ligação físico-química, a biomassa de algas tem a maior força eletrostática de atração para contaminantes em águas residuais e uma maior eficiência de bioissorção (Ramesh *et al.* 2023), especialmente considerando a sua parede celular composta por vários grupos funcionais, como amino, sulfonato e carboxila (Chen e Yang, 2005), que possuem a capacidade de absorver nutrientes.

Vários estudos têm mostrado resultados promissores na utilização de organismos aquáticos para a biorremediação de áreas contaminadas por compostos orgânicos, entretanto, tem se concentrado principalmente em bactérias e fungos (Sar



*et al.* 2024; AbuQamar *et al.* 2023; Dell'Anno *et al.* 2023; Vaksmaa *et al.* 2023; Wang *et al.* 2023; Madadi e Bester, 2021).

Diante desse contexto, o presente trabalho visa investigar a capacidade de resistência e adaptação das microalgas quando expostas a concentrações de compostos orgânicos, visando compreender os mecanismos de tolerância e potencial biotecnológico para biorremediação.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Investigar a capacidade de resistência e adaptação das microalgas quando expostas a concentrações de compostos orgânicos, visando compreender os mecanismos de tolerância e potencial biotecnológico para biorremediação.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar as espécies de microalgas com maior potencial de tolerância aos compostos orgânicos para aplicabilidade em processos de biorremediação;
- Verificar quais são os efluentes mais utilizados em processos de biorremediação por microalgas;
- Compreender os processos bioquímicos e fisiológicos que permitem às microalgas sobreviver e degradar concentrações de compostos orgânicos;
- Verificar as possíveis aplicações da biomassa das microalgas tolerantes a concentrações de compostos orgânicos em processos biotecnológicos e em produção em larga escala.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MICROALGAS

As microalgas são microrganismos heterogêneos, usualmente microscópicos, unicelulares, coloniais ou filamentosos e fotoautotróficos. Filogeneticamente, podem ser procarióticos ou eucarióticos (Olaizola, 2003). São considerados organismos fotossintetizantes, encontrados em ambientes aquáticos, tanto marinhos quanto de água doce, desempenhando um papel crucial nos ecossistemas aquáticos, servindo como fonte de alimento para a cadeia alimentar aquática. As microalgas apresentam uma grande diversidade de formas, tamanhos e capacidades metabólicas, o que lhes confere uma adaptabilidade notável a diferentes condições ambientais (Borowitzka, 2018).

As microalgas produzem grandes quantidades de proteínas, óleos e demais compostos de interesse, sendo que no contexto de biorremediação, a maior parte dessas substâncias está inserida nos processos de biossorção (Bertoldi, Sant'anna, Oliveira, 2008). Espécies como *Chlorella sp.*, *Spirulina sp.*, *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis* são amplamente conhecidas e cultivadas, principalmente com valor comercial (Bertoldi, Sant'anna, Oliveira, 2008; Becker, 2003).

As microalgas têm sido amplamente estudadas por seu potencial de biorremediação devido a várias características interessantes, como a rápida taxa de crescimento, a capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais e a eficiência na assimilação de nutrientes e poluentes (Rawat *et al.* 2011).

A técnica de fitorremediação, conhecida pela utilização de algas para o tratamento de águas residuais, vem substituindo com sucesso os métodos físico-químicos na remediação do ambiente devido às características únicas das algas na assimilação de vários poluentes tóxicos, como hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, metais pesados e organoclorados (Al-Jabri *et al.* 2021; Ke, Wong e Tam, 2012).

Devido à estrutura relativamente simples das células, as microalgas podem ser aproveitadas em diversas aplicações de interesse, como bioenergia (Ortenzio *et al.* 2015), produção de bioativos, alimentos e demais processos industriais e biotecnológicos.

De acordo com Paula, Chagas e Mendonça (2023), as microalgas podem se desenvolver em águas doces, salobras, salinas e residuais, o que as tornam agentes promissores para remediação de águas contaminadas por atividades antrópicas,



reduzindo assim o impacto ambiental dessas atividades. O seu cultivo pode ser associado a Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), com o objetivo de realizar a remoção de nutrientes dos efluentes, que são utilizados pelas microalgas para seu crescimento e propagação, gerando ao mesmo tempo compostos que podem ser inseridos em inúmeros processos (Rodrigues e Belli Filho, 2004). Além disso, esses organismos crescem muito rapidamente gerando altos rendimentos de biomassa sem competir com a cultura de alimentos, pois não precisam de terra arável para seu cultivo (Hosseinia, Shanga e Scotta, 2018).

Esses microrganismos fotossintéticos podem sintetizar ácidos graxos por meio de fontes de carbono (como CO<sub>2</sub>) ou diretamente de fontes orgânicas (Pereira *et al.* 2012). No entanto, o papel das microalgas na remediação de contaminantes aquáticos e seus processos envolvidos são muito menos compreendidos, em comparação com bactérias e fungos.

De acordo com Ke, Wong e Tam (2012), o conhecimento das espécies tolerantes e a compreensão da resposta e das mudanças adaptativas nas células de microalgas à toxicidade induzida por poluentes orgânicos é um passo crucial na biorremediação, pois serve como base científica para práticas de remediação.

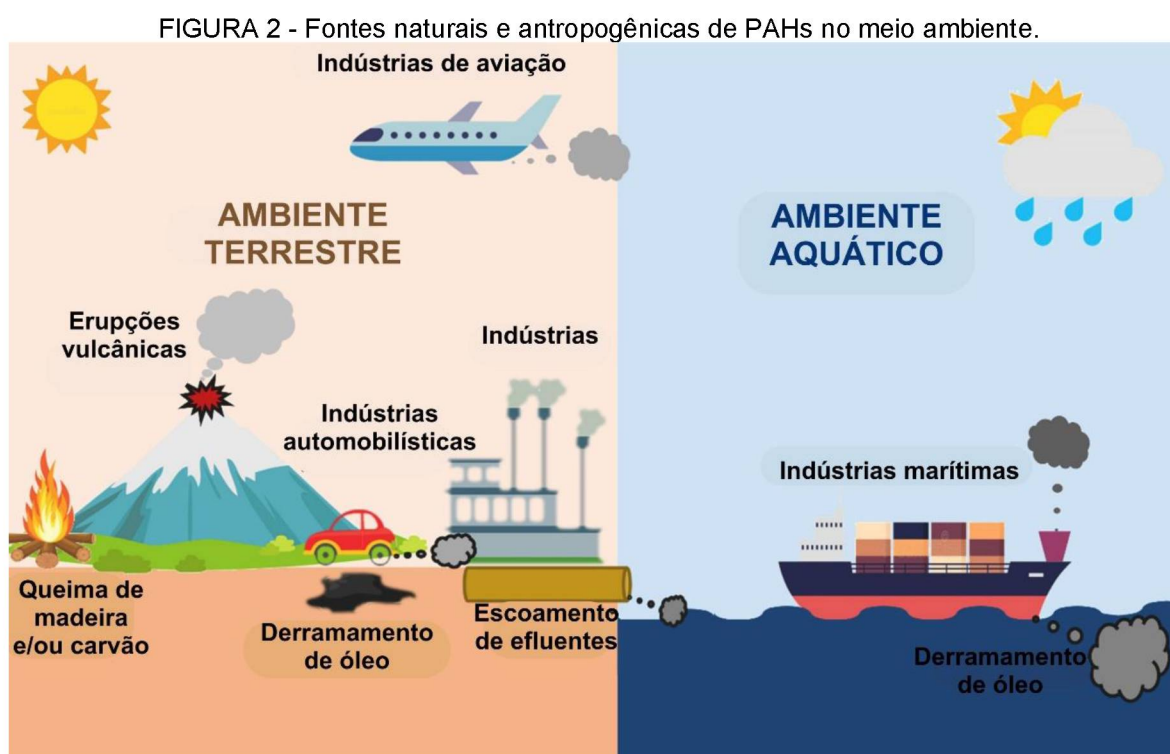
### 3.2 COMPOSTOS ORGÂNICOS

Os efluentes residuais e industriais podem conter níveis significativos de compostos orgânicos e inorgânicos, como óleo, hidrocarbonetos aromáticos alifáticos e policíclicos, fenóis, metais pesados e outros produtos químicos, dependendo de sua origem e processo. Os compostos orgânicos podem ser classificados conforme a sua estrutura molecular e também de acordo com seus grupos funcionais. Cada grupo de ácidos, éteres, ésteres, álcoois, aminas, cetonas, hidroxila e haletos de alquila determinam as propriedades destes compostos (Meislich, Nechamkin e Sharefkin, 2000).

