



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS
AMBIENTAIS

KAIO WÊDANN DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE
DE *Starmerella bombicola* ATCC 222214 NO
TRATAMENTO DE EFLUENTES E SISTEMAS
CONTAMINADOS COM PETRODERIVADOS**

Recife, 25 de janeiro de 2025

KAIO WÊDANN DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE
DE *Starmerella bombicola* ATCC 222214 NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE E SISTEMAS
CONTAMINADOS COM PETRODERIVADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo

Coorientadora: Dra. Rita de Cássia Freire Soares da Silva

Recife, 25 de janeiro de 2025

Ficha Catalográfica

O48p Oliveira, Kaio Wêdann de.

Produção e aplicação de biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 no tratamento de efluente e sistemas contaminados com petroderivados / Kaio Wêdann de Oliveira, 2025.

122f. : il.

Orientador(a): Leonie Asfora Sarubbo

Coorientador(a): Rita de Cássia F. Soares da Silva.

Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2025.

1. Biotecnologia. 2. Petróleo - Derivados.

3. Biossurfactantes. 4. Biorremediação. I. Título.

CDU 574.6

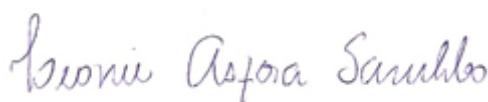
Luciana Vidal - CRB4/1338

Produção e aplicação de biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 no tratamento de efluente e sistemas contaminados com petroderivados. © 2025 by Kaio Wêdann de Oliveira is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE DE *Starmerella bombicola* ATCC 222214 NO TRATAMENTO DE EFLUENTE E SISTEMAS CONTAMINADOS COM PETRODERIVADOS

KAIO WÊDANN DE OLIVEIRA

Examinadores:



Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Documento assinado digitalmente
 **RAQUEL DINIZ RUFINO**
Data: 19/05/2025 20:16:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Raquel Diniz Rufino (Titular Interno)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 **ITALO JOSE BATISTA DURVAL**
Data: 20/05/2025 15:52:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Italo José Batista Durval (Titular Externo)
Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI)

Defendida em: 25/02/2025

Coordenador: Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida

Dedico este trabalho de dissertação aos meus pais, aos meus amigos e as minhas orientadoras, por confiarem e acreditarem no meu potencial e me apoiarem ao longo desse processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e toda a sua criação.

Agradeço a minha orientadora do mestrado, a Prof^a Dra^a Leonie Asfora Sarubbo, por ter tornado possível minha participação neste mestrado, abrindo um universo de possibilidades através do compartilhamento de seus conhecimentos comigo.

Agradeço a minha coorientadora, a Dra. Rita de Cássia Freire Soares da Silva, pela paciência, pelo cuidado e pela preocupação em cada etapa da jornada desse mestrado. Obrigado por compartilhar seus conhecimentos comigo.

Agradeço ao meu antigo coordenador de operações, Rafael Aristeu, e ao meu antigo líder de turma, Carlos Edgar Albuquerque de Souza Rocha, por todo apoio e flexibilidade que tiveram comigo.

Ao Coordenador da Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, o Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida, pela condução do programa.

Ao técnico Lucas Ferreira da Costa, dos laboratórios da UNICAP, por toda ajuda prestada ao longo dos experimentos realizados.

Às alunas de Doutorado Yslla Faccioli e Gleice Paula de Araújo, pelo apoio nos experimentos realizados em laboratório.

À Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pelo suporte financeiro.

Aos meus amigos e familiares que sempre me apoiaram e incentivaram todo o meu trajeto ao longo desse mestrado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Petróleo	21
3.1.1 Exploração e Refino do Petróleo	25
3.1.2 Petroderivados	29
3.1.2.1 Gasolina	29
3.1.2.2 Óleo Diesel	30
3.1.2.3 Óleo Combustível	30
3.1.2.4 Gás Liquefeito de Petróleo – GLP	31
3.1.2.5 Querosene	31
3.1.2.6 Parafinas	31
3.1.2.7 Tolueno	32
3.1.2.8 Asfalto	32
3.1.2.9 Coque	33
3.1.3 Impactos Causados Pelo Vazamento Do Petróleo E Seus Derivados	33
3.2 Surfactantes	35
3.2.1 Classificação dos Surfactantes	38
3.2.1.1 Surfactantes Aniônicos	38
3.2.1.2 Surfactantes Catiônicos	39
3.2.1.3 Surfactantes Não Iônicos	40
3.2.1.4 Surfactantes Anfóteros	41
3.2.2 Concentração Micelar Crítica	43
3.3 Biossurfactantes	44
3.3.1 Classificação dos Biossurfactantes	46
3.3.1.1 Glicolipídeos	46
3.3.1.2 Lipopeptídeos	48
3.3.1.3 Fosfolipídeos	48
3.3.1.4 Poliméricos	49
3.3.2 Propriedades dos Biossurfactantes	50
3.3.2.1 Redução de Tensão Superficial	50

3.3.2.2 Biodegradabilidade	50
3.3.2.3 Emulsificação	51
3.3.2.4 Atividade Anti-biofilme	51
3.3.2.5 Ação Antimicrobiana	52
3.3.2.6 Dispersão	52
3.3.2.7 pH e Temperatura	53
3.3.3 Aplicação de Biossurfactante na Área Industrial e Ambiental	53
3.3.3.1 Biossurfactante na Recuperação de Óleo Aprimorada (EOR)	53
3.3.3.2 Biossurfactante Aplicado na Limpeza de Tanque de Armazenamento de Petróleo	54
3.3.3.3 Aplicação de Biossurfactante no Transporte de Petróleo Bruto por Dutos	55
3.3.3.4 Tratamento de Derramamento de Óleo	55
3.3.3.5 Biorremediação	56
3.3.4 Perspectivas Futuras Sobre a Utilização dos Biossurfactantes	57
4 REFERÊNCIAS	59

CAPÍTULO II

1 INTRODUÇÃO	70
2 MATERIAIS E MÉTODOS	72
2.1 Materiais	72
2.2 Micro-organismo e Preparação do Inóculo	72
2.3 Influência de Substratos e Condições de Cultivo na Produção do Biossurfactante	73
2.4 Determinação da Tensão Superficial e da Concentração Micelar Crítica (CMC)	73
2.5 Determinação da Atividade de Emulsificação	73
2.6 Avaliação da Estabilidade do Biossurfactante	73
2.7 Extração e Isolamento do Biossurfactante	74
2.8 Composição Química do Biossurfactante	74
2.9 Análise de Ecotoxicidade	74
2.10 Experimentos de Dispersão de Compostos Hidrofóbicos em Água do Mar	74
2.11 Remoção de Contaminante Hidrofóbico em Areia e Solos Pelo Biossurfactante em Ensaio Cinético	74
2.12 Remoção de Contaminante Hidrofóbico em Areia e Solos Pelo Biossurfactante em Ensaio Estático	74
2.13 Limpeza de Superfície Oleosa	75
2.14 Desestabilização de Óleo de Motor e Diesel em Superfície Lisa	75
2.15 Aplicação do Biossurfactante no Tratamento de Efluente Oleoso Industrial	76
2.16 Análises Estatísticas dos Dados Obtidos	76

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
3.1 Meio de Produção do Biossurfactante	76
3.2 Tensão Superficial	78
3.3 Atividade de Emulsificação	78
3.4 Estabilidade do Biossurfactante Relacionada à Manutenção da Tensão Superficial	79
3.5 Concentração Micelar Crítica (CMC) do Biossurfactante	79
3.6 Análise de Ecotoxicidade com Sementes	80
3.7 Teste de Toxicidade com Artemia Salina	80
3.8 Composição Química do Biossurfactante	81
3.9 Dispersão de Compostos Hidrofóbicos em Água do Mar	81
3.10 Remoção de Contaminante Hidrofóbico em Areia e Solos Pelo Biossurfactante em Ensaio Cinético	81
3.11 Remoção de Contaminante Hidrofóbico em Areia e Solos Pelo Biossurfactante em Ensaio Estático	82
3.12 Limpeza de Petroderivados em Superfície Oleosa pelo Biossurfactante	83
3.13 Desestabilização de Petroderivados em Superfície Lisa	83
3.14 Aplicação do Biossurfactante no Tratamento de Efluente Oleoso Industrial	84
4 CONCLUSÕES	84
5 AGRADECIMENTOS	85
6 REFERÊNCIAS	85

CAPÍTULO III

1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTURO	113
3 ANEXOS	114
3.1 Normas da Revista	114
3.2 Comprovante de Submissão	114
3.3 Publicações e Participações em Eventos Científicos no Período do Mestrado	117

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 01. Esquema de formação de petróleo	22
Figura 02. Fluxograma da classificação do petróleo, enquanto aos elementos químicos	24
Figura 03. Refino do Petróleo	27
Figura 04. Exemplos De Parafinas (A) Normal, (B) Ramificada E (C) Cíclica	32
Figura 05. Representação de molécula anfifílica	36
Figura 06. Representação Esquemática Dos Surfactantes Catiônicos (A), Aniônicos (B), Anfóteros (C) E Não Iônicos (D). A Cauda Corresponde À Porção Apolar E A Cabeça À Porção Polar	37
Figura 07. Exemplos de surfactantes aniônicos	39
Figura 08. Representação esquemática do efeito lubrificante do surfactante Pseudo-Catiônico SAPDMA. A) Superfície de cabelo carregada negativamente; B) Surfactante sapdma absorvido na superfície do cabelo, realizando o recobrimento hidrofóbico do fio, e neutralizando as cargas negativas	40
Figura 09. Representação esquemática da estrutura das moléculas de surfactante na forma livre e após ocorrer a autoagregação; A) Parte Hidrofílica e B) Parte Hidrofóbica	43
Figura 10. Representação molecular de duas formas de soforolipídios. A) Forma lactônica e B) Forma ácida	47

CAPÍTULO II

Figura 01. seleção dos substratos e condições de cultivo para produção do biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214	101
Figura 02. Índice de emulsificação do biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm para os substratos hidrofóbicos (óleo de motor, diesel, querosene, hexano e óleo soja)	102

Figura 03. Tensão superficial do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm na presença de diferentes tempos de aquecimento à 90 °C (a), diferentes concentrações de pH(b), diferentes temperaturas(c) e diferentes de porcentagem de NaCl (d) 103

Figura 04. Determinação da concentração micelar crítica do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm 104

Figura 05. Ilustração da capacidade dispersante do óleo de motor na água do mar com ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm 105

Figura 06. Ilustração da remoção do óleo de motor na percolação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm 106

Figura 07. Representação da capacidade de remoção do óleo OCB1 em superfície lisa pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm 107

Figura 08. Percentual de remoção do óleo OCB1 e do óleo Diesel em placas de Petri pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm (A) Percentual de remoção de Óleo Diesel; (B) Percentual de remoção de Óleo OCB1 108

Figura 09. Representação da capacidade de remoção do óleo OCB1 e do óleo diesel em placas de Petri pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm 109

Figura 10. Ilustração do processo de remoção do óleo do efluente industrial pelo biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. (A) Efluente antes do teste; (B) Homogeneização do biossurfactante com o efluente; (C) Escala de adsorção do óleo contido no efluente pela ação do controle (água destilada) e do biossurfactante isolado na metade da CMC, na CMC e no dobro da CMC, respectivamente ... 110

LISTA DE TABELA

CAPÍTULO I

Tabela 01. Composição elementar média do petróleo	23
Tabela 02. Derivados do petróleo e seus principais usos	28
Tabela 03. Tipos de surfactantes químicos e características bioquímicas	41

CAPÍTULO II

Tabela 01. Meios e condições de cultivo avaliados para produção de biossurfactante pela levedura <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214	94
Tabela 02. Avaliação da fitotoxicidade do biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28°C, por 144h a 200rpm	95
Tabela 03. Avaliação da remoção do óleo de motor em ensaio cinético em areia e solos pelo biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm	96
Tabela 04. Porcentagem de remoção de óleo motor em ensaio estático em areia e solos pelo biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm	97
Tabela 05. Percentual de remoção dos compostos hidrofóbicos (óleo de motor e OCB1) das superfícies oleosas pela ação do biossurfactante de <i>Starmerella bombicola</i> ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm	98

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO II

Equação 01. Índice de Emulsificação	73
Equação 02. Índice de remoção de óleo OCB1 e óleo Diesel	75
Equação 03. Eficiência da remoção da fase oleosa do efluente	76

LISTA DE SIGLAS

BS: Biossurfactante

CMC: Concentração Micelar Crítica

D.O.: Densidade Óptica

EOR: Enhanced Oil Recovery

EPS: Substâncias Poliméricas Extracelulares

FDA: Food and Drug Administration

MEOR: Microbial Enhanced Oil Recovery

NPCIAMB: Culturas do Núcleo de Pesquisa em Ciências Ambientais

UCP: Universidade Católica de Pernambuco

RESUMO

Os derramamentos de combustíveis e de óleos lubrificantes que ocorrem nas indústrias durante abastecimentos de máquinas, tanques de armazenamento e a lavagem de tanques e equipamentos são os principais causadores do acúmulo de petroderivados no meio ambiente. Devido as atividades humanas, o derrame de petroderivados está entre as principais causas de poluição do solo e de corpos hídricos, causando mudanças drásticas nas propriedades microbiológicas, químicas e físicas do solo e superfície. Dessa forma, a aplicação de agentes tensoativos naturais surge como solução atrativa e eficiente dentre as tecnologias inovadoras para limpeza de tanques de estocagem de óleo e para o tratamento de solos contaminados e efluentes industriais. Portanto, este trabalho teve como objetivo, avaliar a obtenção e a aplicação de um biossurfactante produzido pela levedura *Starmerella bombicola* ATCC 22214, na descontaminação de ambientes marinhos e terrestres contaminados por óleo. A produção do biossurfactante pela levedura foi avaliada através do efeito de diferentes fontes de carbono/nitrogênio e condições de cultivo em frascos. O poder de remoção de compostos hidrofóbicos pela ação do biossurfactante em diferentes tipos de solos (argiloso e siltoso) e areia padrão foi avaliado. O poder de desestabilização do óleo pesado OCB1, do diesel e do óleo de motor em superfícies lisas, bem como a capacidade de remoção de óleo do efluente industrial pelo biossurfactante foi estudada. A partir das propriedades tensoativas mais promissoras, o meio de cultivo suplementado com 2,0% de glicose e 5,0% de glicerol, a velocidade de 200 rpm, o tempo de fermentação de 180 horas e o tamanho de inóculo de 5,0% foram selecionados. O rendimento do biossurfactante isolado foi de 1,5 g/L. As taxas de emulsificação de óleo de motor e óleo diesel foram de $86,6 \pm 0,22\%$ e $51,7 \pm 0,15\%$, respectivamente, indicando afinidade da biomolécula por hidrocarbonetos complexos. Em testes de estabilidade realizados em diferentes valores de pH, temperatura e concentração de NaCl, a tensão superficial variou de 25,82 a 32,30 mN/m (complementar a frase). A Concentração Micelar Crítica (CMC) foi de 0,4 g/L, nessa concentração a tensão superficial chegou ao valor de 26,85 mN/m. Nos ensaios cinéticos, o biossurfactante removeu $82,48 \pm 0,12$, $97,61 \pm 0,01$ e $99,01 \pm 0,02\%$ do óleo de motor adsorvido em areia, solo siltoso e solo argiloso, enquanto no teste estático em colunas empacotadas as remoções foram de $72,05 \pm 0,80$, $96,87 \pm 0,30$ e $99,50 \pm 0,03\%$, respectivamente. O biossurfactante produzido neste estudo demonstrou ser um agente promissor para aplicações de remediação ambiental no setor petrolífero e de energia, bem como em áreas industriais contaminadas por petróleo e derivados.

Palavras-chave: surfactante; levedura; biorremediação; remoção de hidrocarbonetos; petróleo; meio ambiente.

ABSTRACT

Fuel and lubricating oil spills that occur in industries during the refueling of machines, storage tanks and the washing of tanks and equipment are the main causes of the accumulation of petroleum derivatives in the environment. Due to human activities, petroleum derivative spills are among the main causes of soil and water pollution, causing drastic changes in the microbiological, chemical and physical properties of the soil and surface. Thus, the application of natural surfactants emerges as an attractive and efficient solution among the innovative technologies for cleaning oil storage tanks and for the treatment of contaminated soils and industrial effluents. Therefore, this study aimed to evaluate the production and application of a biosurfactant produced by the yeast *Starmerella bombicola* ATCC 222214, in the decontamination of marine and terrestrial environments contaminated by oil. The production of the biosurfactant by the yeast was evaluated by observing the effect of different carbon/nitrogen sources and culture conditions in flasks. The removal power of hydrophobic compounds by the action of the biosurfactant in different types of soils (clayey and silty) and standard sand was evaluated. The destabilization power of heavy oil OCB1, diesel and engine oil on smooth surfaces, as well as the removal capacity of oil from industrial effluent by the biosurfactant were studied. From the most promising surfactant properties, the culture medium supplemented with 2.0% glucose and 5.0% glycerol, the speed of 200 rpm, the fermentation time of 180 hours and the inoculum size of 5.0% were selected. The yield of the isolated biosurfactant was 1.5 g/L. The emulsification rates of engine oil and diesel oil were $86.6 \pm 0.22\%$ and $51.7 \pm 0.15\%$, respectively, indicating affinity of the biomolecule for complex hydrocarbons. In stability tests performed at different pH values, temperature and NaCl concentration, the surface tension ranged from 25.82 to 32.30 mN/m. The Critical Micellar Concentration (CMC) was 0.4 g/L, at which concentration the surface tension reached 26.85 mN/m. In the kinetic tests, the biosurfactant removed 82.48 ± 0.12 , 97.61 ± 0.01 and $99.01 \pm 0.02\%$ of the engine oil adsorbed on sand, silty soil and clayey soil, while in the static test in packed columns the removals were 72.05 ± 0.80 , 96.87 ± 0.30 and $99.50 \pm 0.03\%$, respectively. The biosurfactant produced in this study proved to be a promising agent for environmental remediation applications in the oil and energy sector, as well as in industrial areas contaminated by oil and derivatives.