Os hidrocarbonetos são considerados compostos orgânicos formados basicamente por carbono e hidrogênio e de acordo com sua estrutura são classificados como saturados, insaturados e aromáticos (Thomas, 2004), sendo esses últimos caracterizados por possuírem anéis de cadeia fechada. Por causa desta conformação, os hidrocarbonetos aromáticos apresentam uma maior toxicidade em comparação aos demais.

Os Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs) são substâncias que contêm múltiplos anéis de benzeno conectados entre si em diferentes configurações estruturais (Kocak *et al.* 2023) e devido às suas características lipofílicas e hidrofóbicas são resistentes à degradação (Kronenberg *et al.* 2017). Os PAHs são liberados no meio ambiente por emissões diretas de fontes petrogênicas ou pela combustão incompleta de combustíveis fósseis, biomassa e outras fontes de petróleo (Zhang *et al.* 2021), processos industriais relacionados a produção de produtos metálicos, exaustão e incineração de rejeitos e por resíduos sólidos industriais (Meire *et al.* 2007), entre outros (Figura 2).

De acordo com estudos, a translocação de PAHs no ambiente se dá principalmente sob via atmosférica de transporte associado ao material particulado fino, o que permite ampla distribuição e deposição desses compostos (Meire *et al.* 2007). A entrada deste tipo de fonte no ambiente aquático e subterrâneo também é combinada com a contaminação proveniente dos escoamentos continentais e entradas de rios em margens costeiras (Othman *et al.* 2023).



Fonte: Adaptado de Thacharodi *et al.* (2023).

A eliminação e remoção de PAHs do ecossistema aquático depende de processos abióticos e bióticos (Duran e Cravo-Laureau, 2016), principalmente por volatilização, foto-oxidação, bioacumulação e biodegradação (Othman *et al.* 2023). A

biodegradação por microrganismos também desempenha um papel significativo nos processos de remoção de PAHs em ecossistemas aquáticos (González-Gaya *et al.* 2019), e a utilização microbiana de PAHs como fonte de carbono.

#### **4 METODOLOGIA**

A fundamentação teórica para a elaboração deste trabalho foi realizada por meio de um levantamento bibliográfico utilizando-se palavras-chave (Microalgae, Bioremediation, Organic Compounds, Remediation, Biomass) via plataformas de bases de dados científicos, sejam elas: Portal de Periódicos Capes, ScienceDirect, Scientific Electronic Library Online (SciELO-Brasil) e demais Repositórios Digitais que contém teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso. Nesta busca bibliográfica foram selecionados artigos cujo escopo se assemelhavam à proposta deste trabalho considerando um período de 1988 a 2024.

A partir do levantamento bibliográfico, foi realizada uma revisão dos estudos desenvolvidos nos últimos anos, avaliando o avanço nas pesquisas no potencial de utilização das microalgas em processos de biorremediação envolvendo compostos orgânicos. Além disso, em paralelo, foram verificadas quais as espécies são consideradas as mais aptas a esta utilização e os principais efluentes envolvidos nos processos, levando-se em consideração os aspectos ecológicos e sua eficiência. Por fim, foi verificada a aplicabilidade dos coprodutos e subprodutos de biomassa para uso biotecnológico ou em larga escala produtiva.

#### **5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

Uma maneira de investigar o potencial de biorremediação e tolerância das microalgas aos compostos orgânicos é encorajar as células a crescerem em sua presença. Para esta finalidade, experimentos devem ser realizados com espécies de microalgas que se adaptam ao cultivo em escala laboratorial. As microalgas são consideradas microrganismos versáteis, que se adaptam a condições hostis e podem ser cultivadas em águas residuais para obter biomassa e remediação de nutrientes (Paula, Chagas e Mendonça, 2023).

Há inúmeras pesquisas utilizando-se microalgas marinhas, água doce e salobra no cultivo com diferentes tipos de efluentes. Em uma revisão de literatura, obteve-se um total de dezoito espécies de microalgas verdes conforme listadas na

Tabela 01, as quais foram expostas a cultivos contendo compostos orgânicos. A biomassa dessas espécies de microalga gerada nos processos de cultivo apresentou possíveis aplicações industriais promissoras. Entretanto, os cultivos com esses organismos se concentram na remoção de metais pesados e de nutrientes como fósforo, nitrato, amônia, entre outros.

TABELA 1 - Lista das espécies de microalgas obtidas por revisão de literatura conforme listado na Tabela 2, considerando seu ambiente aquático, característica e principais aplicações.

Espécie	Habitat	Característica	Aplicação e Subprodutos
<b>Chlorellaceae</b>			
<i>Chlorella fusca</i>	Água doce	Microalga verde	Produtos alimentícios (Liang <i>et al.</i> 2004);
<i>Chlorella miniata</i>	Água doce	Microalga verde	Produtos alimentícios (Liang <i>et al.</i> 2004);
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Água doce	Microalga verde	Produtos alimentícios (Liang <i>et al.</i> 2004);
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Água doce	Microalga verde	Tratamento de efluentes (Wang <i>et al.</i> 2008); Produção de óleos (Lizzul <i>et al.</i> 2014); Produtos alimentícios (Liang <i>et al.</i> 2004);
<i>Chlorella vulgaris</i>	Água doce	Microalga verde	Bioestimulante e biofertilizante (Ferreira <i>et al.</i> 2024; Minaoui <i>et al.</i> 2024; Cao <i>et al.</i> 2023); Cosméticos e produtos de beleza (Stolz e Obermayer, 2005); Produtos alimentícios (Bhattacharya e Goswami, 2020; Becker, 2007; Liang <i>et al.</i> 2004); Biogás (Mussnug <i>et al.</i> 2010; Carlson <i>et al.</i> 2007); Biodiesel (Chisti, 2007); Biometano (Brányiková <i>et al.</i> 2011); Produtos farmacêuticos (Bumbak <i>et al.</i> 2011); Suplementos e vitaminas (Durdakova <i>et al.</i> 2024);
<b>Closteriaceae</b>			
<i>Closterium lunula</i>	Água doce	Microalga verde	
<b>Monodopsidaceae</b>			
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Água salobra	Microalga verde	Cosméticos e produtos de beleza (Stolz e Obermayer, 2005); Produtos farmacêuticos (Lubián <i>et al.</i> 2000); Suplementos e vitaminas (Durmaz, 2007); Aquicultura e nutrição animal (Bhattacharya e Goswami, 2020)

Espécie	Habitat	Característica	Aplicação e Subprodutos
<b>Ochromonadaceae</b>			
<i>Ochromonas danica</i>	Água salgada	Microalga verde	
<b>Scenedesmaceae</b>			
<i>Coelastrum reticulatum</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Scenedesmus acutus</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Scenedesmus platydiscus</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Scenedesmus sp</i>	Água doce	Microalga verde	Biogás (Mussnug <i>et al.</i> 2010); Tratamento de efluentes (Molazadeh <i>et al.</i> 2019)
<b>Selenastraceae</b>			
<i>Ankistrodesmus braunii</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Água doce	Microalga verde	
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Água doce	Microalga verde	

FONTE: A Autora, 2024.

LEGENDA: Em negrito refere-se à descrição da família no qual a espécie pertence.

A investigação sobre a tolerância das microalgas à exposição a compostos orgânicos revelou uma capacidade adaptativa entre as diferentes espécies avaliadas, conforme dados apresentados na Tabela 02. Observa-se que as espécies de microalgas verdes dos gêneros *Chlorella* e *Scenedesmus* são as mais empregadas nos trabalhos científicos com essa finalidade. Essas microalgas verdes são comumente utilizadas principalmente por apresentarem rápido crescimento celular em comparação com outros organismos, o que permite o seu cultivo em larga escala e em pouco tempo.

TABELA 2 - Potencial de biorremediação de diversos compostos orgânicos por microalgas.

Espécie	Composto (s) remediado (s)	Concentração	Potencial de remoção (%)	Toxicidade	Biomassa obtida	Referência
<i>Ankistrodesmus braunii</i>	Fenol	400 mg.mL <sup>-1</sup>	≥ 70%	-	-	Pinto <i>et al.</i> 2002
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	Dibenzofurano	0,1 mM	7%	-	6,3x10 <sup>7</sup> células.mL <sup>-1</sup>	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella fusca</i>	Bisfenol A	10 a 160 mM	82 - 90%	-	3,3 g.L <sup>-1</sup> de peso seco	Hirooka <i>et al.</i> 2005
<i>Chlorella miniata</i>	Tributilestanho	32,5 µg em células vivas e 90 µg mortas	85% e 62% respectivamente	-	0,087 e 0,030 g.L <sup>-1</sup> de peso seco respectivamente	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2,4-diclorofenol	100 µg.L <sup>-1</sup>	93,5% com pH 7,0	≥ 200 µg.L <sup>-1</sup>	49,4 mg.L <sup>-1</sup>	Li <i>et al.</i> 2018
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Fenantreno	0,562 mM	23%	> 0,056 mM (10 mg.L)	-	Borde <i>et al.</i> 2003
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Fenol	2,66 mM	89%	> 5 mM (470 mg.L)	-	Borde <i>et al.</i> 2003
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Tributilestanho	32,5 µg em células vivas e 90 µg mortas	64% com as células vivas	-	0,661 e 0,051 g.L <sup>-1</sup> de peso seco respectivamente	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fluoranteno; Pireno	1,0 mg.L <sup>-1</sup>	47,8%	27,2 % em 7 dias	147,4 mg.L <sup>-1</sup> peso seco	Lei <i>et al.</i> 2007
<i>Chlorella vulgaris</i>	Naftaleno	0,1 mM	0,36-0,65%	-	6,3x10 <sup>7</sup> células.mL <sup>-1</sup>	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tributilestanho	100 µg.L <sup>-1</sup>	40%	130 µg.L <sup>-1</sup>	-	Tsang <i>et al.</i> 1999
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fluoreno	2, 10, 25 e 50 mg.L <sup>-1</sup>	-	50 mg.L <sup>-1</sup>	5,5; 5,1; 3,2 e 2,5 mg.L <sup>-1</sup> de peso seco respectivamente	Asghari <i>et al.</i> 2020
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fluoranteno	5 e 25 µM	54-58% após 3 dias; 90-94% após 7 dias	≥ 25 µM	0,34 e 0,25 mg.mL respectivamente	Tomar e Jajoo, 2021
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fenantreno	0,1; 1,0; 10; 100 e 1000 µg.L <sup>-1</sup>	-	-	0,09 x10 <sup>6</sup> célula.mL <sup>-1</sup>	Calderón-Delgado <i>et al.</i> 2020

Espécie	Composto (s) remediado (s)	Concentração	Potencial de remoção (%)	Toxicidade	Biomassa obtida	Referência
<i>Closterium lunula</i>	Ftalato de dimetila	100 mg.L <sup>-1</sup>	35%	331 mg.L <sup>-1</sup>	-	Yan e Pan, 2004
<i>Coelastrum reticulatum</i>	Bisfenol A	2 e 5 mg.L <sup>-1</sup>	Remoção de 1 µg (mg.L <sup>-1</sup> peso seco)	-	5 µg (mg.L <sup>-1</sup> de peso seco)	Nakajima <i>et al.</i> 2007
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Naftaleno	2789,36 µg.L <sup>-1</sup>	96%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Acenaftileno	8,54 µg.L <sup>-1</sup>	95%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Fluoreno	49,27 µg.L <sup>-1</sup>	91%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Fenantreno	164,16 µg.L <sup>-1</sup>	83%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Benzo(b)fluoranteno	1,98 µg.L <sup>-1</sup>	95%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Dibenzo(a,h)antraceno	0,1 µg.L <sup>-1</sup>	90%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Benzo(a)pireno	3,17 µg.L <sup>-1</sup>	95%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Benzo(a)antraceno	0,63 µg.L <sup>-1</sup>	60%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Criseno	3,48 µg.L <sup>-1</sup>	83%	-	-	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Ochromonas danica</i>	Fenol	0,5 e 1,0 mM	65%	-	-	Semple e Cain, 1996
<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Bisfenol A	2,5 e 10 mg.L <sup>-1</sup>	Remoção de 2 µg (mg.L <sup>-1</sup> peso seco)	10 mg.L <sup>-1</sup>	11 µg (mg.L <sup>-1</sup> de peso seco)	Nakajima <i>et al.</i> 2007
<i>Scenedesmus acutus</i>	Bisfenol A	2 e 5 mg.L <sup>-1</sup>	Remoção 0,5 µg (mg.L <sup>-1</sup> peso seco)	-	16 µg (mg.L <sup>-1</sup> de peso seco)	Nakajima <i>et al.</i> 2007
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Tributilestanho	32,5 µg em células vivas e 90 µg mortas	35 e 90% respectivamente	-	2,180 e 0,197 g.L <sup>-1</sup> de peso seco respectivamente	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Scenedesmus platydiscus</i>	Fluoranteno; Pireno	1,0 mg.L <sup>-1</sup>	50,4%	23,1% em 7 dias	198,9 mg.L <sup>-1</sup> peso seco	Lei <i>et al.</i> 2007



Espécie	Composto (s) remediado (s)	Concentração	Potencial de remoção (%)	Toxicidade	Biomassa obtida	Referência
<i>Scenedesmus platydiscus</i>	Tributilestanho	32,5 µg em células vivas e 90 µg mortas	35 e 90% e respectivamente	-	2, 708 e 0,868 g.L <sup>-1</sup> de peso seco respectivamente	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Fenol	400 mg.mL <sup>-1</sup>	≥ 70%	-	-	Pinto <i>et al.</i> 2002
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Fluoranteno; Pireno	1,0 mg.L <sup>-1</sup>	50,5%	22,8% em 7 dias	49,9 mg.L <sup>-1</sup> peso seco	Lei <i>et al.</i> 2007
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Bisfenol A	2 e 5 mg.L <sup>-1</sup>	Remoção de 1 µg (mg.L <sup>-1</sup> peso seco)	-	5 µg (mg.L <sup>-1</sup> de peso seco)	Nakajima <i>et al.</i> 2007
<i>Scenedesmus sp.</i>	Dibenzo- p- dioxina	0,1 mM	3,8%	-	6,3x10 <sup>7</sup> células.mL <sup>-1</sup>	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Fluoranteno; Pireno	1,0 mg.L <sup>-1</sup>	77,5%	0,9% em 7 dias	219,2 mg.L <sup>-1</sup> peso seco	Lei <i>et al.</i> 2007
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Benzo[a]pireno	0,4 µg.mL	71,4%	-	5x10 <sup>5</sup> células.mL	Warshawsky <i>et al.</i> 1988
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Fenantreno	1 mg.L	96%	-	1x10 <sup>7</sup> células.mL	Chan <i>et al.</i> 2006
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Fluoranteno	0,25 mg.L	100%	-	5x10 <sup>6</sup> células.mL	Chan <i>et al.</i> 2006
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Pireno	0,1 mg.L	100%	-	5x10 <sup>6</sup> células.mL	Chan <i>et al.</i> 2006

FONTE: A Autora (2024).