Keywords: surfactant; yeast; bioremediation; removal of hydrocarbons; petroleum; environment.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O petróleo, também conhecido como óleo bruto, é uma matéria-prima vital na indústria química, desempenhando um papel significativo no desenvolvimento econômico global (Aryan; Kraft, 2021; Griffiths *et. al.*, 2022). No entanto, derramamentos de óleo devido à exploração e transporte acontecem com frequência em todo o mundo (Shaikhah *et al.*, 2024). Como consequência, grandes quantidades de óleo já foram lançadas em solo e ao mar em derrames de petróleo, deixando efeitos devastadores sobre o ambiente, os quais são ainda maiores em virtude do potencial tóxico dos dispersantes químicos comumente utilizados na remediação desses derramamentos (Purohit *et. al.*, 2024; Zacarias *et.al.*, 2024; Silva *et al.*, 2022).

Nesse contexto, as preocupações ambientais relacionadas com a queima de combustíveis fósseis, especialmente gasolina e carvão, também levou a uma maior consciência social que motivou a busca por processos sustentáveis (Duarah *et. al.*, 2022). Vários países passaram a adotar medidas específicas para seguir o conceito de desenvolvimento sustentável, visando minimizar a crise climática e ambiental que coloca todo o planeta em perigo (Segovia-Hernández *et. al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024b).

Os dispersantes químicos utilizados nos processos de tratamentos de áreas contaminadas com derivados de petróleo são constituídos principalmente por surfactantes como ingredientes ativos. Os surfactantes, por serem moléculas anfifílicas, são caracterizadas por sua capacidade de reduzir a tensão interfacial entre fluidos imiscíveis, como óleo e água, proporcionando detergência, dispersão e emulsificação, atividades essenciais à remediação de hidrocarbonetos (Kugaji *et. al.*, 2025; Markam *et. al.*, 2024; Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

Os surfactantes sintéticos à base de petróleo, entretanto, são obtidos a partir de recursos não renováveis, como petróleo bruto (por exemplo, óleo parafínico e aromáticos) e gás natural (por exemplo, propileno e etileno) (Sorphie *et. al.*, 2022). Esses surfactantes dominam o mercado comercial de surfactantes na maioria dos países industrializados, representando aproximadamente 90% da participação de mercado devido à alta produtividade e baixo custo (Al-Sakkaf *et. al.*, 2024; Nandwani *et. al.*, 2024; Dini *et al.*, 2024).

No entanto, os problemas atuais relacionados com saúde, poluição, mudanças climáticas e esgotamento das reservas de recursos fósseis de combustível exigem soluções para suplantarmos o uso massivo desses surfactantes convencionais. Neste contexto, os surfactantes verdes, designados como biossurfactantes e surfactantes de base biológica (*biobased surfactants*) surgem como candidatos promissores devido às suas propriedades únicas e diferentes aplicações (Guzmán; Ortega; Rubio, 2024; Kee *et al.*, 2022; Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

Os biossurfactantes possuem aplicações em uma série de processos industriais, como nos setores de higiene, de alimentos, agrícola, ambiental, petroquímico e de cosméticos (Thakur *et al.*, 2024; Menezes *et al.*, 2023). Por apresentarem uma gama mais ampla de composições químicas, os biossurfactantes apresentam melhor diversidade estrutural quando comparados aos surfactantes sintéticos (Abbot *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2021; Vučurović *et al.*, 2024).

Os surfactantes verdes são menos tóxicos, mais biodegradáveis e mais estáveis sob condições ambientais adversas em comparação com surfactantes químicos (Verma *et al.*, 2023). Propriedades como detergência, emulsificação, dispersão e solubilização atribuem grande versatilidade a essas biomoléculas, tornando-as uma alternativa comercial promissora (Jimoh; Lin, 2019; Marinho; Silva; Luna, 2022).

Os surfactantes microbiológicos incluem uma grande variedade de estruturas químicas tais como glicolipídeos, lipopeptídeos, complexos proteínas-polissacarídeos, fosfolipídeos, ácidos graxos e lipídeos neutros, produzidos por micro-organismos quando cultivados em substratos insolúveis (óleos, resíduos e hidrocarbonetos) e/ou solúveis (carboidratos) (Sarubbo *et al.*, 2022).

As leveduras do gênero *Starmerella* têm sido muito estudadas quanto ao seu potencial de produção de glicolipídeos, especialmente a *Starmerella bombicola*, conhecida pela produção de soforolipídios, biossurfactantes formados por um dissacarídeo de glicose e uma cadeia de ácidos graxos com 16 ou 18 átomos de carbono (Sarubbo *et al.*, 2022; Qazi; Wang; Dai, 2022; Santos *et al.*, 2023; Eras-Muñoz *et al.*, 2024).

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo produzir um biossurfactante a partir de *Starmerella bombicola* ATCC 22214 para aplicação na descontaminação de ambientes marinhos e terrestres contaminados por óleo. O biossurfactante foi utilizado para avaliar sua capacidade de aplicação com agente desestabilizador de

hidrocarbonetos complexos em superfícies, solos e efluente oleoso industrial como uma solução sustentável, atóxica e de baixo custo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Produzir um biossurfactante por meio da levedura *Starmerella bombicola* ATCC 222214 e avaliar sua aplicação como agente desestabilizador de hidrocarbonetos.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a levedura *Starmerella Bombicola* ATCC 222214 como produtora de biossurfactante em substratos de baixo custo.
- Estabelecer o melhor meio e condições de produção do biossurfactante a partir dos parâmetros estudados.
- Determinar as propriedades tensoativas do biossurfactante.
- Isolar o biossurfactante e determinar o rendimento de produção e a Concentração Micelar Crítica (CMC).
- Avaliar a estabilidade do biossurfactante em diferentes faixas de pH, temperatura e salinidade.
- Determinar a capacidade de emulsificação do biossurfactante frente a diferentes substratos hidrofóbicos.
- Determinar a composição química e a ecotoxicidade do biossurfactante.
- Avaliar a capacidade de dispersão de óleo de motor em água do mar pelo biossurfactante.
- Avaliar a capacidade de remoção de petroderivado em areia e solo pelo biossurfactante em condições cinética e estática.
- Testar a capacidade de remoção e desestabilização de derivados de petróleo pelo biossurfactante em superfícies contaminadas.
- Avaliar a capacidade do biossurfactante como agente remediador de efluente oleoso industrial.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Petróleo

Mesmo antes de ser explorado comercialmente, o petróleo surgia naturalmente em terras onde hoje se encontra o Oriente Médio. Lá, ele era usado com diversos fins, como: cola, lubrificante, graxa, além de medicamentos para o tratamento da tosse, bronquite, congestão pulmonar, entre outras doenças (Machado; De Carvalho, 2021).

O aparecimento do petróleo acontecia a partir de vazamentos naturais e era usado de várias formas, como por exemplo, no embalsamento de mortos ilustres, pelos egípcios, na pavimentação de estradas, pelos Incas, para fins bélicos por gregos e romanos, entre outros (Martins *et al.*, 2015). Na antiga Babilônia, por volta do século III a. C. o petróleo estava sendo utilizado na produção de tijolos. Por sua vez, índios pré-colombianos utilizavam o petróleo para impermeabilização de potes cerâmicos e para pavimentação de ruas (Prauchner *et al.*, 2023).

Ainda no século XIX, o petróleo também passou a ser usado como insumo à iluminação. Em 1810, foi realizada aquela que foi considerada a primeira destilação industrial do petróleo, em Praga, obtendo-se um óleo capaz de substituir com grande vantagem os produtos até então usados para a iluminação, como o óleo de baleia e o gás de carvão. A partir do século XX, o desenvolvimento das empresas automobilísticas impulsionou, definitivamente, a indústria do petróleo. Cada vez mais, os meios de transporte terrestres, marítimos e aéreos dependiam dos combustíveis derivados de petróleo. Especialmente nos Estados Unidos, surgiram dezenas de companhias petrolíferas, que mais tarde se transformariam em poderosas organizações (Schiavi; Hoffmann, 2015; Ipiranga, 2006; Thomas, 2001).

Estudos comprovam que o primeiro poço de petróleo cavado manualmente foi em 1700, e não passava de 30 metros de profundidade. No entanto, só em 1859 utilizando equipamentos precursores das atuais sondas de perfuração, foi quando realmente foi perfurado e validado como sendo o primeiro poço de petróleo no Estados Unidos. Onde o petróleo teve sua primeira aplicação em larga escala na iluminação das casas das cidades (Paranhos, 2024).

A era moderna do petróleo começou em 1853, quando o químico polonês *Ignacy Lukasiewicz* (1822-1882) descobriu uma forma de industrializar querosene a partir de petróleo, montando, em 1856, a primeira refinaria de petróleo, em *Ulaszowice*, na

Polônia. O canadense Abraham Gesner (1791-1864) já tinha produzido querosene a partir do carvão em 1846, mas, os custos e a quantidade de carvão necessário para suprir a demanda eram elevados (Gauto *et al.*, 2016).

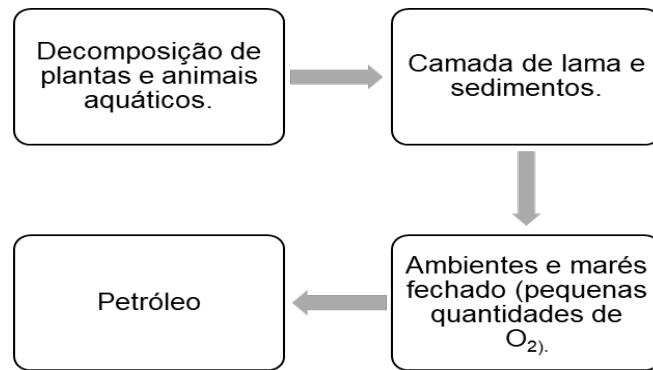
Em 1854, o geólogo canadense Dr. Abraham Gesner patenteou um método de refino de petróleo que produzia um óleo claro e inflamável, ideal para ser usado para iluminação. Este óleo foi batizado pelo Dr. Gesner de “*kerosene*” (querosene), a palavra “*kero*” vem do grego e significa cera, devido à parafina que era produzida como subproduto neste processo. O querosene produzido por Dr. Gesner possuía uma qualidade superior para produzir luz quando comparado ao óleo de baleia que já começava a ficar escasso. Desta forma, a demanda por este produto tinha grande potencial de crescimento (Machado; De Carvalho, 2021).

Rapidamente o querosene substituiu o óleo utilizado nas lamparinas ficando como sendo o principal produto combustível para lamparinas na América do Norte e Europa. A elevação da demanda por querosene produziu uma corrida para encontrar novas fontes de petróleo, especialmente nos Estados Unidos (Society of Petroleum Engineers, 2013).

A palavra petróleo deriva das palavras latinas *petra*, que significa rocha, e *oleum*, denotando óleo, que combinado significa literalmente rocha-óleo. Este termo foi usado pela primeira vez pelo mineralogista alemão Georgius Agricola (1546a) no tratado De Natura Fossilium. A antiga palavra grega era frequentemente usada para descrever qualquer petróleo ou substância semelhante a piche (Höök *et al.* 2010).

O petróleo se origina principalmente a partir de matéria orgânica, remanescente de zooplâncton e algas, acumulada no fundo de lagos e oceanos primitivos. A deposição de sedimentos sobre esta matéria teria propiciado as condições de pressão e escassez de oxigênio necessárias para a formação do óleo (Prauchner *et al.*, 2023). A Figura 1 traz um simples esquema sobre a formação do petróleo.

Figura 01. Esquema de formação de petróleo



Fonte: PRAUCHNER, et al. (2023).

O petróleo é uma mistura heterogênea de hidrocarbonetos, que por sua vez são compostos orgânicos formados basicamente por carbonos e hidrogênios na sua cadeia principal incluindo hidrocarbonetos alifáticos (n-alcenos), alicíclicos e aromáticos (ou seja, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), que varia em propriedades composicionais e físicas de acordo com a origem de seu reservatório extraído (Peixoto; Vermelho; Rosado, 2011).

A acumulação de petróleo ocorre principalmente em rochas sedimentares clásticas e não clásticas, como os arenitos e calcários; contudo, outras rochas apresentam condições favoráveis, como porosidade suficiente para o armazenamento de hidrocarbonetos, sendo também ditas como rocha-reservatório, destacando-se como principais tipos de rocha-reservatório os arenitos e as rochas carbonáticas (Dos Santos *et al.*, 2024).

Em sua dissertação, Cezar Paranhos, 2024, afirma que o petróleo se apresenta de forma líquida, entretanto, pode ser uma emulsão de 14 componentes orgânicos e inorgânicos apresentando-se nas formas sólidas e gasosas. Os elementos inorgânicos, em sua maioria, são representados pelo enxofre elementar (fonte de 99% enxofre) e gás sulfídrico (H₂S).

Além de hidrocarbonetos, fazem-se presentes no petróleo, compostos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio, além de metais e outros elementos. A composição do petróleo usualmente varia nas seguintes faixas: 83,0 a 87,0% de carbono (C); 10,0 a 14,0% de hidrogênio (H); 0,05 a 6,0% de enxofre (S); 0,1 a 2,0% de nitrogênio (N); 0,05 a 1,5% de oxigênio (O); abaixo de 0,3% de metais, principalmente níquel (Ni) e vanádio (V) (Prauchner *et al.*, 2023). A Tabela 1 mostra os principais componentes do petróleo.

Tabela 01. Composição elementar média do petróleo

Elemento	Percentagem em Peso (%)
----------	-------------------------

Carbono	83,9 a 86,8 %
Hidrogênio	11,4 a 14,0 %
Enxofre	0,06 a 9,00 %
Nitrogênio	0,11 a 1,70 %
Oxigênio	0,50 %
Metais (Fe, Ni, V, etc.)	0,30 %

Fonte: NETO, A. A. D.; GURGEL, A. (2014).

Os compostos classificados como não hidrocarbonetos, permanecem nas frações mais pesadas do óleo. Os hidrocarbonetos classificam-se de acordo com as formas de ligação dos átomos de carbono (C), agrupados em: aromáticos, parafínicos, naftênicos e olefínicos. Em cada tipo de petróleo, varia-se as proporções dessas substâncias, existindo quantidades de propano, metano e etano dispersos na mistura (Paranhos, 2024).

Outras impurezas classificadas como orgânicas, são água, sais, areia e sedimentos. Um resumo dos constituintes do petróleo e a sua classificação, o mesmo é composto por hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, são encontrados na Figura 2. Os compostos instáveis, como as olefinas, não são encontrados no petróleo, entretanto, são geradas durante o processo de refinamento, fazendo parte da constituição dos derivados e os não hidrocarbonetos, são os contaminantes (Villela Barcza, 2023).

Figura 02. Fluxograma da classificação do Petróleo, enquanto aos elementos químicos



Fonte: Baseado em Paranhos, 2024.

É importante destacar que o petróleo não é encontrado em qualquer lugar, apenas onde ocorreu acúmulo de material orgânico - as chamadas bacias sedimentares. Dependendo das condições de temperatura e pressão, da idade geológica da rocha, entre muitos outros fatores, o petróleo espalhado ao redor do

mundo é diversificado, sendo que suas características variam grandemente de acordo com a região onde é encontrado. Dessa forma, tanto a composição química quanto a aparência podem variar muito, isso irá nortear o tipo de aplicação ao qual determinado tipo de óleo é mais indicado (Gauto *et al.*, 2016).

As bacias sedimentares são os locais onde ocorrem o acúmulo de material orgânico de restos de vegetais e animais em camadas, as quais em determinadas variáveis de pressão e calor faz com que esses materiais orgânicos se transformem em petróleo. Estudos prévios realizados por geólogos e geofísicos definem o ponto de perfuração com melhores chances de encontrar o petróleo (Stroharcker; Tarnowski; Betanzos, 2004).

3.1.1. Exploração e Refino do Petróleo

O petróleo constitui a principal fonte de energia utilizada pela sociedade contemporânea, apesar de ser um recurso natural não renovável. A exploração do mesmo tem gerado impactos ao ambiente e com isso tem exigido um processo de licenciamento ambiental, que determina medidas para minimizar esses impactos (Martins *et al.*, 2015).

A atividade de exploração de petróleo é feita com base em estudos técnicos e geológicos na busca de intensificar e aperfeiçoar as descobertas de novos poços de petróleo, mas mesmo com todo esse avanço tecnológico nos estudos geológicos e na perfuração, ainda é uma atividade que pode ser considerada essencialmente arriscada e de custo elevado. Os estudos para constatação da possibilidade de existência de petróleo são produzidos através de geofísica, sismologia, e tecnologias sofisticadas, como a perfuração e sondagem. Após a identificação, as jazidas descobertas devem ser avaliadas quanto ao tamanho e capacidade de produção a fim de descobrir ser rentável ou não sua exploração (Kimura, 2005; Martins *et al.*, 2015).

A exploração pode ser dividida em duas partes, em terra (*onshore*) e em mar (*offshore*). A tecnologia usada em ambas se distingue pela maior necessidade da mesma na exploração offshore devido a maior dificuldade de retirada o óleo do fundo do mar, pois o mesmo sem encontra em altas profundidade (Martins *et al.*, 2015).

Durante as atividades de exploração do petróleo, a água produzida que se encontra aprisionada nas formações subterrâneas, é transportada para a superfície juntamente com gás e óleo de forma simultânea. Para a comercialização do óleo e gás é feita a separação desses fluidos, a água produzida separada pode ser

descartada, reinjetada no poço ou reutilizada, após o tratamento adequado. A destinação final desse líquido é fator limitante, já que sua composição apresenta uma mistura de elementos tóxicos ao meio ambiente, capaz de gerar impactos ambientais negativos ao meio físico, biótico e antrópico (Silva *et al.*, 2022).

Apesar da exploração de novas áreas e a perfuração de novos poços, o que apresenta um custo elevado, ou o uso de técnicas de estimulação de poços já perfurados, com custos mais reduzidos, serem alternativas para atender essa demanda energética ascendente, a exploração depara-se com a influência do dano à formação. Esse dano relaciona-se com a redução de permeabilidade nas regiões próximas ao poço, que configura um problema operacional e econômico presente em todas as etapas de extração de hidrocarbonetos, devido à perfuração, estimulação, completação, manutenção da produção, intervenções pesadas (*workovers*) e abandono do poço (Hurst *et al.*, 1967; Lima, 2010; Dos Santos *et al.*, 2024).