*Chlorella*, *Nannochloropsis* e *Selenastrum* demonstram uma forte capacidade de remoção de compostos orgânicos, com taxas de 94%, 96% e 100% de remoção quando cultivadas na presença de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAH), respectivamente. Logo, tornam-se muito atrativas em sistemas de tratamento de efluentes industriais, visto que esses compostos aromáticos policíclicos, como fluoreno, fenantreno, acenafteno e naftaleno, são frequentemente encontrados em águas residuais originadas de atividades industriais. Essas substâncias podem ser originadas de atividades antrópicas incluindo a gaseificação de carvão mineral, plantas de liquefação, fabricação de asfalto e piche, refinarias de petróleo, produção de alumínio, exaustão de veículos (Ramesh *et al.* 2023), entre outros.

Além disso, as espécies encontradas neste trabalho de revisão apresentam a capacidade de se adaptarem a diferentes condições ambientais, tais como variações de luz, temperatura e concentrações de efluentes, de acordo com o que se observa na Tabela 03.

TABELA 3 - Condições de cultivo de microalgas expostas a diversos compostos orgânicos.

Espécie	Composto (s) remediado (s)	Tempo de cultivo	Aeração	Tipo de reator	Volume de cultivo	Regime de iluminação	Referência
<i>Ankistrodesmus braunii</i> <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Fenol	5 dias <sup>1</sup>	-	Frascos Erlenmeyer de 100 mL	50 mL com 2 g.L <sup>-1</sup> de algas	100 $\mu\text{E m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ a 25 °C	Pinto <i>et al.</i> 2002
<i>Ankistrodesmus sp</i>	Dibenzofurano	5 dias <sup>1</sup>	-	Frasco Erlenmeyer	15-25 mL	7,52 $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 18 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella fusca</i>	Bisfenol A	168 h <sup>1</sup>	-	Frasco Erlenmeyer	100 mL	Iluminação de 18 W/m <sup>2</sup> a 27,58 °C, com ciclo 8/16 h (luz/escuro)	Hirooka <i>et al.</i> 2005
<i>Chlorella miniata</i> <i>Chlorella sorokiniana</i> <i>Scenedesmus dimorphus</i> <i>Scenedesmus platydiscus</i>	Tributilestanho	3 dias <sup>1</sup>	Ar filtrado de 0,2 mm	Frasco c\u00f4nico de 500 mL	300ml com 1×10 <sup>7</sup> c\u00e9lulas mortas.mL <sup>-1</sup>	175 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 25 ± 1 °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella miniata</i> <i>Chlorella sorokiniana</i> <i>Scenedesmus dimorphus</i> <i>Scenedesmus platydiscus</i>	Tributilestanho	3 a 14 dias <sup>1</sup>	Ar filtrado de 0,2 mm	Frascos c\u00f4nicos de 2 L	1,3 L com 1×10 <sup>7</sup> c\u00e9lulas vivas.mL <sup>-1</sup>	175 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 25 ± 1 °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Tam <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2,4-diclorofenol	120 h <sup>1</sup>	Agita\u00e7\u00e3o a 100 r.min <sup>-1</sup> por 6 h	Frasco de 100 mL	30 mL com biomassa de 174 mg.L <sup>-1</sup>	Ilumina\u00e7\u00e3o de 4000 lx a 25 ± 1 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Li <i>et al.</i> 2018
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Fenantreno	5 dias <sup>1</sup>	-	Frasco c\u00f4nico	21 mL	2500 Lux (Lutron LX-101 Lux Meter) a 23 °C, sob ilumina\u00e7\u00e3o cont\u00ednua	Borde <i>et al.</i> 2003
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Fenol	2 dias <sup>1</sup>	-	Frasco c\u00f4nico	21 mL	2500 Lux (Lutron LX-101 Lux Meter) a 23 °C, sob ilumina\u00e7\u00e3o cont\u00ednua	Borde <i>et al.</i> 2003

Espécie	Composto (s) remediado (s)	Tempo de cultivo	Aeração	Tipo de reator	Volume de cultivo	Regime de iluminação	Referência
<i>Chlorella vulgaris</i>	Naftaleno	5 dias <sup>1</sup>	-	Frasco Erlenmeyer	15-25 mL	7,52 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 18 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fluoreno	7 dias <sup>1</sup>	Aeração contínua	Frascos Erlenmeyer 250 mL	100 mL	80 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 25 $\pm$ 2 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Asghari <i>et al.</i> 2020
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fluoranteno	15 dias <sup>1</sup>	Agitação manual 2 a 3x ao dia	Frascos c\^onicos 250 mL	150 mL	100 $\mu\text{mol s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ a 25 °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Tomar e Jajoo, 2021
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fenantreno	7 dias <sup>1</sup>	Agitação constante a 160-170 rpm	Frascos de vidro	0,25 L com $9,0 \times 10^5$ células.mL <sup>-1</sup>	36,8 $\pm$ 4,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 20 $\pm$ 1 °C sob iluminação contínua	Calder\^on-Delgado <i>et al.</i> 2019
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tributilestanho	7 dias <sup>1</sup>	Ar filtrado de 0,2 $\mu\text{m}$ , 35 mL.min <sup>-1</sup>	Frasco c\^onico	600 ml com $3,5 \times 10^6$ células.mL <sup>-1</sup>	100 $\mu\text{Em}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 25 $\pm$ 1 °C, com ciclo 18/6 h (luz/escuro)	Tsang <i>et al.</i> 1999
<i>Closterium lunula</i>	Ftalato de dimetila	6 dias <sup>1</sup>	-	Frascos de vidro 100 mL	30 mL	3000 lux a 24 °C, com ciclo de 12/12 h (luz/escuro)	Yan e Pan, 2004
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Naftaleno; Acenaftileno; Fluoreno; Fenantreno; Benzo(b)fluoranteno; Dibenzo(a,h)antraceno; Benzo(a)pireno; Benzo(a)antraceno; Criseno	28 dias <sup>1</sup>	3 L.min <sup>-1</sup>	Fotobiorreator cil\^indrico de borossilicato	2,5 L	57 $\mu\text{M s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ a 21 $\pm$ 0,9 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Marques <i>et al.</i> 2021
<i>Ochromonas danica</i>	Fenol	14 a 21 dias <sup>1</sup>	-	Frasco c\^onico	50 ml com $10^3$ células.mL <sup>-1</sup>	150 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 25 °C, com ciclo claro/escuro	Semple e Cain, 1996
<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> <i>Scenedesmus acutus</i> <i>Coelastrum reticulatum</i>	Bisfenol A	10 dias <sup>1</sup>	-	Frasco de vidro	5 mL	40 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a 25 °C, sob iluminação contínua	Nakajima <i>et al.</i> 2007

Espécie	Composto (s) remediado (s)	Tempo de cultivo	Aeração	Tipo de reator	Volume de cultivo	Regime de iluminação	Referência
<i>Scenedesmus sp</i>	Dibenzo-p-dioxina	5 dias <sup>1</sup>	-	Frasco Erlenmeyer	15-25 mL	7,52 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ a 18 °C, com ciclo 12/12 h (luz/escuro)	Todd <i>et al.</i> 2002
<i>Selenastrum capricornutum</i> <i>Scenedesmus platydiscus</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Fluoranteno; Pireno	7 dias <sup>1</sup>	Ar filtrado de 0,2 $\mu\text{m}$	Frasco cônico	250 mL	175 $\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ a 23 °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Lei <i>et al.</i> 2007
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Fenantreno, Fluoranteno e Pireno	168 h <sup>1</sup>	Ar filtrado de 0,2 mm	Frasco Erlenmeyer	100 mL	50 $\mu\text{E/s}$ a $22 \pm 2$ °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Chan <i>et al.</i> 2006
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Benzo[a]pireno	24 a 41 horas <sup>1</sup>	-	Frasco Erlenmeyer	25 mL	Lâmpadas F20T12/CW a 23 °C, com ciclo 16/8 h (luz/escuro)	Warshawsky <i>et al.</i> 1988

FONTE: A Autora (2024).

LEGENDA: Os números indicam o tipo de escala de cultivo: 1= laboratorial; 2= industrial; 3= piloto.

Conforme Marques *et al.* (2021), a remoção de PAHs em água usando microalgas pode ocorrer por diferentes vias como bioacumulação intracelular (Subashchandrabose *et al.* 2013), bioissorção (Mustafa *et al.* 2021) ou biodegradação (Hernández Blanco e García de Llasera, 2016), que podem ser isoladas ou usadas em conjunto dependendo da espécie e do composto a ser removido.

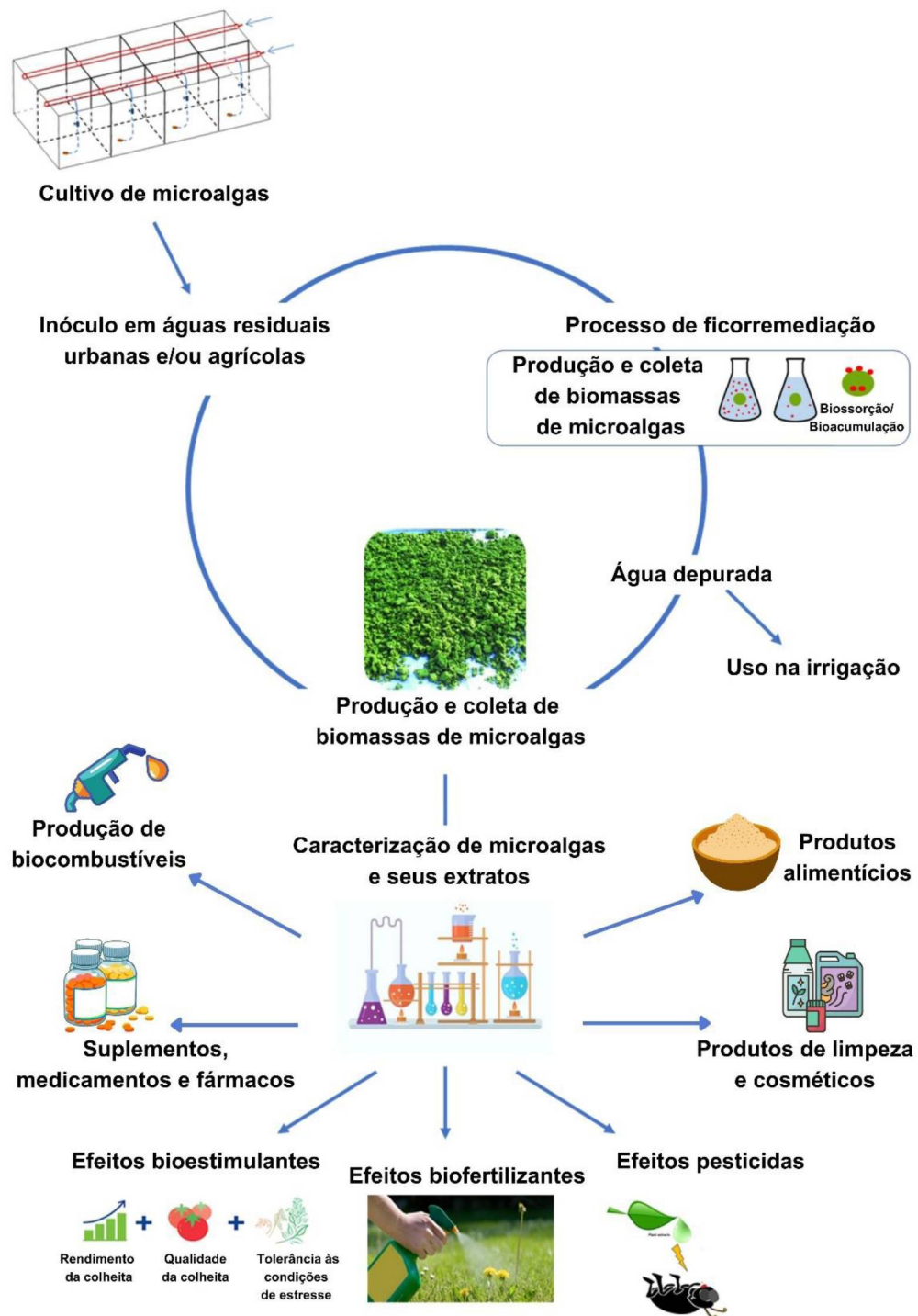
As algas são capazes de remover contaminantes perigosos, tal como metais pesados, compostos de corantes, compostos aromáticos e pesticidas utilizando a bioissorção, que é considerada um processo passivo (Ramesh *et al.* 2023). Esse processo torna-se interessante porque os organismos bioissorventes possuem, principalmente em suas paredes celulares, uma quantidade variável e grande de grupamentos orgânicos como, por exemplo, amidas, aminas, ácidos carboxílicos e fenóis (Dias *et al.* 2019), responsáveis pelos mecanismos bioquímicos e fisiológicos desses indivíduos. Diante disso, a parede celular das microalgas rica em polissacarídeos e proteínas apresenta esses grupos funcionais que permitem a interação e retenção desses poluentes.

Conforme Marques *et al.* (2021), a composição lipofílica das células das microalgas tem maior afinidade com PAHs apolares e de alto peso molecular por serem também hidrofóbicos. Essa capacidade de adsorção lipofílica pode ser muito interessante para a geração de produtos de valor agregado, uma vez que esses compostos podem ser recuperados da biomassa para gerar biocombustíveis.

Conforme La Bella *et al.* (2022), a utilização das microalgas para biotratamento é uma opção excelente pela sua capacidade de tratar efluentes em única etapa e a biomassa obtida pode ser aplicada em biocombustíveis e químicos de valor agregado. Ainda, de acordo com os autores, as microalgas mais usadas no tratamento de águas residuais são *Chlorella sp.*, *Ankistrodesmus sp.* e *Scenedesmus sp.* corroborando com os dados encontrados neste trabalho de revisão.

O uso de microalgas tem sido investigado como uma alternativa para promover a economia circular (Marques *et al.* 2021; Qie *et al.* 2019), onde a biomassa gerada nos processos de cultivo é reutilizada para gerar produtos de valor agregado, como por exemplo cosméticos, fertilizantes, biocombustíveis, biopolímeros, enzimas (Brasil *et al.* 2017), pesticidas, bioestimulantes e alimentos (Figura 3).

FIGURA 3 - Aplicações de microalgas usadas no tratamento de águas residuais.



Fonte: Adaptado de La Bella *et al.* (2022).