Logo que sai do reservatório, o petróleo passa por um processamento primário em que é separado em três fases: oleosa, gasosa e aquosa. A fase aquosa consiste de uma solução rica em sais (a água pode estar presente originalmente no próprio reservatório e/ou ter sido injetada para aumento da recuperação do petróleo). A fração oleosa, após tratamento para redução do teor de água emulsionada e de sais dissolvidos, é transportada para a unidade de refino. A fase gasosa, que se origina de gases antes dissolvidos e que volatilizam devido à redução de pressão durante a elevação do óleo, é constituída por hidrocarbonetos leves (principalmente metano e etano), vapor d'água e contaminantes tais como N₂, CO₂ e H₂S. Essa fração, muitas vezes, não é aproveitada, sendo queimada no próprio campo de produção. Entretanto, após remoção do vapor d'água (que pode formar hidratos e, assim, obstruir tubulações) e de contaminantes (CO₂, que diminui o poder calorífico, e H₂S, que é corrosivo e produz mau odor), a fração gasosa pode ser enviada para unidades de processamento de gás natural (Prauchner *et al.*, 2023).

Em seu estado natural, o petróleo tem pouca aplicação. Entretanto, seu processamento permite a obtenção de inúmeros produtos de elevado interesse, os quais podem ser divididos em duas classes principais: os combustíveis, e os não combustíveis. Na classe dos não combustíveis, destacam-se os óleos lubrificantes, a parafina, matérias-primas para as indústrias petroquímica e de fertilizantes, solventes e o coque de petróleo (Farah, 2012).

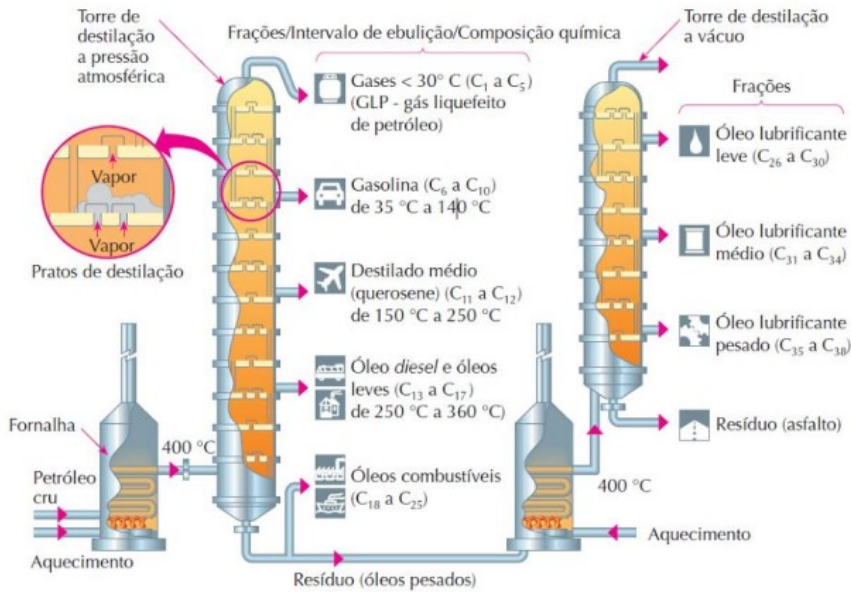
Na indústria do petróleo, a destilação é o processo de separação mais utilizado. O conhecimento dos dados de distribuição dos pontos de ebulição dos componentes de óleos crus e de produtos do processo de refino do petróleo é essencial para o controle desse processo e a garantia da qualidade do produto (Ferreira; Aquino Neto, 2005).

O refino do petróleo se constitui na separação física das frações básicas que compõem o óleo a ser processado, com o objetivo de se obter as características necessárias para atender as especificações que caracterizam o derivado a ser produzido. Sendo assim, nas refinarias o óleo será processado e resultará na produção de diferentes subprodutos, conforme sua capacidade de processamento que, por sua vez, estará alinhada com o tipo de óleo bruto para o qual a refinaria foi projetada (Neto, 2007; Yergin; Natale; Guimarães, 2012; Gomes, 2021).

A classificação do óleo bruto é realizada de acordo com o grau de densidade API, um padrão de cálculo de densidade adotado pela American Petroleum Institut, que resulta em três tipos de petróleos: os petróleos leves (acima de 30°API), os petróleos médios (entre 21 e 30°API) e os petróleos pesados (abaixo de 21°API) (Neto, 2014).

Nas refinarias, o petróleo bruto é fracionado em diversas frações de destilação, como gases, nafta, destilados médios, gasóleo, óleos lubrificantes, ceras e resíduos, por uma destilação típica de acordo com o ponto de ebulição e faixa de número de carbono (Figura 3). O refino envolve processos físicos e químicos complexos, como destilação, craqueamento, isomerização, reforma, alquilação e hidrodessulfurização, resultando em produtos petrolíferos com certas características de desempenho que são posteriormente 20 usados em aplicações diversas. A complexidade química e variabilidade das matérias primas de petróleo, assim como as diferenças nas condições do processo de refino, promove a variação do teor e composição de hidrocarbonetos e outros constituintes (Roman-Hubers *et al.*, 2022).

Figura 03. Refino do Petróleo



Fonte: Coelho, (2012).

Através de uma série de transformações químicas e físicas, fornece uma variedade de derivados de grande importância industrial como a gasolina ou querosene. De acordo com o peso molecular dos hidrocarbonetos obtidos durante o processo de fracionamento do petróleo podem ser diferenciados os seguintes derivados: gases de refinaria, gases liquefeitos de petróleo (propano e butano), gasolina (pesada e leve), querosene, óleo de iluminação, combustível de aviação, diesel automotivo e de aquecimento, óleos combustíveis industriais pesados, óleos (leves e pesados), parafinas e ceras, asfalto e coque (Gary e Handwerk, 1980; C. Boluda *et al.*, 2019). A Tabela 2 mostra os principais derivados de Petróleo e seus principais usos.

Tabela 02. Derivados do petróleo e seus principais usos

DERIVADOS	PRINCIPAL USO
COMBUSTÍVEIS	
Gasolina	Combustível Automotivo
Óleo Diesel	Combustível Automotivo
Óleo Combustível	Industria Naval, Geração de eletricidade
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	Cocção
Querosene de Aviação (QAV)	Combustível Aeronáutico
Querosene Iluminante	Iluminação
NÃO COMBUSTÍVEIS	
Parafina	Velas, Industrias Alimentícia
Nafta	Industria Petroquímica
Propeno, Tolueno, Eteno	Industria de Plásticos, Cabos,

Óleo Lubrificantes	Roupas Sintéticas e Tintas
Asfalto	Lubrificação de Máquinas e motores
Coque	Pavimentação de Rodovias e Avenidas
	Indústria Metalúrgica

Fonte: NETO, Afonso Avelino Dantas; GURGEL, Alexandre, (2014).

Portanto, o petróleo é por definição uma fonte de energia fóssil, de origem natural e não renovável. Além de combustível, após o refino do petróleo bruto, originam-se produtos de alto valor agregado, como solventes, lubrificantes, revestimento asfáltico e parafinas, além de produtos cosméticos, farmacêuticos e plásticos (Martins *et al.*, 2015).

3.1.2. Petroderivados

3.1.2.1. Gasolina

A gasolina é um combustível fóssil, e é obtida a partir do refino do petróleo. A gasolina automotiva é composta por hidrocarbonetos de cadeias que contêm entre 4 e 12 carbonos, com pontos de ebulição que variam entre 30 °C e 215 °C. Esses hidrocarbonetos são compostos principalmente por parafinas (alcanos), naftenos (cicloalcanos) e aromáticos (Amaral; Ferreira, 2024).

A gasolina pode ser obtida por destilação fracionada do petróleo. Após a destilação dos elementos mais voláteis do petróleo bruto (até cerca de 20° C) que produz metano, etano, propano, butano e isobutano, obtemos gasolina leve (20° C- 150° C). Esta segunda fração, também conhecida como gasolina leve ou ligroína, pode ser submetido à destilação para obter uma mistura leve de hidrocarbonetos conhecida como éter de petróleo, a partir do qual pode ser obtido, por uma segunda destilação, entre 55° C e hexano comercial a 65° C, amplamente utilizado como solvente em química orgânico e na indústria petrolífera (C. Boluda *et al.*, 2019).

Quanto à classificação estabelecida pela Resolução ANP nº 807, de 23/01/2020 (Brasil, 2020), as gasolinas automotivas comercializadas no Brasil são subdivididas em:

I – gasolina A comum: combustível produzido a partir de processos utilizados nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, destinado aos veículos automotivos dotados de motores de ignição por centelha, isento de componentes oxigenados;

II - gasolina A premium: combustível de elevada octanagem, produzido a partir de processos utilizados nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, destinado aos veículos automotivos dotados de motores de ignição por centelha cujo projeto exija uma gasolina com maior octanagem, isento de componentes oxigenados;

III - gasolina C comum: combustível obtido a partir da mistura de gasolina A comum e de etanol anidro combustível, nas proporções definidas pela legislação em vigor; e

IV - gasolina C premium: combustível obtido a partir da mistura de gasolina A premium e de etanol anidro combustível, nas proporções definidas pela legislação em vigor.

3.1.2.2. Óleo Diesel

O óleo diesel combustível é composto por uma mistura de hidrocarbonetos (descrever a faixa de HC) obtido através do refino do óleo bruto, é um dos combustíveis mais utilizados na atualidade, e com uma forte influência no meio econômico. Utilizado como fonte de energia de motores de combustão de ciclo otto e máquinas, apresenta alta eficiência e elevado potencial energético (Fahim, 2012).

Para a garantia da qualidade e regulamentação do óleo diesel para comercialização no território nacional, a ANP estabelece a especificação para vários parâmetros analíticos. Dentre eles, tem os seguintes ensaios físico-químicos: massa específica a 20°C, ponto de fulgor, teor de enxofre, e destilação atmosférica. Consistência e uniformidade são essenciais na indústria do petróleo, por isso os métodos estipulados para a caracterização dos combustíveis são imprescindíveis para a garantia de qualidade, desta forma os resultados obtidos nos ensaios devem seguir os limites e parâmetros estabelecidos pelo órgão regulamentador (Brasil, 2020).

3.1.2.3. Óleo Combustível

Óleos combustíveis são óleos residuais de alta viscosidade obtidos do refino do petróleo ou através da mistura de destilados pesados com óleos residuais de refinaria. De modo geral, esses óleos são utilizados pela indústria em equipamentos destinados à geração de calor - fornos, caldeiras e secadores, ou indiretamente em equipamentos destinados a produzir trabalho a partir de uma fonte térmica. Também podem ser utilizados em motores de navios de grande porte. A vantagem do óleo combustível

marítimo em comparação ao óleo diesel marítimo é a maior segurança de armazenamento devido ao ponto de fulgor mais elevado, o que o torna mais adequado para o emprego em grandes embarcações em alto-mar (Prauchner *et al.*, 2023).

3.1.2.4. Gás Liquefeito de Petróleo – GLP

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é uma mistura de hidrocarbonetos, principalmente propano e butano, obtida na refinaria de petróleo ou nos campos de extração de gás natural, que é liquefeito para permitir o armazenamento e o transporte em recipientes próprios". O GLP é utilizado principalmente como combustível para aquecimento e cocção em residências e estabelecimentos comerciais, bem como como fonte de energia para veículos movidos a gás e para indústrias que necessitam de uma fonte de calor. Eles destacam que, para garantir a segurança no armazenamento e transporte do GLP, é necessário seguir normas e padrões de segurança rigorosos, além de investir em tecnologias e equipamentos adequados, como válvulas de segurança, medidores de vazão e detectores de vazamento. Além disso, é preciso controlar a qualidade do combustível, evitando o uso indevido de produtos contaminados por mercúrio e outros elementos químicos, a saúde do usuário final pode ser Breitend (Araújo; Cecchetti, 2017).

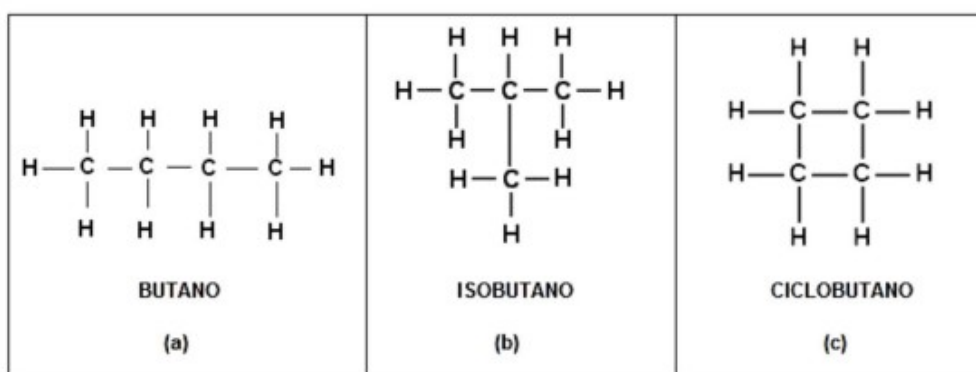
3.1.2.5. Querosene

O querosene é um dos destilados médios do petróleo juntamente com o diesel, sendo mais leve que este. A composição geral dos combustíveis para aviação consiste em hidrocarbonetos na faixa de 9 a 16 carbonos, distribuídos em alcanos lineares, ramificados e ciclo-alcanos. Os hidrocarbonetos aromáticos são limitados a 20 a 25 % da mistura total, uma vez que produzem fuligem quando queimados. A distribuição aproximada seria 32 % de alcanos de cadeia linear, 31 % de alcanos ramificados, 16 % de ciclo-alcanos e 21 % de hidrocarbonetos aromáticos. A composição do querosene afeta diretamente as suas propriedades como o ponto de fulgor, a estabilidade térmica, o calor de combustão e o ponto de congelamento, que deve ser de no mínimo de -47°C para o querosene do tipo Jet-A1. Destaca-se que, os ensaios para controle de qualidade em combustíveis de aviação são extremamente rígidos a fim de evitar problemas em aeronaves e graves acidentes (Astm, 2020).

3.1.2.6. Parafinas

As parafinas, que na maioria das vezes é referida na literatura como cera (wax, do 24 inglês) são alcanos compostas por átomos de carbonos unidos somente por ligações simples e ao maior número possível de átomos de hidrogênio, constituindo cadeias lineares, ramificadas ou cíclicas, interligadas ou não. O alcano ou parafina mais simples é o metano, que tem um átomo de carbono e normalmente existe como gás. As parafinas com 6 a 12 átomos de carbono (C6 a C12) são líquidas. Quando o tamanho molecular é de 16 a 25 carbonos (C16 a C25), observam-se ceras moles e pastosas. As ceras cristalinas duras têm 25 a 50 ou mais carbonos (C25 a C50) na cadeia (Leite, 2023). A Figura4 apresenta alguns exemplos de parafinas.

Figura 04. Exemplos de parafinas (a) normal, (b) ramificada e (c) cíclica



Fonte: Leite, (2023).

3.1.2.7. Tolueno

O Tolueno é um líquido incolor com odor característico que ocorre naturalmente no petróleo bruto, sendo um hidrocarboneto aromático do ponto de vista químico, sendo produzido no chamado de ciclo de hidrogenação do n-heptano, quando está na presença de os catalisadores. Também é obtido como subproduto na fabricação de compostos como etileno ou propeno. (ATSDR, 2016). Além de ser utilizado como matéria-prima, o tolueno é adicionado a diversos combustíveis, sendo usado como antidetonante. Também é amplamente utilizado como solvente para tintas, vernizes celulósicos, diluente para fotogravura, borrachas e resinas, asfalto e acetilcelulose, utilizados na fabricação de detergentes e produtos de limpeza (Vegas; Lecca, 2023).

3.1.2.8. Asfalto

O aglutinante durável, pegajoso e à prova d'água usado para criar misturas de pavimento asfáltico é conhecido como substância asfáltica. É composto por uma

mistura de betume, uma substância viscosa, pegajosa e preta e partículas de vários tamanhos e proporções. Um dos elementos-chave em construção de rodovias, estradas e pavimentos é o material asfalto, que oferece uma superfície durável e resistente ao tráfego. O asfalto natural aparece impregnado nas formações calcário, arenito ou outras estruturas similares, gerando a chamadas rochas asfálticas, também misturadas com impurezas minerais (Huancapaza, 2023).

3.1.2.9. Coque

O coque de petróleo (CP) é composto principalmente por carbono, formado a partir da decomposição térmica e polimerização dos hidrocarbonetos presentes no petróleo. Quando utilizado como combustível sólido, o coque de petróleo é muito empregado em indústrias cimenteiras, siderúrgicas, produtoras de cal e de cerâmica. Por sua alta capacidade de combustão associada a um baixo teor de cinzas, esse componente demonstra ótima capacidade energética já que sua combustão gera baixo teor de resíduos. O coque de petróleo é o combustível derivado de petróleo que oferece o menor custo dentre os combustíveis fósseis e minerais que podem ser utilizados para aquecer os fornos de clínquerização da indústria de cimento (Júnior; Coelho; Santos, 2022).

3.1.3. Impactos causados pelo vazamento do petróleo e seus derivados

Devido à crescente utilização do petróleo, sua relevância para a economia mundial e conseqüentemente a necessidade de exploração, armazenamento e de transporte em grandes quantidades ao redor do globo, são cada vez mais frequentes os acidentes que ocasionam derramamentos de petróleo. As fontes de contaminação podem ser classificadas em quatro tipos: exsudação natural, extração, transporte e consumo; podem advir de erupções de poços, vazamento nas plataformas de exploração, rupturas de oleodutos e descarga indiscriminada (Gonçalves, 2024).

As questões ambientais associadas à exploração de petróleo e gás merecem atenção devido ao alto potencial poluente associado a esta atividade (Martins, et al. 2015). O uso global do petróleo, ou seja, hidrocarbonetos para diversas aplicações aumentou a liberação de muitos poluentes que afetam o solo, águas superficiais e subterrâneas (Ossai *et al.*, 2020).