Nesse sentido, o uso das microalgas surge como uma opção ímpar, visto que elas absorvem o  $\text{CO}_2$  do meio ambiente e produzem o  $\text{O}_2$  pelo processo de fotossíntese, realizando a biorremediação de águas contaminadas por diversos efluentes, originados pelas indústrias de laticínios, cervejarias, agroindústrias, esgotos



domésticos, dentre outros. Ademais, a biomassa obtida das microalgas também é uma alternativa para uma série de subprodutos e aplicações biotecnológicas (Paula, Chagas e Mendonça, 2023).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo sobre a tolerância das microalgas frente à exposição a compostos orgânicos no contexto da biorremediação revelou resultados promissores e destacou o papel fundamental dessas espécies frente a ambientes aquáticos contaminados. As microalgas demonstraram uma capacidade significativa de adaptação e resistência a diferentes tipos de compostos orgânicos, destacando-se como um organismo eficaz para a remediação de ambientes aquáticos contaminados.

Os levantamentos bibliográficos realizados neste trabalho evidenciaram que certas espécies de microalgas possuem uma notável capacidade de adaptação e resistência a concentrações de compostos orgânicos tóxicos, o que as torna promissoras para a descontaminação de áreas afetadas por derramamentos de petróleo, efluentes industriais e outros poluentes. As espécies *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata* e *Selenastrum capricornutum* apresentaram maior capacidade que lhes permitem degradar e metabolizar compostos orgânicos complexos, contribuindo para a redução da toxicidade e a melhoria da qualidade da água. Além disso, a utilização de microalgas na biorremediação oferece uma abordagem sustentável e ecologicamente correta, alinhada com os princípios de economia circular e preservação ambiental.

Além de contribuírem para a redução da carga poluente, as microalgas também se mostraram capazes de degradar os compostos orgânicos, promovendo a recuperação do ecossistema aquático de maneira sustentável e geração de biomassa como subproduto no processo, sendo possível desenvolver aplicações biotecnológicas.

É importante ressaltar que a eficácia da biorremediação com microalgas pode variar conforme a espécie, as condições ambientais e a concentração dos poluentes. Portanto, é necessário aprofundar o conhecimento sobre os processos bioquímicos e fisiológicos envolvidos, na otimização das condições de cultivo e na identificação de novas espécies de microalgas com potencial biorremediador ainda maior para promover sua utilização em larga escala.

Em suma, a aplicação de microalgas na biorremediação representa uma estratégia promissora para a mitigação da poluição aquática, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a saúde dos ecossistemas marinhos. A continuidade das pesquisas nesse campo é essencial para aprimorar as técnicas de tratamento, explorar novas espécies com maior tolerância, desenvolver aplicações biotecnológicas utilizando a biomassa gerada como subproduto sustentável e expandir o uso das microalgas em diferentes contextos de contaminação.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABUQAMAR, S. F.; EL-FATTAH, H. I. A.; NADER, M. M.; ZAGHLOUL, R. A.; EL-MAGEED, T. A. A.; SELIM, S.; OMAR, B. A.; MOSA, W. F.; SAAD, A. M.; EL-TARABILY, K. A.; EL-SAADONY, M. T. Exploiting fungi in bioremediation for cleaning-up emerging pollutants in aquatic ecosystems. **Marine Environmental Research**, 190, 106068, 2023.
- AL-JABRI, H.; DAS, P.; KHAN, S.; THAHER, M.; ABDULQUADIR, M. Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass - A Review. **Water**, [S.L.], 13 (1): 1-27, 2021.
- ASGHARI, S.; RAJABI, F.; TARRAHI, R.; SALEHI-LISAR, S. Y.; ASNAASHARI, S.; OMIDI, Y.; MOVAFEGHI, A. Potential of the green microalga *Chlorella vulgaris* to fight against fluorene contamination: evaluation of antioxidant systems and identification of intermediate biodegradation compounds. **Journal of Applied Phycology**, 32: 411-419, 2020.
- BECKER, E. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* 25, 207–210, 2007.
- BECKER, W. MICROALGAE IN HUMAN AND ANIMAL NUTRITION. **Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology**, [S.L.], 25: 312-351, 2003.
- BERTOLDI, F. C.; SANT'ANNA, E.; OLIVEIRA, J. L. B. REVISÃO: **BIOTECNOLOGIA DE MICROALGAS: biotecnologia**. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, Universidade Federal do Paraná. [S.L.], 26 (1): 9-20, 2008.
- BHATTACHARYA, M.; GOSWAMI, S. Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 25, 101580, 2020.
- BOEHM, P. D.; NEFF, J. M.; PAGE, D. S. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in the waters of Prince William Sound after the Exxon Valdez oil spill: 1989–2005. **Marine Pollution Bulletin**, 54: 339–367, 2007.
- BORDE, X.; GUIEYSSE, B.; DELGADO, O.; MUÑOZ, R.; HATTI-KAUL, R.; NUGIER-CHAUVIN, C.; PATIN, H.; MATTIASSON, B. Synergistic relationships in algal-bacterial microcosms for the treatment of aromatic pollutants. **Bioresource Technology**, [S.L.], 86 (3): 293-300, 2003.
- BOROWITZKA, M. A. Biology of microalgae. **Microalgae for biofuels and bioenergy**, 45-71, 2018.
- BRÁNYIKOVÁ, I.; MARŠÁLKOVÁ, B.; DOUCHA, J.; BRÁNYIK, T.; BIŠOVÁ, K.; ZACHLEDER, V.; VÍTOVÁ, M. Microalgae - novel highly efficient starch producers. **Biotechnol. Bioeng.**, 108: 766-776, 2011.

BRASIL, B. S. A. F.; SIQUEIRA, F. G.; SALUM, T. F. C.; ZANETTE, C. M.; SPIER, M. R. Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories. **Algal Research**, 25: 76-89, 2017.

BUMBAK, F.; COOK, S.; ZACHLEDER, V.; HAUSER, S.; KOVAR, K. Best practices in heterotrophic high-cell-density microalgal processes: achievements, potential and possible limitations. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, 91: 31-46, 2011.

CALDERÓN-DELGADO, I. C.; MORA-SOLARTE, D. A.; VELASCO-SANTAMARÍA, Y. M. Respuestas fisiológicas y capacidade antioxidante de *Chlorella vulgaris* (Chlorellaceae) expuesta a fenantreno. **Acta Biológica Colombiana**, 25 (2): 225-234, 2020.

CAO, T. N. D.; MUKHTAR, H.; LE, L. T.; TRAN, D. P. H.; NGO, M. T. T.; PHAM, M. D.T.; NGUYEN, T. B.; VO, T. K. Q.; BUI, X. T. Roles of microalgae-based biofertilizer in sustainability of green agriculture and food-water-energy security nexus. **Science of The Total Environment**, 870, 161927, 2023.

CARLSON, A. S.; VAN BEILEN, J. B.; MOELLER, R.; CLAYTON, D. **Micro-and macro-algae: utility for industrial applications**. CPL Press, Newbury, 2007.

CHAN, S. M. N.; LUAN, T.; WONG, M. H.; TAM, N. F. Y. Removal and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Selenastrum capricornutum*. **Environmental Toxicology and Chemistry**, 25 (7): 1772–1779, 2006.

CHEN, J. P.; YANG, L. Chemical modification of *Sargassum sp.* for prevention of organic leaching and enhancement of uptake during metal biosorption. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 44: 9931–9942, 2005.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, 25 (3): 294-306, 2007.

DELL'ANNO, F.; VAN ZYL, L. J.; TRINDADE, M.; BUSCHI, E.; CANNAVACCIUOLO, A.; PEPI, M.; SANSONE, C.; BRUNET, C.; IANORA, A.; PASCALE, D.; GOLYSHIN, P. N.; DELL'ANNO, A.; RASTELLI, E. Microbiome enrichment from contaminated marine sediments unveils novel bacterial strains for petroleum hydrocarbon and heavy metal bioremediation. **Environmental Pollution**, 317, 120772, 2023.