Na indústria petrolífera se produz uma enorme variedade de resíduos com diferentes níveis de toxicidade em decorrência das atividades de exploração, produção,

refino, armazenamento e distribuição. Os resíduos mais comuns na indústria petrolífera, que são gerados em grandes quantidades englobam: a lama produzida em diferentes etapas do processo de extração, o sedimento do fundo dos tanques de armazenamento do petróleo e seus derivados, borras oleosas, contendo sólidos emulsionados em óleo, além de outros resíduos (Jafarinejad, 2017).

Os hidrocarbonetos alifáticos geralmente compreendem mais de 75% da maior parte do petróleo bruto, e eles são biodegradados mais rapidamente do que os Hidrocarbonetos Aromáticos (AHs). AH possuem baixa hidrofobicidade e permanecem no meio ambiente, o que os torna muito tóxicos e cancerígenos para os seres humanos (Chan *et al.*, 2023).

A indústria de petróleo e gás, a etapa de exploração é responsável pela geração de quantidades substanciais de resíduos, incluindo cascalhos de perfuração. Esses resíduos são compostos principalmente por rochas fragmentadas, que são transportadas dos poços de exploração até a superfície pelo fluido de perfuração (Marim *et al.*, 2023). Lama, pasta de cimento e partículas de argila são exemplos de materiais que podem entrar na formação durante as operações de exploração, reduzindo também a permeabilidade em torno do furo do poço (Ahmed, 2019).

A poluição por petróleo é um dos impactos mais recorrentes sobre sistemas costeiros e marítimos devido a acidentes com petroleiros, atividades exploratórias offshore, vazamentos de combustível ou lubrificante de navios, o que danifica os ecossistemas adjacentes (Thompson e Thompson, 2020; Pena *et al.*, 2020).

Os produtos petrolíferos lançados com maior frequência no meio ambiente são os combustíveis (sua produção representa 80 para 83% do petróleo processado) (Rakowska, 2020). Óleos de refinarias, tanques de armazenamento de petróleo bruto, derivados de petróleo, postos de serviços e plantas industriais são as fontes de poluição por meio do petróleo (Vázquez *et al.*, 2022).

O petróleo e seus derivados são extremamente carcinogênicos, mutagênicos e teratogênicos, capazes de induzir imunossupressão, destruição de células eritrocitárias e toxicidade a células hepáticas, neurológicas, nefrológicas, assim como infecções bacterianas secundárias (Ossai *et al.*, 2020). A toxicidade do petróleo está relacionada principalmente à dissolução da bicamada lipídica da membrana celular e impactos no DNA (Stepanova *et al.*, 2022).

O impacto do petróleo nos ambientes costeiros depende a quantidade de derramamento, o tipo de óleo e sua toxicidade, e condições ambientais, como o tipo predominante de sedimentos, circulação das marés e condições climáticas prevalecentes no momento do contato com o óleo (Soares *et al.*, 2006; Checker *et al.*, 2017).

Compostos orgânicos e metais em níveis potencialmente tóxicos fazem parte da composição do petróleo, seus derivados e seus resíduos, são alguns dos principais contaminantes do meio ambiente. Além disso, arsênico (As), fósforo (P), enxofre (S) e halogênios (Br, Cl, F e I) também são potenciais contaminantes ambientais (Marim *et al.*, 2023).

A água subterrânea e o solo podem ser afetados pela presença de Monóxido de Carbono (CO), uma mistura complexa de hidrocarbonetos categorizados em alifáticos, aromáticos, resinas (amidas, sulfóxidos, piridinas, quinolinas e carbazóis), e asfaltenos (fenóis, cetonas, ésteres, porfirinas e ácidos graxos) resultando na sua poluição (Chan *et al.*, 2023).

A poluição por óleo também pode ocorrer durante as operações portuárias com embarcações ancoradas, por vazamentos em dutos, durante a limpeza de embarcações, vazamentos de combustíveis armazenados em tanques de postos de gasolina, transporte dutoviário, rodoviário e ferroviário (Martins *et al.*, 2023).

Abordagens físicas, químicas e biológicas são necessários para remover hidrocarbonetos de contaminados ambientes. No entanto, tratamentos químicos e físicos não são eficazes na remoção de hidrocarbonetos. Então, há necessidade de produtos novos, ecológicos, de baixo custo, simples, métodos sustentáveis e eficazes para remover CO proveniente de água. A biorremediação é um método eficaz, tecnologia acessível e amiga do ambiente porque utiliza microorganismos para degradar contaminantes. A degradação via microbiano é o principal mecanismo para remover poluentes de hidrocarbonetos do ambiente contaminado (Chan *et al.*, 2023).

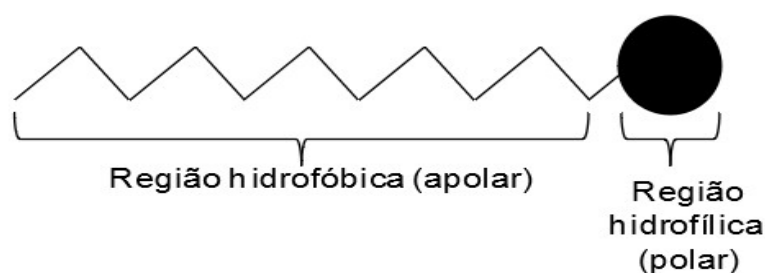
Dentre as técnicas atualmente utilizadas para remediar a contaminação gerada pelos petroderivados, requerem a aplicação direta de algum dispersante, agente tensoativo ou solvente gerando, na maioria dos casos (Rocha e Silva *et al.*, 2019).

3.2. Surfactantes

Os surfactantes sintéticos são moléculas anfifílicas que possuem simultaneamente uma parte hidrofóbica e outra hidrofílica na mesma estrutura (Al-Dhabi *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2023). Os tensoativos foram desenvolvidos pela necessidade de limpeza de fermentos e da higiene pessoal. Inicialmente produzidos como sabões naturais na base de gorduras animais, cinzas de madeiras e outras plantas contendo carbonato de potássio, eram utilizadas para banhos e como cremes ou géis desde a Roma antiga (CRQ, 2020).

A palavra surfactante tem origem no fato de que esta substância é ativa em superfícies (do inglês, surface = superfície; e active = ativo). Em outras palavras, um surfactante é caracterizado pela sua capacidade de adsorção em superfícies e interfaces, e a força motriz para que isso ocorra é o aumento de entropia do sistema, o qual contribui para a diminuição da energia livre contida no limite entre duas fases imiscíveis. Este aumento de entropia pode ser compreendido levando em consideração, por exemplo, a adição de surfactante em meio aquoso. Nesse caso, ao se posicionar na superfície, os surfactantes permitem que as moléculas de água, antes ali arranjadas em contato com o ar, sejam liberadas e, conseqüentemente, adquiram maior grau de liberdade (Holmberg *et al.*, 2003). A Figura 5 traz a representação de uma molécula anfifílica.

Figura 05. Representação de molécula anfifílica



Fonte: Santos et al. (2023).

Decorrente à dupla característica de sua estrutura, estes compostos podem se distribuir de maneira ordenada em superfícies com polaridades diferentes para permitir a interação entre duas fases (óleo em água; ar e água). É devido à sua capacidade de reduzir a superfície ou tensão interfacial entre dois fluidos com diferentes graus de polaridade (Muñoz *et al.*, 2022).

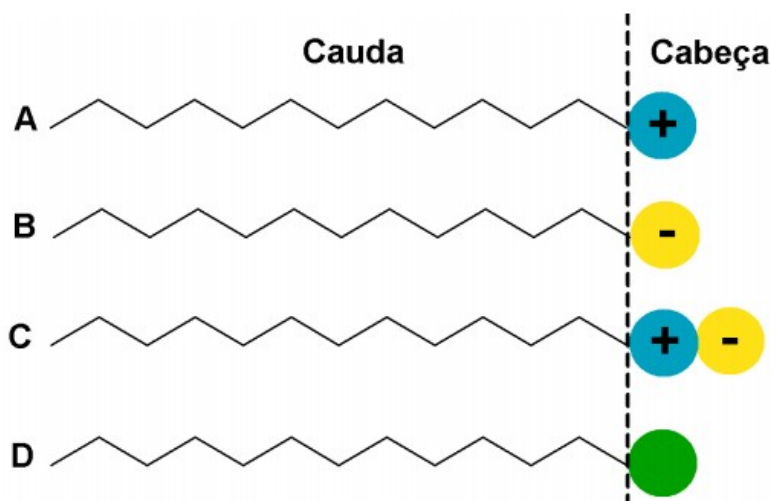
Os surfactantes, devido ao seu caráter anfifílico, quando adicionados a um solvente polar, como água, se acumula na superfície do solvente, ou seja, na interface

solvente/ar. A presença das moléculas de surfactantes na superfície diminui a força de coesão entre as moléculas do solvente, localizadas na superfície, reduzindo a tensão superficial. A adição de mais moléculas de surfactante após a saturação da superfície entre as duas fases (polar/apolar) não diminuirá a tensão superficial (Oliveira; Dias, 2017).

Os surfactantes podem ser de origem química, derivados do petróleo, e os de origem biológica, derivados da ação de micro-organismos e denominados de biossurfactantes. Os surfactantes químicos possuem uma grande variedade de aplicação em diferentes setores industriais, que por serem de origem química, apresentam características que os tornam nocivos ao meio ambiente, tais como baixa biodegradabilidade, alta toxicidade, bioacumulação e em corpos d'água podem provocar o fenômeno da eutrofização. Os surfactantes biológicos podem ter origem vegetal, extraídos de cascas, flores e frutos destes vegetais ou serem produzidos por micro-organismos. Os biossurfactantes produzidos por micro-organismos, tais como bactérias, fungos e leveduras, utilizam como fonte de energia o carbono de constituintes de substratos diversos, gerando diferentes estruturas moleculares com diferentes propriedades emulsificantes (Farias *et al.*, 2021).

Segundo Castro (2021), a classificação primária dos surfactantes é feita com base na carga do grupo da cabeça polar, dividindo-os em quatro classes: surfactantes aniônicos, catiônicos, não-iônicos e anfóteros ou zwitteriônicos. Um esquema representando os tipos de surfactantes é apresentado na Figura 6. Os catiônicos possuem a parte hidrofílica constituída por um átomo ou grupo carregado positivamente, enquanto a dos aniônicos é carregada negativamente. Já os anfóteros são aqueles em que a parte hidrofílica, em solução aquosa, exibe características aniônicas ou catiônicas dependendo do pH do meio. Por fim, os não aniônicos possuem uma parte hidrofílica que interage fortemente com a água e não exibe carga em solução.

Figura 06. Representação esquemática dos surfactantes catiônicos (A), aniônicos (B), anfóteros (C) e não iônicos (D). A cauda corresponde à porção apolar e a cabeça à porção polar



Fonte: Felipe et al., 2017.

A porção apolar, também denominada de cauda, é constituída de uma cadeia de hidrocarbonetos ao mesmo tempo em que a porção polar, ou cabeça, pode apresentar grupos iônicos (catiônica ou aniônica), não iônicos ou anfotérica. Essas características conferem aos surfactantes a capacidade de reduzirem a tensão superficial e interfacial, formando microemulsões, onde os hidrocarbonetos são solubilizados em água ou vice-versa (Singh *et al.*, 2018; Jahan *et al.*, 2020).

3.2.1. Classificação dos Surfactantes

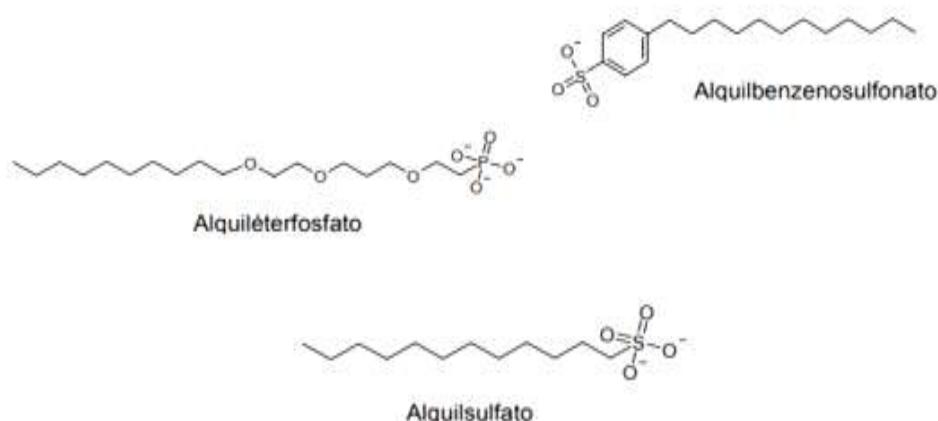
O grupo hidrofílico é de extrema importância para as interações que os surfactantes possuem em solução. Esse grupo dará a classificação do surfactante, podendo existir 4 critérios de identificação: aniônico (carga negativa), catiônico (carga positiva), não iônico (grupo polar, sem carga), e anfóteros (carga positiva e negativa na mesma molécula) (Somasundaran, 2001).

3.2.1.1. Surfactantes Aniônicos

Os surfactantes aniônicos são aqueles que apresentam maior aplicação comercial devido a seus baixos custos de produção e estão presentes em praticamente todos os detergentes comercializados. Dentre os surfactantes aniônico encontram-se os sulfatos ($-\text{SO}_4^-$), sulfonatos ($-\text{SO}_3^-$), carboxilatos ($-\text{SO}_2^-$) (e fosfatos ($-\text{OPO}(\text{OH})\text{O}$)). As moléculas de surfactantes aniônicos possuem cabeça polar com carga negativa. Essa carga negativa é gerada geralmente por grupos sulfatos, sulfonatos, carboxilatos ou

éster de ácido fosfórico aplicados pela sua boa detergência, quando a sua cadeia alquímica contém entre 12 e 16 átomos de carbono (Hera, 2007). Abaixo, a Figura 7 apresenta diferentes exemplos de surfactantes aniônicos.

Figura 07. Exemplos de surfactantes aniônicos



Fonte: O autor, (2024).

Um surfactante muito comum e presente em diversos produtos, responsável por 84% do mercado dos aniônicos é o Linea Alquilbenzeno Sulfonato de Sódio (LAS), uma mistura de homólogos e isômeros. A molécula LAS contém um anel aromático sulfonado na posição para conectado a uma cadeia linear alquímica em qualquer posição, exceto os carbonos terminais (OECD, 2005).

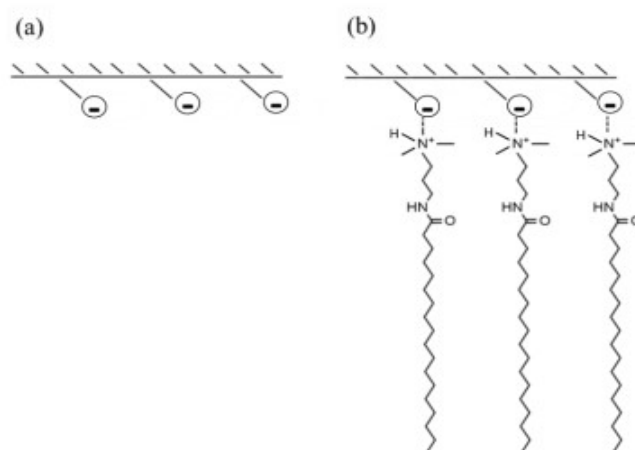
3.2.1.2. Surfactantes Catiônicos

Surfactantes catiônicos possuem um grupo hidrofílico carregado positivamente, como por exemplo, haletos de amônio quaternário (R₄N⁺ X⁻) sendo que os grupos R ligados ao nitrogênio podem ser iguais ou diferentes, mas geralmente apresentam-se sendo da mesma família. Esse grupo apresenta baixo poder detergente, mas possui a maior característica de aderência às superfícies sólidas. Em formulações são usados como agentes antiestáticos e antibacterianos. São usados em grande quantidade para limpeza industrial, em produtos que fazem parte da formulação, como amaciantes e detergentes. Uma aplicação mais incomum é seu uso como agente anticorrosivo para aço e na área de mineração com o mesmo propósito (Daltin, 2011).

Na indústria de cosméticos, uma grande aplicação dos surfactantes catiônicos é o seu uso em condicionadores, com o objetivo de modificar as propriedades superficiais do cabelo, o qual apresenta, em sua maioria, cargas negativas. Essas cargas são intensificadas por diversas razões, sendo a mais comum Sítio preferencial

para a protonação da SAPDMA 4 o uso de shampoos, os quais apresentam em sua formulação os surfactantes aniônicos. Mas essa intensificação também pode ocorrer devido aos processos de coloração e descoloração do cabelo, exposição à radiação solar, ou ação de outros agentes externos que causam danos às fibras capilares. Devido às suas cabeças polares positivas, os surfactantes catiônicos se ligam eletrostaticamente aos fios, neutralizando as cargas negativas, e permitindo a formação de uma camada hidrofóbica devido à exposição das caudas. Graças a isso, ocorre a redução do chamado frizz, proporcionando sensação de maciez aos fios e maior facilidade para pentear (Minguet *et al.*, 2010; Dias, 2015). A representação esquemática para o efeito lubrificante do surfactante SAPDMA está a seguir na Figura 8.

Figura 08. Representação esquemática do efeito lubrificante do surfactante pseudo-catiônico SAPDMA. a) Superfície de cabelo carregada negativamente; b) Surfactante SAPDMA absorvido na superfície do cabelo, realizando o recobrimento hidrofóbico do fio, e neutralizando as cargas negativas



Fonte: Yang, (2017).

3.2.1.3. Surfactantes Não Iônicos

No grupo hidrofílico não existe carga positiva ou negativa, mas deriva a sua solubilidade em água de grupos com alta polaridade como polioxietileno ou R-poliol incluindo açúcares. Possuem diversas aplicações pela ampla quantidade de propriedades físicas, como o alto poder de redução da tensão superficial e interfacial, elevada resistência à dureza da água que impede a sua fácil precipitação em solução pela presença de sais de cálcio, ferro e magnésio, baixa irritabilidade à pele e aos olhos, mas apresentam um menor poder de detergência e espumação. São utilizados

amplamente em detergentes em conjunto com os surfactantes aniônicos, como forma de complemento. Outro ponto importante, é sua compatibilidade química com uma ampla variedade de produtos químicos em cosméticos. Mas é importante salientar que esse grupo de surfactantes em sua maioria apesar de não ter grande influência pela força iônica da solução, é altamente influenciado pela temperatura, e a sua solubilidade é inversa ao aumento dessa dificultando sua utilização em métodos de produção que passem por aumentos de temperatura (Daltin, 2011).

3.2.1.4. Surfactantes Anfóteros

As moléculas dos surfactantes anfóteros (ou Zwitterions) caracterizam-se pela propriedade de formarem um íon tensoativo negativo ou positivo, dependendo do pH do meio em que são solubilizados, como no caso das sulfobetaínas. Possuem ótimas propriedades de tensão superficial e concentração de partículas, de umectância e penetração. São compatíveis com as outras classes de surfactantes, e não causam reações alérgicas quando usadas em cosméticos ou produtos de limpeza, não possuindo assim danos dermatológicos não desejados (como alergias), justamente por isso são utilizados juntamente com surfactantes aniônicos para reduzir os efeitos alérgicos desse. Mundialmente é o surfactante menos usado pelo seu alto custo, representando 10 % da expectativa mercado mundial de surfactantes em 2018 (BNDES, 2014).

Na Tabela 3 a seguir podem-se mencionar como exemplos de grupos hidrofílicos catiônicos os sais de amônio, enquanto os aniônicos podem ser derivados de grupos sulfatos e sulfonatos (Hocine *et al.*, 2016). Assim, os surfactantes não iônicos contêm grupos sem carga e, os surfactantes anfotéricos, apresentam na mesma molécula grupos com uma carga negativa e uma positiva, dependendo do pH (Finizio *et al.*, 2020; LV *et al.*, 2020).

Tabela 03. Tipos de surfactantes químicos e características bioquímicas

Surfactante	Nome	Fórmula química	Peso molecular (mg/mol)	Carga
Tween 20	Monolaurato de Sortiban	$C_{58}H_{114}O_{26}$	1222.54	Não iônico
Tween 80	Etoxilado 20 Polisorbato 80	$C_{17}H_{35}COOS_6(OCH_2CH_2)_2OH$	1309	Não iônico

Brij 35	Polietoxilato de alquila	$C_{12}H_{25}(OC_2CH_2)_{23}OH$	1200	Não iônico
CTAB	Brometo de Cetrimônio	$CH_3(CH_2)_{15}NBr(CH_3)_3$	364.45	Catiônico
Goma de guar	Galactomanano	$C_{18}H_{32}O_{16}$	504.438	Catiônico
SDS	Dodecilsulfato de Sódio	$C_{12}H_{25}OSO_3Na$	288.38	Aniônico
SDBS	Sulfonato de Dodecilbenzeno de Sódio	$C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$	348.48	Aniônico
Lecitina	Lecitina	$C_{35}H_{66}NO_7P$	643.887	Zwitteriônicos
Cyclodextrina	β -ciclodextrina	$C_{42}H_{70}O_{35}$	1135	Zwitteriônicos

Fonte: Hocine et al., (2016)

Esses compostos são constituídos a base de derivados de petróleo, sulfatos de alquil, sulfonato de alquil benzeno linear e compostos quaternários de amônio, o que os tornam com um alto potencial de contaminante ao meio ambiente (Santos *et al.*, 2023; Menezes *et al.*, 2023), logo devem ser utilizados com cautela, visto que apresentam um risco para diversos ecossistemas, sendo responsáveis por alterações no meio e nos organismos, como eutrofização de ambientes aquáticos e inibição enzimática em organismo vivo (Nagtode *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023).

Os surfactantes contribuíram a poluição massivas de fontes de água e águas subterrâneas, o que pode ser exemplificado pelas espumas do rio Tietê trechos do Brasil, especialmente entre as cidades de Pirapora do Bom Jesus (SP) e Salto (SP) durante os meses de seca, quando a vazão dos rios é menor e a concentração de resíduos aumentam (Barbosa *et al.*, 2022).

Surfactantes são conhecidos há mais de dois mil anos e, remotamente, já eram utilizados como sabões para a limpeza na Roma antiga. Hoje, são utilizados em inúmeras outras funções além de limpeza, como por exemplo, agentes solubilizantes, emulsificantes, antiembaçantes, removedores de tintas, agentes de liberação controlada, formulações de cosméticos, entre outras aplicações (Nakama *et al.*, 2017).

O uso de surfactantes é extremamente comum e vem crescendo desde a década de 1980 quando 1,7 milhões de toneladas foram utilizadas em 1984. Esse número aumentou para 15,93 milhões de toneladas em 2014. Deste volume comercializado anualmente, 60% correspondem a surfactantes aniônicos . (Nunes; Teixeira, 2022).

Os tensoativos sintetizados possuem amplas aplicações industriais e, portanto, estão presentes em diversos setores como alimentício, saneante, cosmético e

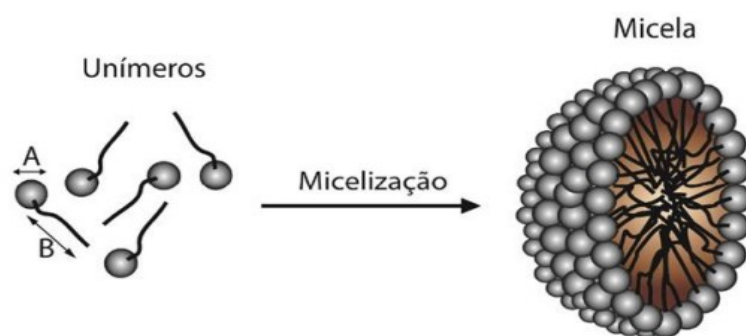
farmacêutico (Santos *et al.*, 2023). Devido as demandas higiênicas ocasionada pela pandemia da Covid-19, o consumo desses compostos teve uma potencialização no seu setor, por possuírem propriedades de emulsificação e formação de espuma o que se fazia necessário (Menezes *et al.*, 2023).

3.2.2. Concentração Micelar Crítica

A Concentração Micelar Crítica (CMC) dos surfactantes representa a concentração na qual os monômeros em solução começam a formar agregados para minimizar a energia das interações eletrostáticas e hidrofóbicas do sistema. Acima de uma certa concentração, as moléculas de surfactante formam agregados maiores conhecidos como micelas, que incorporam a parte hidrofóbica do surfactante em seu interior e com isso aumentam a solubilidade destes compostos orgânicos em água. Nessa concentração crítica, qualquer surfactante adicionado estará na forma micelar, e tanto as micelas de surfactante quanto os monômeros em solução estarão em equilíbrio dinâmico (Gassin *et al.*, 2012).

A formação de micelas é um processo espontâneo, e é uma das características mais comuns a todos os surfactantes que, devido à sua particular estrutura, apresentam uma grande capacidade de autoagregação, rearranjando-se espontaneamente de forma a adquirirem uma conformação termodinamicamente estável, como mostra a Figura 9. Este fenômeno deve-se à ação do efeito hidrofóbico, uma vez que a elevada organização das moléculas de água promove a agregação das caudas hidrofóbicas dos unímeros (Shaw, 2013).

Figura 09. Representação esquemática da estrutura das moléculas de surfactante na forma livre e após ocorrer a autoagregação; A – parte hidrofílica e B – parte hidrofóbica



Fonte: Shaw, (2013).

Apesar de bastante utilizados como agentes de limpeza ambiental, o uso frequente dos surfactantes traz problemas de toxicidade ao meio ambiente local (Sarubbo *et al.*, 2022). Esses tensoativos químicos quando lançados no meio ambiente em forma de resíduos, agredem os ecossistemas, levando a necessária substituição desses por tensoativos de base biológica (Pironti *et al.*, 2020). Nesse sentido, a aplicação de agentes tensoativos naturais, ou seja, biodegradáveis, surge como solução atrativa e eficiente nos processos de limpeza em ambiente industrial e descontaminação de ecossistemas. Os surfactantes biológicos mais conhecidos pelo potencial de aplicação na indústria de petróleo são os produzidos por microrganismos, conhecidos como biossurfactantes (Farias *et al.*, 2021).

3.3. Biossurfactantes

Como compostos oriundos de bioprocessos realizados por microrganismos, os Biossurfactantes (BS), ou surfactantes naturais, vêm ganhando espaço como substitutos dos tensoativos sintéticos devido a suas características de melhor biocompatibilidade, além de serem biodegradáveis e menos tóxicos ao meio ambiente se comparadas aos surfactantes tradicionais, o que os torna mais atrativos do ponto de vista ecológico (Bjerk *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2021; Sarubbo *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023; Fernandes *et al.*, 2023).

Os biossurfactantes podem ser produzidos usando vários substratos, como casca de batata, resíduos industriais, farinha de mandioca, óleo de palma, glicerol bruto e óleo de soja. As propriedades hidrofóbicas dos biossurfactantes são derivadas de ácidos graxos de cadeia longa, enquanto açúcares, fosfatos, ácidos carboxílicos, aminoácidos e peptídeos cíclicos contribuem para sua natureza hidrofílica (Sankhyan *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes podem ser amplamente agrupados em dois: biossurfactantes com baixo peso molecular e biossurfactantes com alto peso molecular. Os biossurfactantes com baixo peso molecular têm maior eficiência na redução da tensão superficial e da tensão interfacial, enquanto aqueles com alto peso molecular (bioemulsificantes) demonstram maior atividade de emulsificação do que a redução da tensão superficial ou interfacial (Okorie; Ogunjobi, 2024).

Os surfactantes verdes têm várias vantagens sobre os equivalentes sintéticos, incluindo biodegradabilidade mais fácil, maior compatibilidade ambiental, capacidade

superior de formação de espuma, maior especificidade, maior eficiência em temperaturas extremas, pH níveis e salinidade, bem como menor toxicidade. Por exemplo, a biodegradabilidade do biossurfactantes (por exemplo, soforolipídios) atingiram 61% após 8 dias de cultivo, enquanto os surfactantes sintéticos (por exemplo, Dodecil Sulfato de Sódio (SDS) não apresentaram biodegradabilidade após 8 dias (Dini *et al.*, 2024).

Apesar das vantagens vinculadas à sua utilização, os biossurfactantes apresentam uma baixa participação de mercado devido aos seus altos custos de produção, deste modo, diversas alternativas vêm sendo estudadas para reverter esse cenário, dentre elas podem ser citadas a busca por matéria-prima de baixo custo, como resíduos agroindustriais, otimização dos meios de cultura, desenvolvimento de tecnologias de extração e purificação e busca por microrganismos com alto rendimento produtivo (Banat *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2019; Farias *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2021; Sarubbo *et al.*, 2022; Ganesan; Rangarajan, 2022; Santos *et al.*, 2023).

Mais importante ainda, devido à crescente preocupação com o meio ambiente questões de surfactantes petroquímicos, o interesse mudou para o desenvolvimento e promoção do uso de biossurfactantes. Os biossurfactantes representam atualmente aproximadamente 10% da produção mundial de surfactantes. Esses versáteis surfactantes orgânicos encontram aplicações em uma ampla gama de indústrias, incluindo petróleo, alimentos, produtos farmacêuticos, medicina e agricultura (Marquez *et al.*, 2024).

Microrganismos produtores de biossurfactantes geralmente podem ser encontrados em ecossistemas marinhos (por exemplo, espécies de algas), terra (por exemplo, sedimentos, solo e lodo), ambientes extremos (por exemplo, reservatórios de petróleo), produtos alimentícios (por exemplo, laticínios, alimentos fermentados e mel cru), e ambientes contaminados (por exemplo, águas residuais e solo contaminado com óleo). Esses microrganismos são capazes de sobreviver em uma ampla gama de temperaturas, níveis de pH e condições de salinidade (Dini *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes são, na maioria dos casos, são de natureza aniônica ou não iônica. Enquanto a natureza eles podem ser divididos em dois grupos de acordo com ao seu peso molecular: (i) surfactantes de baixa massa molecular (peso molecular na faixa <1200 g/mol) e (ii) surfactantes de alta massa molecular (HMM) (peso molecular >45.000 g/mol). Os primeiros são eficazes na redução da tensão interfacial, enquanto

os HMM são mais eficazes na estabilização de emulsões e espumas (Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

3.3.1. Classificação

Além de sua composição química diversificada, os biossurfactantes podem ser produzidos por uma ampla variedade de microrganismos distintos. Esses metabólitos são produzidos como compostos extracelulares secundários (na fase estacionária de crescimento) que circulam livremente no meio de cultivo. ou permanecem ligados à superfície da célula microbiana. Além disso, os microrganismos produtores têm a capacidade de sintetizar uma ampla gama de biossurfactantes relativos às suas propriedades (Vučurović *et al.*, 2024).

Existem quatro classes principais de biossurfactantes: glicolipídeos, lipopeptídeos, fosfolipídios e surfactantes poliméricos (Dini *et al.*, 2024).

3.3.1.1. Glicolipídeos

Os glicolipídios são moléculas anfifílicas, pois compreendem tanto o glicosil hidrofílico quanto os resíduos lipídicos lipofílicos. Em comparação com surfactantes sintéticos derivados do petróleo (por exemplo, sulfonatos de alquilbenzeno) ou à base de plantas (por exemplo, poliglicosídeos de alquila) os biossurfactantes glicolipídeos produzidos microbialmente são, em sua maioria, de maior atividade superficial, maior poder emulsificante, menores concentrações críticas de micela, maior biodegradabilidade (em comparação com surfactantes derivados do petróleo), menor ecotoxicidade e menor potência desnaturante proteica (Abdel-Mawgoud; Stephanopoulos, 2018).

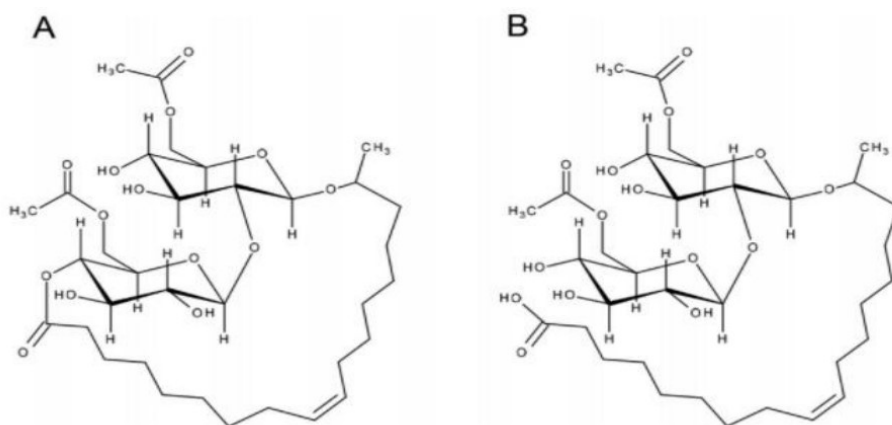
Esses tipos de biossurfactantes podem ser amplamente divididos em três classes principais por suas caudas polares: raminolipídeos, soforolipídeos e trehalolipídeos. No entanto, outras classes de glicolipídios. Os mais conhecidos microrganismos produtores de glicolipídios são *Pseudomonas* spp., *Rhodococcus* spp., *Arthrobacter* spp., *Starmerella bombicola* e *Candida* spp. (Dini *et al.*, 2024).

Os glicolipídeos mostram propriedades bioativas benéficas, como antimicrobianas, imunorreguladoras e atividades antivirais. Com essas propriedades favoráveis, eles são atualmente um dos biossurfactantes microbianos mais representados no mercado mundial (Pala *et al.*, 2024).

Estudos mostraram que biossurfactantes (BS) à base de glicolipídios podem induzir parada do crescimento e apoptose em células tumorais, destacando ainda mais seus potenciais aplicações terapêuticas. Além disso, BS glicolipídicos demonstraram seu potencial anticâncer contra uma variedade de linhagens de células cancerígenas, abrangendo câncer de mama (MCF-7), câncer de cólon (CaCo-2), câncer de fígado (HepG2) e linhagens de células de leucemia promielocítica humana. O baixo perfil de toxicidade dos BS para o hospedeiro humano, bem como sua alta tolerância a condições extremas, como pH e temperatura, os tornam atraentes para aplicações biomédicas (Das *et al.*, 2024).

Os soforolipídeos, que são produzidos especialmente pela levedura *Candida (Starmerella) bombicola*, não têm efeitos de citotoxicidade e são aprovados pela Food and Drug Administration (FDA) para aplicação em muitas indústrias (Farias *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2017). Os soforolipídeos possuem sua parte hidrofílica formada por uma molécula de soforose, unida por uma ligação β -glicosídica a uma longa cadeia de ácidos graxos, que compõem a sua parte hidrofóbica. A soforose é um dissacarídeo de glicose com uma ligação incomum β -1,2, que pode ser, no caso do soforolipídios, acetilado nas posições 6' e/ou 6". Em relação à cadeia de ácidos graxos, ela geralmente contém 16 ou 18 átomos de carbono, de forma que a extremidade carboxílica do ácido graxo pode estar livre (forma ácida, que é aniônica sob condições alcalinas) ou esterificada internamente na posição 4" ou na posição 6'/6" (forma lactônica, que é neutra) (Figura 10) (Van Bogaert; Soetaert, 2011).

Figura 10. Representação molecular de duas formas de soforolipídios. A) Forma lactônica e B) Forma ácida.



Fonte: Van Bogaert; Soetaert (2011).

3.3.1.2. Lipopeptídeos

Lipopeptídeos (LS) é uma nova forma de biossurfactante natural gerado principalmente de *Bacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Aspergillus* e *Actinomyces*. Eles são tipicamente feitos de ácidos graxos β -amino ou β -hidroxi (grupos lipofílicos) e cadeias peptídicas ou anéis peptídicos (grupos hidrofílicos) (Li *et al.*, 2024). Sua eficácia antibiofilme é atribuída principalmente ao mecanismo do canal de água, enquanto seu efeito antimicrobiano surge de sua capacidade de romper as membranas celulares bacterianas, aumentando a permeabilidade da membrana e causando vazamento de metabólitos (Purwasena, *et al.*, 2024).

Os lipopeptídeos mais abundantes produzidos por *Bacillus* são agrupados nas famílias da surfactina, iturina e fengicina. Eles são diferenciados com base em sua sequência de aminoácidos, ciclização e comprimento de peptídeos e nos tipos de ácidos graxos. Os lipopeptídeos de *Pseudomonas* mais comuns incluem viscosina, anfisina, tolaasina e siringomicina (Dini *et al.*, 2024).