DIAS, G.; HIPÓLITO, M.; SANTOS, F.; LOUREGA, R.; MATTIA, J.; EICHLER, P.; ALVES, J. BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES POR MEIO DA APLICAÇÃO DE MICROALGAS – UMA REVISÃO. **Química Nova**, [S.L.], 42 (8): 891-899, 2019.

DURAN, R.; CRAVO-LAUREAU, C. Role of environmental factors and microorganisms in determining the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment. **FEMS Microbiology Reviews**, 40: 814-830, 2016.

DURDAKOVA, M.; KOLACKOVA, M.; RIDOSKOVA, A.; CERNEI, N.; PAVELICOVA, K.; URBIS, P.; RICHTERA, L.; PELCOVA, P.; ADAM, V.; HUSKA, D. Exploring the potential nutritional benefits of *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris*: A focus on vitamin B12, amino acids, and micronutrientes. **Food Chemistry**, 452, 139434, 2024.

DURMAZ, Y. Vitamin E ( $\alpha$ -tocopherol) production by the marine microalgae *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae) in nitrogen limitation. **Aquaculture**, 272: 717-722, 2007.

FERREIRA, E. S.; BINOTTI, F. F. S.; BINOTTI, E. D. C.; COSTA, E.; PRADI, E. V.; LIMA, S. F. NETO, F. A. C. Potentiating *Chlorella vulgaris* bioinput as a growth biostimulant in the production of basil seedlings with the addition of vitamin B3. **Algal Research**, 83, 103706, 2024.

FRANCO, A. L. C.; LÔBO, I. P.; CRUZ, R. S.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; ALMEIDA NETO, J. A. D.; MENEZES, R. S. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. **Química Nova**, 36:437-48, 2013.

GONZÁLEZ-GAYA, B.; MARTÍNEZ-VARELA, A.; VILA-COSTA, M.; CASAL, P.; CERRO-GÁLVEZ, E.; BERROJALBIZ, N.; LUNDIN, D.; VIDAL, M.; MOMPEÁN, C.; BODE, A.; JIMÉNEZ, B.; DACHS, J. Biodegradation as an important sink of aromatic hydrocarbons in the oceans. **Nature Geoscience**, 12:119-125, 2019.

HERNÁNDEZ BLANCO, F. J.; GARCÍA DE LLASERA, M. P. Monitoring dihydrodiol polyaromatic hydrocarbon metabolites produced by the freshwater microalgae *Selenastrum capricornutum*. **Chemosphere**, 158: 80-90, 2016.

HIROOKA T.; NAGASE, H.; UCHIDA, K.; HIROSHIGE, Y.; EHARA, Y.; NISHIKAWA, J.; NISHIHARA, T.; MIYAMOTO, K.; HIRATA, Z. Biodegradation of bisphenol A and disappearance of its estrogenic activity by the green alga *Chlorella fusca* var. *vacuolata*. **Environmental Toxicology and Chemistry**, 24 (8): 1896-901, 2005.

HOSSEINIA, N. S.; SHANGA, H.; SCOTTA, J. A. Biosequestration of industrial off-gas CO<sub>2</sub> for enhanced lipid productivity in open microalgae cultivation systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 92: 458-469, 2018.

KE, L.; WONG, Y. S.; TAM, N. F. Y. **Toxicity and removal of organic pollutants by microalgae: A review**. Microalgae: Biotechnology, Microbiology and Energy, ed. / Melanie N. Johansen. New York: Nova Science Publishers, 101-140, 2012.

KOÇAK, T. K.; KOÇAK, G. O.; STUART, A. L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic media of Turkey: a systematic review of cancer and ecological risk. *Marine Pollution Bulletin*, [S.L.], 188, 114671, 2023.

KRONENBERG, M.; TRABLY, E.; BERNET, N.; PATUREAU, D. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: using microbial bioelectrochemical systems to overcome an impasse. **Environmental Pollution**, 231: 509–523, 2017.

LA BELLA, E.; BAGLIERI, A.; FRAGALÀ, F.; PUGLISI, I. Multipurpose Agricultural Reuse of Microalgae Biomasses Employed for the Treatment of Urban Wastewater. **Agronomy**, 12 (2): 234, 2022.

LEI, An-Ping; HU, Zhang-Li; WONG, Yuk-Shan; TAM, N. Fung-Yee. Removal of fluoranthene and pyrene by different microalgal species. **Bioresource Technology**, 98: 273-280, 2007.

LI, F.; ZHAO, L.; JINXU, Y.; SHI, W.; ZHOU, S.; YUAN, K.; SHENG, G. D. Removal of dichlorophenol by *Chlorella pyrenoidosa* through self-regulating mechanism in air-tight test environment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 164: 109-117, 2018.

LIANG, S., LIU, X., CHEN, F., CHEN, Z. Current microalgal health food R & D activities in China. In: Ang, P.O. (eds) Asian Pacific Phycology in the 21st Century: Prospects and Challenges. **Developments in Hydrobiology**, Springer, 173, 2004.

LIZZUL, A. M.; HELLIER, P.; PURTON, S.; BAGANZ, F.; LADOMMATOS, N.; CAMPOS, L. Combined remediation and lipid production using *Chlorella sorokiniana* grown on wastewater and exhaust gases. **Bioresour. Technol.**, 151: 12-18, 2014.

LUBIÁN, L. M.; MONTERO, O.; MORENO-GARRIDO, I.; HUERTAS, I. E.; SOBRINO, C.; GONZÁLEZ-DEL VALLE, M.; PARÉS, G. *Nannochloropsis* (Eustigmatophyceae) as source of commercially valuable pigments. **J. Appl. Phycol.**, 12: 249-255, 2000.

MADADI, R.; BESTER, K. Fungi and biochar applications in bioremediation of organic micropollutants from aquatic media. **Marine Pollution Bulletin**, 166, 112247, 2021.

MARQUES, I. M.; OLIVEIRA, A. C. V.; OLIVEIRA, O. M. C.; SALES, E. A.; MOREIRA, I. T. A. A photobioreactor using *Nannochloropsis oculata* marine microalgae for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and sorption of metals in produced water. **Chemosphere**, [S.L.], 281: 130775, 2021.

MEIRE, R. O.; AZEREDO, A.; PEREIRA, M. S.; TORRES, J. P. M. **Avaliação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em Áreas de Proteção Permanente no Sudeste brasileiro**. ed. / Ciência e Conservação na Serra dos Órgãos, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 255-267, 2007.

MEISLICH, H., NECHAMKIN, H. & SHAREFKIN, J. **Organic Chemistry: Based on Schaum's Outline of Organic Chemistry**. 3rd ed. McGraw Hill, New York, 138, 2000.

MINAOUI, F.; HAKKOUM, Z.; CHABILI, A.; DOUMA, M.; MOUHRI, K.; LOUDIKI, M. Biostimulant effect of green soil microalgae *Chlorella vulgaris* suspensions on germination and growth of wheat (*Triticum aestivum* var. Achtar) and soil fertility. **Algal Research**, 82: 103655, 2024.

MOLAZADEH, M., AHMADZADEH, H., POURIANFAR, H. R., LYON, S.; RAMPELOTTO, P. H. The use of microalgae for coupling wastewater treatment with CO<sub>2</sub> biofixation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, 7, 2019.

MRVČIĆ, J.; STANZER, D.; ŠOLIĆ, E.; STEHLIK-TOMAS, V. Interaction of lactic acid bacteria with metal ions: opportunities for improving food safety and quality. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 28 (9): 2771-2782, 2012.

MUSSGNUG, J. H.; KLASSEN, V.; SCHLÜTER, A.; KRUSE, O. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. **J. Biotechnol.**, 150: 51-56, 2010.