Atualmente, relatórios muito limitados têm destacado a produção dos biossurfactantes lipopeptídicos para o aumento do biohidrogênio a partir da bioconversão da lignocelulose e seu impacto no ecossistema microbiano. Os biossurfactantes lipopeptídicos desempenhar um papel indispensável na produção de biohidrogênio a partir de um substrato complexo como a biomassa de lignocelulose através da fermentação anaeróbica escura. Melhorando substancialmente a produção de biohidrogênio o que impactou significativamente a geração de ácidos graxos de cadeia curta (Phulpoto *et al.*, 2024).

3.3.1.3. Fosfolipídios

Os fosfolipídios são uma classe de biossurfactantes que consistem em uma substância hidrofílica com o grupo de cabeça de fosfato e duas caudas de ácidos graxos hidrofóbicos. Eles são abundantes em membranas celulares de microrganismos, incluindo bactérias e leveduras. Fosfolipídios foram investigados por sua capacidade de reduzir a tensão interfacial e melhorar a eficiência de recuperação (Sankhyan *et al.*, 2024).

Estas moléculas desempenham um papel crucial como componentes essenciais das membranas celulares, especialmente quando os n-alcanos são utilizados como

fonte de carbono durante o cultivo destes microrganismos. Os fosfolipídios são fundamentais para a integridade estrutural e funcional, apresentando uma estrutura básica composta por uma molécula de glicerol à qual estão ligadas duas moléculas de ácidos graxos, ligados por ligações éster. Além disso, um grupo fosfato está ancorado à molécula de glicerol, fornecendo uma variedade de fosfolipídios devido a variações em seus constituintes. Entre os principais tipos de fosfolipídios está o fosfatidilinositol (Simões *et al.*, 2024).

3.3.1.4. Poliméricos

Biossurfactantes poliméricos, são de alto peso molecular e têm sido amplamente estudados. Vários microrganismos, como *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Halomonas*, e *Candida*, podem produzir esses biossurfactantes. Cada tipo de biossurfactante polimérico possui estruturas e propriedades únicas, que permitem uma ampla gama de aplicações (Simões *et al.*, 2024).

O lipossacarídeo conhecido como Emulsan, é um potente emulsificante extracelular produzido por hidrocarbonetos a partir da bactéria *Acinetobacter calcoaceticus* (Sarubbo *et al.*, 2022).

Para explorar completamente o potencial do BS, esforços foram feitos para entender a interação entre o BS e vários polímeros naturais e sintéticos. Essa interação pode levar à formação de automontagens únicas ou estruturas complexas que exibem desempenho melhorado em comparação com componentes individuais. Os polímeros podem atuar como transportadores ou matrizes para BS, facilitando a liberação controlada do surfactante ao longo do tempo. Quando combinados com polímeros compatíveis, eles podem formar sistemas ecologicamente corretos. Isso pode ser particularmente vantajoso em aplicações de administração de medicamentos, onde a liberação controlada e sustentada de produtos farmacêuticos é desejada. Esse comportamento sinérgico também está sendo explorado na recuperação aprimorada de petróleo e na remediação ambiental (Abhyankar *et al.*, 2024).

Devido às suas propriedades emulsificantes e capacidade de reduzir a tensão superficial entre líquidos e sólidos, os biossurfactantes poliméricos têm muitas aplicações potenciais. Eles podem ser usados em uma variedade de setores industriais, incluindo petróleo, cosméticos, alimentos e agricultura, entre outros. Além disso, os biossurfactantes poliméricos têm a vantagem de serem biodegradáveis e, em

geral, menos tóxicos comparados aos surfactantes sintéticos tradicionais. Isso os torna mais ecologicamente correto e promissor para uso em aplicações de biorremediação, onde eles podem auxiliar na remoção de poluentes e na recuperação de solos contaminados (Simões *et al.*, 2024).

3.3.2. Propriedades dos Biossurfactantes

O uso de biossurfactantes em vários campos aproveita as propriedades melhoradas dos biossurfactante comparado aos surfactantes sintéticos tradicionais. Esses incluem menor toxicidade, maior biodegradabilidade e interação benigna com o meio ambiente, maiores propriedades de formação de espuma, ação e tolerância a condições extremas (alta temperatura e salinidade, pH baixo e alto) (Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

3.3.2.1. Redução de Tensão Superficial

A formação de micelas, que são conjuntos de moléculas anfipáticas, é uma característica importante dos biossurfactantes. A formação de micelas ocorre em uma concentração específica de biossurfactantes, na qual a tensão superficial atinge seu valor mais baixo. Enquanto a concentração do biossurfactante aumenta, a tensão superficial diminui, levando à formação de micelas (Dini *et al.*, 2024).

Com estrutura anfipática específica os biossurfactantes tornam possíveis a adsorção na interface do líquido, formando assim uma monocamada, que diminui as forças coesivas entre os líquidos, atuando como uma membrana fina e elástica e, como resultado, a tensão superficial é abaixada. Desta forma, os biossurfactantes têm a capacidade de reduzir a tensão superficial entre dois materiais, como um gás e um líquido (tensão superficial da água), dois líquidos (água e óleo), ou um líquido e sólido (água e partículas de sujeira) (Vučurović *et al.*, 2024).

Os glicolipídios são capazes de reduzir a tensão superficial da água de 72 a 28 mN/m. Outros estudos relataram tensões superficiais mais baixas de aproximadamente 24 mN/m e 26 mN/m para trehalolipídeo e raminolipídeo, respectivamente, purificado de *Micrococcus luteus* e *P. aeruginosa* PTCC 1340 (Dini *et al.*, 2024).

3.3.2.2. Biodegradabilidade

A biodegradação é um mecanismo de remoção essencial que pode ser limitado por uma baixa biodisponibilidade de contaminantes hidrofóbicos, como hidrocarbonetos de petróleo. No entanto, as bactérias podem produzir biossurfactantes que podem melhorar a biorremediação de compostos hidrofóbicos, como no caso de um consórcio que produziu um soforolípido, que melhorou a bioacessibilidade dos hidrocarbonetos de petróleo para degradação bacteriana (Varnava *et al.*, 2024).

3.3.2.3. Emulsificação

A emulsificação é um processo estável de desequilíbrio que produz bolhas chamadas emulsões. Uma emulsificação é um processo heterogêneo que consiste em líquidos imiscíveis dispersos como pequenas gotículas em outro líquido. Na agricultura, indústrias cosméticas e farmacêuticas, os biossurfactantes são comumente usados em processos de emulsificação. A atividade emulsificante do biossurfactante depende do substrato utilizado para a aplicação. Eles são frequentemente usados como um complemento para promover a biorremediação e remover a contaminação por óleo no meio ambiente (Kamalesh *et al.*, 2024).

A capacidade emulsionante dos biossurfactantes pode ser estimado usando o índice de emulsificação. Neste método, concentrações iguais de biossurfactante são adicionados a vários substratos de hidrocarbonetos (por exemplo, azeite, petróleo bruto, querosene e óleo mineral) e misturado em velocidade máxima por alguns minutos, seguido de armazenamento em temperatura do quarto. As emulsões resultantes são comparadas com um controle negativo (água) e controles positivos (Tween-20 ou SDS) para diferenciação. A atividade emulsificante do biossurfactantes é geralmente avaliado ao longo de vários períodos de tempo (por exemplo, 24, 96 e 168 horas) para determinar a estabilidade das emulsões. A razão entre a altura de uma emulsão e a altura total do líquido é usada como índice de emulsão (Dini *et al.*, 2024).

3.3.2.4. Atividade Anti-biofilme

Atualmente, uma das principais causas de infecções microbianas e desenvolvimento de resistência é a presença de biofilmes. Quando um microrganismo é depositado em uma determinada superfície, forma-se uma comunidade biológica estruturada ou biofilme bacteriano. Este biofilme é autorregulado por moléculas *quorum-sensing* cresce envolto em uma matriz extracelular que o protege do ambiente,

impede a ação de agentes antimicrobianos e, conseqüentemente, dificulta muito sua eliminação (Puyol *et al.*, 2024).

O potencial dos biossurfactantes como alternativa para controlar biofilmes tem sido extensivamente, a molhabilidade e as propriedades anfipáticas dos biossurfactantes permitem que eles afetem diretamente as atividades de corrosão, alterando a adesão e a adesão de microrganismos. biossurfactantes como a liquenisina produzido por *Bacillus licheniformis* mostrou efeito antibiofilme antes e depois dos tratamentos com biofilme. Um outro exemplo são os BS produzidos por raminolipídeos têm efeito antiadesivo e antibiofilme contra bactérias Gram-positivas e negativas, inibindo a formação de biofilmes nas superfícies de poliestireno e aço inoxidável (Kamalesh *et al.*, 2024).

3.3.2.5. Ação Antimicrobiana

Os mecanismos básicos de ação antimicrobiana dos surfactantes incluem a alteração da permeabilidade da membrana e a perfuração da membrana celular do hospedeiro microbiano emulsão (Dini *et al.*, 2024). Os biossurfactantes exibem ação antibacteriana propriedades contra bactérias, destruindo suas membranas e fazendo-as morrer. Ao contrário dos antibióticos convencionais, as propriedades antibacterianas dos biossurfactantes utilizam processos alternativos para matar os organismos alvo (Kamalesh *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes se distinguem por sua baixa toxicidade e alta biodegradabilidade, principalmente porque suas estruturas químicas são açúcares simples e ácidos graxos ou componentes polipeptídicos. Essas propriedades garantem a segurança das formulações de medicamentos e reduzem a probabilidade de efeitos adversos, ao mesmo tempo em que preservam a eficácia das substâncias bioativas (Puyol *et al.*, 2024).

3.3.2.6. Dispersão

A dispersão ocorre quando a atração coesiva entre partículas semelhantes diminui. Uma pequena quantidade de agente dispersante (como BS) é adicionada a uma suspensão para evitar que partículas insolúveis se agreguem. Por exemplo, BS pode remover moléculas hidrofóbicas de superfícies rochosas, tornando-as mais móveis e fáceis de recuperar durante a extração de óleo. A dispersão também

desempenha um papel na redução ou prevenção completa da formação de biofilmes por micróbios indesejados (Silva *et al.*, 2024).

3.3.2.7. pH e Temperatura

O pH e a temperatura do ambiente têm pouco impacto na atividade de superfície de muitos biossurfactantes. A liquenisina, um biossurfactante produzido a partir do *Bacillus licheniformis* JF-2, não é afetado com uma faixa de pH de 4,5–9,0 e temperaturas tão altas quanto 50 °C. Da mesma forma, um lipopeptídeo produzido por *B. subtilis* LB5a manteve sua atividade de superfície por 6 meses a uma temperatura de 121 °C e em um ambiente com alto teor de sal. O biossurfactante é estável em pH 4–10 e altas temperaturas de até 120 °C, e um teor de NaCl de até 10% (p/v) mantém a ação de emulsificação (Nagtode *et al.*, 2023).

3.3.3. Aplicação de Biossurfactante na Área Industrial e Ambiental

Os biossurfactantes têm sido cada vez mais explorados pela indústria petrolífera, onde estes compostos naturais podem participar do processo de extração do petróleo ou podem ser incorporados em formulações de óleos lubrificantes. Os biossurfactantes reduzem a tensão interfacial entre o óleo e água e são, portanto, utilizados na biorremediação de ecossistemas aquáticos e do solo por meio de a emulsificação e dispersão de hidrocarbonetos, potencializando a degradação destes compostos no ambiente. Outras aplicações envolvem a dispersão de derramamentos de óleo, a remoção e mobilização de resíduos de óleo em tanques de armazenamento e óleo enriquecido com micróbios na recuperação (MEOR) (Silva *et al.*, 2024).

3.3.3.1. Biossurfactante na Recuperação de Óleo Aprimorada (EOR)

O processo usado para extrair o petróleo bruto envolve três etapas. A primeira e a segunda etapas são pressão natural e induzida pressão (injeção de água e gás). Essas etapas extraem aproximadamente 40% do material preso óleo. A terceira etapa é a recuperação do óleo residual. Recuperação Aprimorada de Petróleo (EOR) envolve o uso de métodos térmicos (injeção de água quente e dióxido de carbono [CO₂]), métodos não térmicos (inundação com solventes e surfactantes químicos) e biológicos métodos, embora a remoção deste óleo da rocha seja difícil (Selva *et al.*, 2024).

Segundo (Sankhyan *et al.*, 2024), o papel dos biossurfactantes eficazes na EOR, em geral, é melhorar o rendimento da recuperação de petróleo através dos três

mecanismos a seguir: Redução da tensão superficial interfacial (IFT); Alteração da molhabilidade de uma rocha reservatório úmida por óleo; Mobilização do óleo retido via emulsificação. Um IFT significativamente reduzido e uma molhabilidade modificada aumentam o número capilar, o que resulta em maior recuperação de petróleo. O IFT pode ser descrito como o adesivo tensional força presente entre as moléculas de óleo e água, que mantém essas duas fases presas nos poros da rocha reservatório. Para melhorar a recuperação do petróleo, a força capilar que mantém o óleo unido deve ser reduzida diminuindo o IFT, o que resulta em um maior número capilar, fazendo com que o óleo residual flua em direção ao banco de óleo e depois para o poço de produção ponto de extração. Devido à natureza anfifílica do surfactante, após introdução do surfactante no sistema de rocha reservatório, a cabeça hidrofílica se fixa à água/salmoura enquanto a cauda hidrofóbica se liga à fase oleosa.

3.3.3.2. Biossurfactantes Aplicados na Limpeza de Tanques de Armazenamento de Petróleo

Enormes quantidades de óleo são armazenadas em tanques de óleo de refinaria e transportadas por longos períodos por petroleiros ou caminhões. A maioria desses tanques de armazenamento são limpos ou mantidos regularmente, o que frequentemente aumenta o problema de práticas perigosas ou a produção de resíduos nocivos. Além disso, o lodo depositado nas paredes ou no fundo dos tanques é viscoso ou semissólido e não pode ser removido com bombas convencionais (Sharma; Lavania; Lal, 2023).

A limpeza de tanques de armazenamento de petróleo representa um desafio devido aos depósitos de petróleo pesado. Os métodos convencionais são perigosos, demorados, trabalhosos e caros. A operação de lavagem pode envolver a liquefação de solventes e a pulverização de água quente como bem como o uso de surfactantes químicos. Assim, o uso de surfactantes microbianos, que são eficientes, biodegradáveis e ecológicos, constitui uma vantagem opção para esses processos de limpeza. A aplicação de biossurfactantes leva à formação de emulsões óleo-em-água, diminuindo a viscosidade do lodo e do óleo depositado para possibilitar o bombeamento desses resíduos (Selva Filho *et al.*, 2024).

3.3.3.3. Aplicação de Biossurfactantes no Transporte de Petróleo Bruto por Dutos

O petróleo bruto é geralmente transportado por oleodutos dos locais de produção até o porto de embarque ou refinarias. Esse transporte frequentemente apresenta desafios operacionais que limitam a viabilidade econômica, especialmente para petróleo bruto pesado ou ultrapesado. A alta viscosidade do petróleo bruto devido ao alto teor de parafina e asfalteno tende a reduzir seu fluxo, frequentemente levando à formação de lodo nas paredes internas (Sharma; Lavania; Lal, 2023).

A utilização de micróbios potencialmente ubíquos para desintoxicar o lodo é uma abordagem alternativa à degradação do lodo, que vem ganhando atratividade nos últimos anos devido à sua natureza limpa e econômica. Os micróbios usam resíduos oleosos como fontes de energia e os degradam em formas mais simples e não perigosas. No entanto, a natureza persistente e recalcitrante do lodo oleoso hidrofóbico leva a um processo de degradação lento e limita as atividades metabólicas dos micróbios. Assim, a busca por técnicas de remediação avançadas e eficientes para restaurar locais contaminados por lodo continua. A aplicação de cepas produtoras de biossurfactantes na remediação de lodo oleoso pode aumentar a disponibilidade de resíduos oleosos hidrofóbicos (Patowary *et al.*, 2024).

Neste cenário são indicados biossurfactantes com propriedades emulsificantes, como o a formação de emulsões é essencial para o transporte de petróleo. Ao contrário de uma emulsão de água em óleo, a estabilização de uma emulsão óleo em água requer a separação das fases uma vez que o petróleo bruto transportado pelo oleoduto chega ao seu destino (refinaria). A redução a tensão não é uma preocupação nesses casos e o surfactante deve ter um HLB elevado. Por isso, biossurfactantes com alto HLB (bioemulsificantes) são altamente úteis para aumentar a mobilidade de óleo. Tais casos envolvem o uso de biossurfactantes com elevada massa molar como alasan, emulsan e biossurfactantes poliméricos (Selva *et al.*, 2024).

3.3.3.4. Tratamento de Derramamento de Óleo

O derramamento de óleo frequentemente tem potencial para prejudicar o meio ambiente por toxicidade química que pode ter efeitos fatais no funcionamento celular, sufocar alguém fisicamente tem um efeito errático nos processos fisiológicos, mudanças ambientais que levam ao surgimento de espécies predatórias e outros

efeitos que são diretos e indiretos no bem-estar humano e social (Riyal; Sharma; Dwivedi, 2024).

Os hidrocarbonetos de petróleo têm atraído grande atenção devido à sua carcinogenicidade, toxicidade e mutagenicidade. O derramamento de óleo é considerado um dos desafios significativos para a poluição da água que pode causar danos graves ao ecossistema e à saúde humana. Os métodos de separação de óleo/água mais usados, como centrifugação, gravidade, coalescência e métodos de flotação, têm algumas limitações, como baixa eficiência de separação de óleo, segunda poluição, altos custos e demorado (Elmaghraby *et al.*, 2024).

Infelizmente, devido à forma como o petróleo é transportado e usado, até mesmo os maiores reservatórios de petróleo os oceanos são vulneráveis a derramamentos de petróleo em larga escala. Três tipos de técnicas tradicionais são usados para lidar com esses derramamentos: química, biológica e física/mecânica. Enquanto os métodos biológicos dependem de processos naturais para remediação, os métodos físicos contêm e coletam óleo usando barreiras e *skimmers*. As técnicas químicas usam agentes como dispersantes para fragmentar o óleo em partículas minúsculas e acelerar o processo de deterioração natural. Apesar de sua eficácia, os dispersantes químicos têm desvantagens. A necessidade de alternativas ecologicamente corretas é destacada pelo fato de que eles podem ser tóxicos para a vida marinha e não são facilmente biodegradáveis (Arumanatharayil, 2024).

O princípio básico do biossurfactante na resposta a derramamentos de óleo é reduzir o tamanho das gotículas de óleo diminuindo a tensão interfacial (IFT) entre o óleo e a água sob a ação das ondas, este é um processo de emulsificação, onde um biossurfactante eficaz deve converter a mancha de óleo em gotículas discretas que permanecem estáveis à coalescência (Farooq *et al.*, 2024).

Biossurfactantes podem ser usados para regular a poluição, reduzindo a viscosidade e promovem a formação de emulsões óleo-água, o que facilita o bombeamento de lama e a destruição da emulsão e melhora a recuperação do petróleo bruto, reduzindo ainda mais a quantidade de lodo em 95% (Sharma, Lavania, Lal, 2023).

3.3.3.5. Biorremediação

A biorremediação é descrita como o procedimento de degradação de poluentes usando métodos biológicos em ambientes controlados para um estado aceitável ou

para níveis abaixo do nível de concentração regulatória. É o processo de usar seres vivos para tratar ou degradar poluentes no ambiente em um material menos tóxico, principalmente microrganismos são usados para este processo (Li *et al.*, 2024).

O uso adequado de biossurfactantes na biorremediação de hidrocarbonetos de petróleo, especialmente em sistemas de solo, requer a consideração de vários fatores. A administração de baixas concentrações de biossurfactantes nos estágios iniciais da biodegradação resulta em maior eficiência, principalmente quando o teor de hidrocarbonetos é alto (Selva *et al.*, 2024).

Nos últimos anos, os biossurfactantes têm atraído interesse potencial para uso na remediação ambiental de contaminantes orgânicos e inorgânicos, particularmente na remoção de metais pesados do solo e da água, cosméticos e produtos farmacêuticos, bem como na recuperação aprimorada de petróleo emulsificação (Nagtode *et al.*, 2023).

3.3.4. Perspectivas Futuras Sobre a Utilização dos Biossurfactantes

Um dos maiores desafios globais é substituir completamente compostos sintéticos com altas demandas em várias indústrias (ambiental, alimentícia e médica), como surfactantes, e buscar alternativas mais sustentáveis. Neste caso, biossurfactantes são substitutos promissores devido a seu potencial de biodegradabilidade e inocuidade. Do ponto de vista de um economista, tanto o baixo rendimento quanto o alto custo da produção de biossurfactantes são grandes obstáculos que impedem sua entrada no mercado em larga escala (Dini *et al.*, 2024).

A segmentação do mercado de biossurfactantes é realizada de acordo com diferentes critérios. Com base no tipo de produto, o mercado global de biossurfactantes é dividido em (I) glicolipídios (soforolipídios e raminolipídeos), (II) lipopeptídeos e lipoproteínas, (III) fosfolipídios e ácidos graxos, (IV) poliméricos e (V) outros (Vučurović *et al.*, 2024).

O mercado global de biossurfactantes atingiu um valor de US\$ 1,2 bilhão no ano de 2022. De acordo com, projeta-se que o mercado de biossurfactantes veja uma taxa de crescimento anual acumulada de 11,2%. Esse crescimento até o ano de 2027 deve render um valor de mercado de US\$ 1,9 bilhão (Raji; Bello, 2024).

O segmento de soforolipídios deteve a maior participação em 2022. Este tipo de biossurfactante é amplamente utilizado como ingredientes de produtos de cuidados

peçoais e cosméticos. O mercado de soforolipídios destinados apenas ao uso em cuidados peçoais valia mais de US\$ 720 milhões em 2022 e deve crescer a uma taxa anual de 7,5%. Os raminolipídios, outro grupo importante de biossurfactantes do segmento de glicolipídios, são amplamente utilizados na indústria farmacêutica, terapêutica e cosmética e, devido às suas características únicas, tornaram-se progressivamente favorecidos em uma variedade de indústrias. Estima-se que o mercado global de raminolipídios valerá mais de US\$ 3 bilhões até 2032 (Vučurović *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes oferecem uma perspectiva altamente promissora para impulsionar a sustentabilidade e os aspectos ambientais em várias aplicações industriais. Sua origem natural e renovável, biodegradabilidade, redução de resíduos e menor impacto nas emissões de gases de efeito estufa posicionam essas moléculas como uma alternativa ecologicamente correta e eficaz aos surfactantes químicos tradicionais, contribuindo para um futuro mais suportável e bem ajustado para nossa sustentabilidade e economia circular em relação aos recursos minerais (Simões *et al.*, 2024).

No entanto, considerações econômicas na produção e demanda competitiva por matérias-primas, juntamente com o objetivo de atingir desempenho comparável ou superior aos surfactantes convencionais, representam desafios significativos. Enfrentar esses desafios requer empregar resíduos agrícolas ou outros tipos de biomassas com baixa pegada de carbono. O uso de matérias-primas de menor custo exigirá avanços em métodos de produção biotecnológica, que podem se beneficiar de avanços no design de reatores e separação de processos. Além disso, a inteligência artificial surge como uma área promissora que eventualmente auxiliará na transição para materiais e processos sustentáveis, especialmente no domínio complexo de produtos de base biológica (Marquez *et al.*, 2024).

4. REFERÊNCIAS

ABBOT, V., PALIWAL, D., SHARMA, A., & SHARMA, P. A review on the physicochemical and biological applications of biosurfactants in biotechnology and pharmaceuticals. **Heliyon**, 8(8), e10149, 2022.

ABDEL-MAWGOUD, AHMAD MOHAMMAD; STEPHANOPOULOS, GREGORY. Simple glycolipids of microbes: chemistry, biological activity and metabolic engineering. **Synthetic and Systems Biotechnology**, v. 3, n. 1, p. 3-19, 2018.

ABHYANKAR, I., HIRLEKAR, S., PRABHUNE, A., & NISAL, A. Bridging the gap: an investigation of biosurfactants-polymer systems. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, p. 101806, 2024.

AHMED, TAREK. **Reservoir engineering handbook**. Gulf professional publishing, 2018.

AMARAL, LUCIMAR VENÂNCIO; FERREIRA, ANDRÉ GUIMARÃES. **Combustíveis, combustão e motores de combustão interna: Uma revisão sistêmica**, 2024.

AL-DHABI, N. A.; ESMAIL, G. A.; ARASU, M. V. Enhanced Production of Biosurfactant from *Bacillus subtilis* Strain Al-Dhabi-130 under Solid-State Fermentation Using Date Molasses from Saudi Arabia for Bioremediation of Crude-Oil-Contaminated Soils. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.17, n.22, 2020.

AL-SAKKAF, M. K., & ONAIZI, S. A. Effects of emulsification factors on the characteristics of crude oil emulsions stabilized by chemical and Biosurfactants: A review. **Fuel** (London, England), 361(130604), 130604, 2024.

ARAÚJO, R. M. M.; CECCHETTI, C. Logística Reversa de GLP no Brasil: Uma análise dos programas de reciclagem das prestadoras de serviços. **Revista de Tecnologia Aplicada**, v. 3, n. 2, p. 49-62, 2017.

ARYAN, V., & KRAFT, A. The crude oil value chain: Global availability and the influence of regional energy policies. **Journal of Cleaner Production**, 280(124616), 124616, 2021.

ARUMANATHARAYIL, JUSTIN JOSEPH. **Exploring the Effectiveness of Biosurfactant in Enhancing Oil Recovery and Reducing Environmental Impact in Oil and Gas Industry**. 2024. Tese de Doutorado. Technische Universität Wien.

ASTM D 7566-20c . Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. **Annual Book of ASTM Standards**, 2020.

BARBOSA, F. G., RIBEAUX, D. R., ROCHA, T., COSTA, R. A., GUZMÁN, R. R., MARCELINO, P. R., ... & SILVA, S. S. D. Biosurfactants: Sustainable and versatile molecules. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 33, p. 870-893, 2022.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Potencial diversificação da indústria química Brasileira, Relatório 4: Tensoativos. Chamada Pública BNDES/FEP nº3/2011. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

BOLUDA, CARLOS JOSÉ; MACÍAS, MARIANA; GONZÁLEZ MARRERO, JOAQUÍN. La complejidad química de las gasolinas de automoción. **Ciencia, ingenierías & aplicaciones**, 2019.

BRASIL. **Resolução ANP nº 807, de 23 de janeiro de 2020**. Estabelece a especificação da gasolina de uso automotivo e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializarem o produto em todo o território nacional. Diário Oficial da União: Brasília, DF. Seção 1, p. 46, 24 jan. 2020.

CANUL-CHAN, M., RODAS-JUNCO, B. A., URIBE-RIESTRA, E., & HOUBRON, E. Biodegradation of crude oil present in wastewaters: evaluation of biosurfactant production and catechol 2, 3 dioxygenase activity. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 22, n. 1, p. Bio2932-Bio2932, 2023.

CASTRO, ALAN STAMPINI BENHAME DE. **Determinação da cinética e termodinâmica da formação de estruturas supramoleculares de proteína-surfactante**. 2021. 92 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

COELHO, P. **Refino do Petróleo**. Engenharia Química, 2012.

DA SILVA, F. C. R.; DOS SANTOS, L. C. L.; DE OLIVEIRA, P. K. R. Estudo das técnicas aplicadas no tratamento da água produzida de petróleo. **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2022**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DA SILVA MARINHO, PATRÍCIA SUZANNE; DA SILVA, RENATA RAIANNY; DE LUNA, JULIANA MOURA. Biossurfactantes microbianos e aplicações ambientais: uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e103111234123-e103111234123, 2022.

DA SILVA, I. A., DE ALMEIDA, F. C. G., ALVES, R. N., CUNHA, M. C., DE OLIVEIRA, J. C. M., FERNANDES, M. L. B., & SARUBBO, L. A. The Formulation of a Natural Detergent with a Biosurfactant Cultivated in a Low-Cost Medium for Use in Coastal Environmental Remediation. **Fermentation**, v. 10, n. 7, p. 332, 2024.

DAS, R. P., SAHOO, S., PAIDSETTY, S. K., AHMAD, I., SAHOO, B., JAYABASKARAN, C., ... & PRADHAN, A. K. Isolation, characterization, and multimodal evaluation of novel glycolipid biosurfactant derived from *Bacillus* species: A promising *Staphylococcus aureus* tyrosyl-tRNA synthetase inhibitor through molecular docking and MD simulations. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, p. 129848, 2024.

DALTIN, DECIO. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. Editora Blucher, 2011.

DIAS, MARIA FERNANDA REIS GAVAZZONI. Hair cosmetics: an overview. **International journal of trichology**, v. 7, n. 1, p. 2-15, 2015.

DOMINGUEZ VEGA, SAUL YOVANI; ROSALES LECCA, SHARON FIORELA. **Biodegradación de tolueno por *Pseudomonas Aeruginosa* en suelos contaminados con derrames de petróleo**. Iquitos. 2023.

DOS SANTOS, Y. R. P., CAVALCANTI, A. W. A., MENESES, M. M. M. B., CHAVES, M. M. N., JÚNIOR, L. H. B. L., JORDON, Y., ... & DA SILVA, D. W. Acidificação de matriz em reservatórios de petróleo utilizando ácidos orgânicos: uma revisão. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 17, n. 3, p. e5652-e5652, 2024.

DUARAH, P., HALDAR, D., PATEL, A. K., DONG, C.-D., SINGHANIA, R. R., & PURKAIT, M. K. A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. **Bioresource Technology**, 348(126791), 126791, 2022.

ELMAGHRABY, N. A., OMER, A. M., KENAWY, E. R., GABER, M., RAGAB, S., & NEMR, A. E. Composite nanofiber formation using a mixture of cellulose acetate and activated carbon for oil spill treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 13, p. 38683-38699, 2023.

ERAS-MUÑOZ, E., WONGSIRICHOT, P., INGHAM, B., WINTERBURN, J., GEA, T., & FONT, X. Screening of alternative nitrogen sources for sophorolipid production through submerged fermentation using *Starmerella bombicola*. **Waste Management** (New York, N.Y.), 186, 23–34, 2024.

EVANS, F. D.; WENNERSTROM, H. The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet, Second Edi.; **Wiley-VCH**: New York, 1999.

FAHIM, MOHAMED; ALSAHAF, TAHER A.; ELKILANI, AMAL “Introdução do Refino de petróleo” **Elsevier** Editora Ltda, Rio de Janeiro, 2012.

FARAH, M. A.; **Petróleo e seus derivados**, 1a. ed., LTC: Rio de Janeiro, 2012.

FARIAS, C. B. B., ALMEIDA, F. C., SILVA, I. A., SOUZA, T. C., MEIRA, H. M., RITA DE CÁSSIA, F., ... & SARUBBO, L. A. Production of green surfactants: Market prospects. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 51, p. 28-39, 2021.

FAROOQ, U., SZCZYBELSKI, A., FERREIRA, F. C., FARIA, N. T., & NETZER, R. A Novel Biosurfactant-Based Oil Spill Response Dispersant for Efficient Application under Temperate and Arctic Conditions. **ACS omega**, v. 9, n. 8, p. 9503-9515, 2024.

FELIPE, L. DE O.; DIAS, S. DE C. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova na Escola**, v. 39, n. 3, p. 228-236, 2017.

FERREIRA, A. A.; AQUINO NETO, F. R. A destilação simulada na indústria do petróleo. **Química Nova**, v. 28, p. 478-482, 2005.

FERREIRA, A.; VECINO, X.; FERREIRA, D.; MOLDE, A.D.; RODRIGUES, L.R. Novel cosmetic formulations containing a biosurfactant from *Lactobacillus paracasei*. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 155, p. 522–529, 2017.

FINIZIO, A., PATROLECCO, L., GRENNI, P., GALLI, E., MUZZINI, V. G., RAUSEO, J., ... & CARACCIOLO, A. B. Environmental risk assessment of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate in site-specific conditions arising from mechanized tunnelling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 383, p. 121116, 2020.

GASSIN, P. M., MARTIN-GASSIN, G., MEYER, D., DUFRÊCHE, J. F., & DIAT, O. Kinetics of Triton-X100 transfer across the water/dodecane interface: Analysis of the interfacial tension variation. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 116, n. 24, p. 13152–13160, 2012.

GAUTO, M. A., DE MELO APOLUCENO, D., AMARAL, M. C., & AURÍQUIO, P. C. **Petróleo e gás: princípios de exploração, produção e refino**. Bookman Editora, 2016.

GRIFFITHS, S., SOVACOO, B. K., KIM, J., BAZILIAN, M., & URATANI, J. M. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. **Energy Research & Social Science**, 89(102542), 102542, 2022.

GOMES, CARLOS JEAN VIEIRA. **Distribuição espacial da cadeia produtiva do petróleo: uma análise da exploração, produção e refino do petróleo no período de 2006 a 2018**. 2021.

GONÇALVES, MARIA JÚLIA LIMA. **Bioprospecção de bactérias aeróbias formadoras de endósporos (bafes) cultivadas em petróleo e óleo diesel**. 2024. 72 f., il. Dissertação (Mestrado em Biologia Microbiana) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

GUZMÁN, E., ORTEGA, F., & RUBIO, R. G. Exploring the world of rhamnolipids: A critical review of their production, interfacial properties, and potential application. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, 69(101780), 101780, 2024.

HERA. Human and environmental risk assessment on ingredients of household cleaning products. **LAS, Linear Alkylbenzene Sulphonate**. 2013.

HOCINE, S., CUENCA, A., MAGNAN, A., TAY, A., & MOREAU, P. An Extensive Study of the Thermal Stability of Anionic Chemical EOR Surfactants - Part 1 Stability in Aqueous Solutions. **International Petroleum Technology Conference**, p. 1–22, 2016. p. D031S040R001.

HOLMBERG, K., JÖNSSON, B., KRONBERG, B., & LINDMAN, B. **Surfactants and polymers in aqueous solution**. 2ª edição. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2003.

HÖÖK, M.; BARDI, U.; FENG, L.; PANG, X.; Development of oil formation theories and their importance for peak oil. **Marine and Petroleum Geology** 2010, 27, 1995.

JAHAN, R., BODRATTI, A. M., TSIANOU, M., & ALEXANDRIDIS, P. Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. **Advances in colloid and interface science**, v. 275, p. 102061, 2020.

JIMOH, A. A., & LIN, J. Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 184(109607), 109607, 2019.

JÚNIOR, CLÁUDIO SG; COELHO, MARIANA S.; SANTOS, JÉSSICA M. **avaliação da influência do tempo de estocagem nos parâmetros de qualidade de carvão vegetal e coque de petróleo**, 2022.

KAMALESH, T.; FEMINA CAROLIN C. Advances in stabilization of metallic nanoparticle with biosurfactants-A review on current trends. **Heliyon**, 2024.

KEE, S. H., GANESON, K., RASHID, N. F. M., YATIM, A. F. M., VIGNESWARI, S., AMIRUL, A.-A. A., RAMAKRISHNA, S., & BHUBALAN, K. A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants. **Fuel** (London, England), 321(124039), 124039, 2022.

KIMURA, R. M. **Indústria brasileira de petróleo: uma análise da cadeia de valor agregado**. 2005. 103 f. Monografia (Bacharelado em Economia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

KUGAJI, M., RAY, S. K., PARVATIKAR, P., & RAGHU, A. V. Biosurfactants: A review of different strategies for economical production, their applications and recent advancements. **Advances in Colloid and Interface Science**, 337(103389), 103389, 2025.

LEITE, NALBER MIRANDA. **Análise computacional da deposição de parafina em oleodutos de águas profundas utilizando técnicas nucleares**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LI, S., JIANG, X., ZHAO, C., REN, Y., & LUO, L. Evaluation of lipopeptides biosurfactant from *Raoultella planticola* for bioremediation in n-hexadecane-contaminated soil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 112622, 2024.

MACHA CA HUANCAPAZA, GINA LUZ BELINDA. **Estudio de las propiedades de los aditivos para mejorar la adhesión agregado-asfalto en mezclas asfálticas en caliente para la Ciudad de Juliaca**. 2023.