MUSTAFA, S.; BHATTI, H. N.; MAQBOOL, M.; IQBAL, M. Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: prospects, challenges and opportunities. **J. Water**

**Process Eng.**, 41, 2021.

NAKAJIMA, N.; TERAMOTO, T.; KASAI, K.; SANO, T.; TAMAOKI, M.; AONO, M.; KUBO, A.; KAMADA, H.; AZUMI, Y.; SAJI, H. Glycosylation of bisphenol A by freshwater microalgae. **Chemosphere**, 69 (6): 934-941, 2007.

NIZZETTO, L.; PASTORE, C.; LIU, X.; CAMPORINI, P.; SROPPIANA, D.; HERBERT, B.; BOSCHETTI, M.; ZHANG, G.; BRIVIO, P. A.; JONES, K. C.; DI GUARDO, A. Accumulation parameters and seasonal trends for PCBs in temperate and boreal forest plant species. **Environmental Science & Technology**, 42: 5911-5916, 2008.

OLAIZOLA, M. Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. **Biomolecular Engineering**, 20: 459-466, 2003.

ORTENZIO, Y. T.; AMARAL, G. G.; ALMEIDA, S. S.; OLIVEIRA, E. C. A. M. Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios. **Bioenergia em revista: diálogos**, 5 (1): 58-65, 2015.

OTHMAN, H. B.; PICK, F. R.; HLAILI, A. S.; LEBOULANGER, C. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on marine and freshwater microalgae – A review. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], 441, 129869, 2023.

PAULA, S. F. A.; CHAGAS, B. M. E.; MENDONÇA, R. A. Utilização de microalgas para o tratamento de efluentes e produção de biocombustível: uma revisão. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, [S. I.], 12 (25): 64–93, 2023.

PEREIRA, C. M.; HOBUSS, C. B.; MACIEL, J. V.; FERREIRA, L. R.; DEL PINO, F. B.; MESKO, M. F.; COLEPICOLO NETO, P.; Biodiesel renovável derivado de microalgas: Avanços e perspectivas tecnológicas. **Química Nova**, 35 (10): 2013-2018, 2012.

PINTO, G.; POLLIO, A.; PREVITERA, L.; TEMUSSI, F. Biodegradation of phenols by microalgae. **Biotechnology Letters**, 24: 2047–2051, 2002.

QIE, F.; ZHU, J.; RONG, J.; ZONG, B. Biological removal of nitrogen oxides by microalgae, a promising strategy from nitrogen oxides to protein production. **Bioresour. Technol.** 292, 2019.

RAMESH, B.; SARAVANAN, A.; Kumar, P. S.; YAASHIKAA, P.R.; THAMARAI, P.; SHAJI, A.; RANGASAMY, G. A review on algae biosorption for the removal of hazardous pollutants from wastewater: Limiting factors, prospects and recommendations. **Environmental Pollution**, 327, 121572, 2023.

RAWAT, I.; KUMAR, R. R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. **Applied Energy**, [S.L.], 88 (10): 3411-3424, 2011.

RODRIGUES, J. B. R.; BELLI FILHO, P. Eficiência da microalga *Chlorella minutissima* no tratamento de resíduos de suinocultura enriquecido com ureia. **Biotemas: Revista do Centro de Ciências Biológicas**, Florianópolis, 17 (2): 7-26, 2004.

SAR, T.; MARCHLEWICZ, A.; HARIRCHI, S.; MANTZOURIDOU, F. T.; HOSOGLU, M. I.; AKBAS, M. Y.; HELLWIG, C.; TAHERZADEH, M. J. Resource recovery and



treatment of wastewaters using filamentous fungi. **Science of The Total Environment**, 951, 175752, 2024.

SEMPLE, K. T.; CAIN, R. B. Biodegradation of phenols by the alga *Ochromonas danica*. **Appl Environ Microbiol.**, 62 (4): 1265-73, 1996.

SHAMSHAD, I.; KHAN, S.; MUHAMMAD, S.; WAQAS, M. Unrevealing the biosorption capacity of freshwater algae biomasses for toxic heavy metals in aqueous solutions. **Desalination and Water Treatment**, 184: 189-198, 2020.

SUBASHCHANDRABOSE, S. R.; RAMAKRISHNAN, B.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Mixotrophic cyanobacteria and microalgae as distinctive biological agents for organic pollutant degradation. **Environ. Int.** 51: 59-72, 2013.

SILVA, G. H. R.; POMPEI, C. M. E.; BOLZANI, H. R.; CARVALHO, L. A. M.; FERNANDES, L. M. Tratamento de águas residuárias utilizando microalgas/bactérias. Microalgas: potenciais aplicações e desafios. **Mérida Publishers**, [S.L.], 140-150, 2021.

STOLZ, P.; OBERMAYER, B. Manufacturing microalgae for skin care. **Cosmetics Toiletries**, 120: 99-106, 2005.

TAM, N. F. Y.; CHONG, A. M. Y.; WONG, Y. S. Removal of tributyltin (TBT) by live and dead microalgal cells. **Marine Pollution Bulletin**, 45: 362-371, 2002.

THACHARODI, A.; HASSAN, S.; SINGH, T.; MANDAL, R.; CHINNADURAI, J.; KHAN, H. A.; HUSSAIN, M. A.; BRINDHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: An updated microbiological review. **Chemosphere**, 328, 138498, 2023.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Editora Interciência, 2 ed., 271, 2004.

TODD, S. J.; CAIN, R. B.; SCHMIDT, S. Biotransformation of naphthalene and diaryl ethers by green microalgae. **Biodegradation**, 13: 229-238, 2002.

TOMAR, R. S.; JAJOO, A. Enzymatic pathway involved in the degradation of fluoranthene by microalgae *Chlorella vulgaris*. **Ecotoxicology**, 30: 268-276, 2021.

TSANG, C. K.; LAU, P. S.; TAM, N. F. Y.; WONG, Y. S. Biodegradation capacity of tributyltin by two *Chlorella* species. **Environmental Pollution**, 105 (3): 289-297, 1999.

VAKSMAA, A.; GUERRERO-CRUZ, S.; GHOSH, P.; ZEGHAL, E.; HERNANDO-MORALES, V.; NIEMANN, H. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. **Frontiers in Marine Science**, 10, 2023.

VILAR, V. J. P.; BOTELHO, C. M. S.; LOUREIRO, J. M.; BOAVENTURA, R. A. R. Biosorption of copper by marine algae *Gelidium* and algal composite material in a packed bed column. **Bioresource Technology**, 99 (13): 5830-5838, 2008.

WANG, B., LI, Y., WU, N.; LAN, C. Q. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 79 (5): 707-718, 2008.

WANG, M.; ZHANG, W.; HE, T.; RONG, L.; YANG, Q. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments by a symbiotic system consisting of algae and bacteria: green and sustainable technology. **Archives of Microbiology**, 206 (1):10, 2023.

WARSHAWSKY, D.; RADIKE, M.; JAYASIMHULU, K.; CODY, T. Metabolism of benzo(a)pyrene by a dioxygenase enzyme system of the freshwater green alga *Selenastrum capricornutum*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, 152 (2):540-544, 1988.

YAN, H.; PAN, G. Increase in biodegradation of dimethyl phthalate by *Closterium lunula* using inorganic carbon. **Chemosphere**, 55 (9): 1281-1285, 2004.

YUNKER, M. B.; MACDONALD, R. W.; VINGARZAN, R.; MITCHELL, H.; GOYETTE, D.; SYLVESTRE, S. PAHs in the Fraser river basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. **Organic Geochemistry**, 33: 489-515, 2002.

ZHANG, X.; ZHANG, ZI-FENG; ZHANG, X.; YANG, PU-FEI; LI, YI-FAN; CAI, M.; KALLENBORN, R. Dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons from the Northwestern Pacific to the Southern Ocean: Surface seawater distribution, source apportionment, and air-seawater exchange. **Water Research**, 207, 117780, 2021.