MACHADO, JOÃO DURVAL DE OLIVEIRA ALVES; DE CARVALHO, ROGERIO ATEM. Exploração de Petróleo no Brasil e Estados Unidos: história e relevância. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 52499-52515, 2021.

MARIM, R. G., COELHO, G. S., AZEVEDO, P. C. D., BORGES, D. L., MARANHÃO, T. A., OLIVEIRA, F. J. D., ... & CHAVES, E. S. Assessment of chlorine, fluorine, and sulfur concentrations in depth profile of drill cuttings from onshore and offshore oil and gas exploration wells. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 34, n. 3, p. 414-425, 2023.

MARKAM, S. S., RAJ, A., KUMAR, A., & KHAN, M. L. Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and

management of organic waste. **Current Research in Microbial Sciences**, 7(100266), 100266, 2024.

MARQUEZ, R., ORTIZ, M. S., BARRIOS, N., VERA, R. E., PATIÑO-AGUDELO, Á. J., VIVAS, K. A., ... & THEINER, E. Surfactants produced from carbohydrate derivatives: Part 2. A review on the value chain, synthesis, and the potential role of artificial intelligence within the biorefinery concept. **Journal of Surfactants and Detergents**, 2024.

MARTINS, J.C.S.; MOCHEL, F.R.; ZANANDREA, I.; AZEVEDO, J.W.J.; LIMA, L.G.; BEZERRA, D.S.; ABREU, E.G.N.; SILVA, M.S.; LIMA, A.M.S. Effects of automotive diesel oil on germination of *Avicennia germinans* and *Laguncularia racemosa mangrove propagules*. **Acta Amazonica**, v. 53, n. 3, p. 264-270, 2023.

MARTINS, S. S. D. S., SILVA, M. P., AZEVEDO, M. O., & SILVA, V. P. Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações. **Holos**, v. 6, p. 54-76, 2015.

MENEZES, M. D. S., SANTOS, P. O. L., SANTOS, B. L. P., PRADO, A. A. O. S., RUZENE, D. S., & SILVA, D. P. Biossurfactantes a partir de resíduos agroindustriais: perspectivas de aplicações em biorremediação. **Anais do XII SIMPROD**, 2023.

MINGUET, M., SUBIRATS, N., CASTAN, P., & SAKAI, T. Behenamidopropyl dimethylamine: Unique behaviour in solution and in hair care formulations. **International journal of cosmetic science**, v. 32, n. 4, p. 246-257, 2010.

MUÑOZ, S. S., BALBINO, T. R., ALBA, E. M., BARBOSA, F. G., DE PIER, F. T., DE ALMEIDA, A. L. M., ... & DA SILVA, S. S. Surfactants in biorefineries: Role, challenges & perspectives. **Bioresource Technology**, v. 345, p. 126477, 2022.

NAGTODE, V. S., CARDOZA, C., YASIN, H. K. A., MALI, S. N., TAMBE, S. M., ROY, P., ... & PRATAP, A. P. Green surfactants (biosurfactants): a petroleum-free substitute for Sustainability— Comparison, applications, market, and future prospects. **ACS omega**, v. 8, n. 13, p. 11674-11699, 2023.

NETO, AFONSO AVELINO DANTAS; GURGEL, ALEXANDRE. **Refino de petróleo e petroquímica**. Natal: UFRN, 2014.

OECD SIDS. **Linear Alkylbenzene Sulftonate**. France:Paris, p. 19212, 2005.

OKORIE, I. K. M.; OGUNJOBI, A. A. **Characterisation of a unique manganese-containing biosurfactant produced from *Pseudomonas aeruginosa* strain S16, isolated from soil found in a mixed farm, located in Ibadan, Oyo State, Nigeria**. 2024.

OSSAI, I.C., AHMED, A., HASSAN, A. AND HAMID, F. S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 17, p. 100526, 2020.

PALA, M., CASTELEIN, M. G., DEWAELE, C., ROELANTS, S. L., SOETAERT, W. K., & STEVENS, C. V. Tuning the antimicrobial activity of microbial glycolipid biosurfactants

through chemical modification. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, p. 1347185, 2024.

PARANHOS, CEZAR JÚNIO COELHO. **Bioprospecção de fungos filamentosos do cerrado cultivados em petróleo e óleo diesel**. 2024. 77 f., il. Dissertação (Mestrado em Biologia Microbiana) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

PATOWARY, R., RAJBONGSHI, B., DEVI, A., SEN, B., GOSWAMI, M., & SARMA, H. Biosurfactant-enhanced bioremediation of petroleum sludge: Unveiling the potential of *Enterobacter cloacae* AR-IASST (01). **Next Sustainability**, v. 3, p. 100034, 2024.

PEIXOTO, R. S.; VERMELHO, A. B.; ROSADO, A. S. Petroleum-degrading enzymes: bioremediation and new prospects. **Enzyme research**, v. 2011, 2011.

PENA, P.G.L; NORTHCROSS, A.L.; LIMA, M.A.G.; RÊGO, R.C.F Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. **Cadernos de saude publica**, v. 36, p. e00231019, 2020.

PHULPOTO, I. A., BOBO, W., QAZI, M. A., & YU, Z. Lipopeptide Biosurfactants Enhanced Biohydrogen Evolution from Lignocellulose Biomass and Shaped the Microbial Community and Diversity. **International Journal of Energy Research**, v. 2024, n. 1, p. 3084702, 2024.

PRAUCHNER, M. J., BRANDÃO, R. D., DE FREITAS JÚNIOR, A. M., & DA CUNHA OLIVEIRA, S. Combustíveis Derivados do Petróleo: Obtenção, Propriedades e Usos. **Revista Virtual de Química**, v. 15, n. 1, 2023.

PUROHIT, B. K., TEWARI, S., PRASAD, K. S. N. V., TALARI, V. K., PANDEY, N., CHOUDHURY, P., & PANDA, S. S. Marine oil spill clean-up: A review on technologies with recent trends and challenges. **Regional Studies in Marine Science**, 80(103876), 103876, 2024.

PURWASENA, I. A., FITRI, D. K., PUTRI, D. M., ENDRO, H., & ZAKARIA, M. N. Lipopeptide biosurfactant as a potential root canal irrigation agent: Antimicrobial and anti-biofilm evaluation. **Journal of Dentistry**, v. 144, p. 104961, 2024.

PUYOL MCKENNA, P., NAUGHTON, P. J., DOOLEY, J. S., TERNAN, N. G., LEMOINE, P., & BANAT, I. M. Microbial Biosurfactants: Antimicrobial Activity and Potential Biomedical and Therapeutic Exploits. **Pharmaceuticals**, v. 17, n. 1, p. 138, 2024.

QAZI, M. A., WANG, Q., & DAI, Z. Sophorolipids bioproduction in the yeast *Starmerella bombicola*: Current trends and perspectives. **Bioresource Technology**, 346(126593), 126593, 2022.

RAJI, MUDASIRU IO; BELLO, S. A. biosurfactant therapeutic potentials: a review. **fudma journal of sciences**, v. 8, n. 3, p. 43-56, 2024.

ROCHA JUNIOR, R. B.; RUFINO, R. D.; LUNA, J. M.; SANTOS, V. A.; SARUBBO, L. A. Application of a low-cost biosurfactant in heavy metal remediation processes. **Biodegradation**, v. 30, p. 215–233, 2019.

ROMAN-HUBERS, A. T., CORDOVA, A. C., ROHDE, A. M., CHIU, W. A., MCDONALD, T. J., WRIGHT, F. A., ... & RUSYN, I. Characterization of compositional variability in petroleum substances. **Fuel**, v. 317, p. 123547, 2022.

RIYAL, ISHA; SHARMA, HIMANI; DWIVEDI, CHARU. Arising hydrophobic wettable materials for oil spill clean-up: A review. **Groundwater for Sustainable Development**, p. 101274, 2024.

SAKAMOTO, K., LOCHHEAD, R. Y., MAIBACH, H. I., & YAMASHITA, Y (Ed.). **Cosmetic science and technology: theoretical principles and applications**. Elsevier, 2017.

SANKHYAN, S., KUMAR, P., PANDIT, S., KUMAR, S., RANJAN, N., & RAY, S. Biological machinery for the production of biosurfactant and their potential applications. **Microbiological Research**, p. 127765, 2024.

SANTOS, C. V. M.; VIEIRA, I. M. M.; SANTOS, B. L. P.; SOUZA, R. R. DE; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Biosurfactant Production from Pineapple Waste and Application of Experimental Design and Statistical Analysis. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.195, p.386–400, 2023.

SANTOS, P. O. L., MENEZES, M. D. S., SANTOS, B. L. P., PRADO, A. A. O. S., RUZENE, D. S., & SILVA, D. P. Produção de biossurfactantes: análise do rendimento a partir de variáveis produtivas. **Anais do XII SIMPROD**, 2023.

SARUBBO, L. A.; ROCHA JÚNIOR.; R. B.; LUNA, J. M.; RUFINO, R. D.; SANTOS, V. A.; BANAT, I. M. Some aspects of heavy metals contamination remediation and role of biosurfactants. **Chemistry and Ecology**, v. 31, p. 707-723, 2015.

SARUBBO, L. A.; SILVA, M. G. C.; DURVAL, I. J. B.; BEZERRA, K. G. O.; RIBEIRO, B. G.; SILVA, I. A.; BANAT, I. M. Biosurfactants: production, properties, applications, trends, and perspectives. **Biochemical Engineering Journal**, v. 181,108377, 2022.

SCHIAVI, MARCELA TAIANE; HOFFMANN, WANDA APARECIDA MACHADO. Cenário petrolífero: sua evolução, principais produtores e tecnologias. **RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v. 13, n. 2, p. 259-278, 2015.

SEGOVIA-HERNÁNDEZ, J. G., HERNÁNDEZ, S., COSSÍO-VARGAS, E., & SÁNCHEZ-RAMÍREZ, E. Tackling sustainability challenges in Latin America and Caribbean from the chemical engineering perspective: A literature review in the last 25 years. **Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, 188, 483–527, 2022.

SELVA FILHO, A. A. P., CONVERTI, A., SOARES DA SILVA, R. D. C. F., & SARUBBO, L. A. Biosurfactants as multifunctional remediation agents of environmental pollutants generated by the petroleum industry. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1209, 2023.

SHAIKHAH, D., LOISE, V., ANGELICO, R., PORTO, M., CALANDRA, P., ABE, A. A., ... & CAPUTO, P. New Trends in Biosurfactants: From Renewable Origin to Green Enhanced Oil Recovery Applications. **Molecules**, v. 29, n. 2, p. 301, 2024.

SHARMA, NEHA; LAVANIA, MEETA; LAL, BANWARI. Biosurfactant: an emerging tool for the petroleum industries. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1254557, 2023.

SHAW, D. Introduction to Colloid and Surface Chemistry, **Fourth** edi.; ButterworthHeinemann, 2013.

SILVA, M. D. G. C., MEDEIROS, A. O., CONVERTI, A., ALMEIDA, F. C. G., & SARUBBO, L. A. Biosurfactants: promising biomolecules for agricultural applications. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 449, 2024.

SIMÕES, C. R., DA SILVA, M. W. P., DE SOUZA, R. F. M., HACHA, R. R., MERMA, A. G., TOREM, M. L., & SILVAS, F. P. C. Biosurfactants: An Overview of Their Properties, Production, and Application in Mineral Flotation. **Resources**, v. 13, n. 6, p. 81, 2024.

SINGH, RATAN; GLICK, BERNARD R.; RATHORE, DHEERAJ. Biosurfactants as a biological tool to increase micronutrient availability in soil: A review. **Pedosphere**, v. 28, n. 2, p. 170-189, 2018.

SOARES, M. L. G., DA SILVA JUNIOR, C. M. G., CAVALCANTI, V. F., DE ALMEIDA, P. M. M., DE SOUZA MONTEIRO, A., DE OLIVEIRA CHAVES, F., ... & BARBOSA, B. Regeneração de floresta de mangue atingida por óleo na Baía de Guanabara (Rio de Janeiro, Brasil): Resultados de 5 anos de monitoramento. **Geochimica Brasiliensis**, v. 20, n. 1, 2006.

SOARES DA SILVA, R. de C. F.; SARUBBO, L. A., 2021. Production of green surfactants: Market prospects. **Electronic Journal of Biotechnology**. v. 51, p. 28–39, 2021.

SORHIE, V., ALEMTOSHI, GOGOI, B., WALLING, B., ACHARJEE, S. A., & BHARALI, P. Role of micellar nanoreactors in organic chemistry: Green and synthetic surfactant review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, 30(100875), 100875, 2022.

STROHAECKER, TELMO ROBERTO; TARNOWSKI, GABRIEL ALEJANDRO; BETANZOS, JAILSON TORMA. **Equipamento para extração de petróleo e processo de extração de petróleo**. 2004.

THAKUR, V., BAGHMARE, P., VERMA, A., VERMA, J. S., & GEED, S. R. Recent progress in microbial biosurfactants production strategies: Applications, technological bottlenecks, and future outlook. **Bioresource Technology**, 408(131211), 131211, 2024.

THOMPSON, F.; THOMPSON, C. **Biotecnologia Marinha**. 1ª ed., Rio Grande, Ed. FURG, 2020.

VAN BOGAERT, I. N. A.; SOETAERT, W. Sophorolipids. In: SOBERÓN-CHÁVEZ, G. (Org.). **Biosurfactants. Microbiology Monographs**, v. 20, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 179–210.

VARNAVA, C. K., GRENNI, P., MARIANI, L., CARACCIOLO, A. B., HADJIPAKKOU, H., LEFKARITIS, G., ... & TSIPA, A. Characterization, production optimization and

ecotoxicity of a lipopeptide biosurfactant by *Pseudomonas citronellolis* using oily wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 205, p. 109257, 2024.

VÁZQUEZ-VÉLEZ, E., MONZÓN-MENDOZA, J., MARTÍNEZ, H., & CAMPILLO, B. Synthesis of non-ionic, cationic, and anionic surfactant from coconut oil for remediation of diesel contaminated soil. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 21, n. 3, p. IA2776-IA2776, 2022.

VERMA, C., HUSSAIN, C. M., QURAISHI, M. A., & ALFANTAZI, A. Green surfactants for corrosion control: Design, performance and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, 311(102822), 102822, 2023.

VIEIRA, I. M. M., SANTOS, B. L. P., RUZENE, D. S., & SILVA, D. P. An overview of current research and developments in biosurfactants. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 100, 1–18, 2021.

VUČUROVIĆ, D., BAJIĆ, B., TRIVUNOVIĆ, Z., DODIĆ, J., ZELJKO, M., JEVTIĆ-MUČIBABIĆ, R., & DODIĆ, S. Biotechnological Utilization of Agro-Industrial Residues and By-Products-Sustainable Production of Biosurfactants. **Foods**, v. 13, n. 5, p. 711, 2024.

YANG, J. Hair Care Cosmetics. **Cosmetic science and technology**: Theoretical principles and applications. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 2017, pp. 601-615.

ZACHARIAS, D. C., LEMOS, A. T., KERAMEA, P., DANTAS, R. C., DA ROCHA, R. P., CRESPO, N. M., SYLAIOS, G., JOVANE, L., DA SILVA SANTOS, I. G., MONTONE, R. C., DE OLIVEIRA SOARES, M., & LOURENÇO, R. A. Offshore oil spills in Brazil: An extensive review and further development. **Marine Pollution Bulletin**, 205(116663), 116663, 2024.

CAPÍTULO II

ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NO PERIÓDICO **Journal of
Biotechnology - Qualis A3**

**Biossurfactante ecológico: combate à poluição por óleo em ecossistemas terrestres e
aquáticos**

Kaio Wêdann de Oliveira¹, Alexandre Augusto P. Selva Filho^{1,3}, Yslla Emanuely Faccioli^{1,3}, Gleice Paula de
Araújo^{1,2,3}, Rita de Cássia F. Soares da Silva², Leonie A. Sarubbo^{1,2,3*}

¹Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, Zip Code: 50050-900, Recife –
Pernambuco, Brazil;

²Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Rua Potyra, n. 31, Prado, Zip Code: 50751-310, Recife –
Pernambuco, Brazil;

³Universidade Federal Rural Pernambuco (UFRPE) - Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), Rua Dom
Manuel de Medeiros, s/n - Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, Pernambuco, Brazil.

Corresponding author: leonie.sarubbo@unicap.br Tel.: +55 81 21194084.

Resumo

Os derramamentos de combustíveis e óleos lubrificantes nas indústrias, causados por abastecimentos de máquinas, armazenamento inadequado e lavagem de equipamentos, são fontes significativas de contaminação ambiental, impactando o solo e corpos hídricos. Tais incidentes alteram as propriedades microbiológicas, químicas e físicas dos ambientes afetados. Nesse contexto, o uso de biossurfactantes naturais surge como uma alternativa eficaz para a limpeza de tanques de armazenamento e a remediação de solos e efluentes contaminados. O objetivo deste estudo foi avaliar a produção e aplicação de um biossurfactante pela levedura *Starmerella bombicola* ATCC 22214 na descontaminação de ambientes marinhos e terrestres contaminados por óleo. A produção do biossurfactante foi otimizada em termos de fontes de carbono/nitrogênio e condições de cultivo, utilizando frascos. O desempenho do biossurfactante foi testado em solos argilosos, siltosos e areia padrão, bem como em superfícies lisas e efluentes industriais contaminados com óleos (OCB1, diesel e óleo de motor). O meio de cultivo ideal para a produção do biossurfactante incluiu 2% de glicose e 5% de glicerol, com agitação de 200 rpm, fermentação por 180 horas e inóculo de 5%, resultando em um rendimento de 1,5 g/L. O biossurfactante demonstrou altos índices de emulsificação (86,6% para óleo de motor e 51,7% para diesel), e boa estabilidade sob diferentes condições de pH, temperatura e concentração de NaCl. A Concentração Micelar Crítica (CMC) foi de 0,4 g/L, nessa concentração a tensão superficial chegou ao valor de 26,85 mN/m. Nos testes de remediação, o biossurfactante permitiu a remoção de até 99% do óleo de motor de diferentes tipos de solo. Os resultados indicam que o biossurfactante produzido é um agente promissor para a remediação de ambientes contaminados por petroderivados, especialmente em setores industriais e no tratamento de efluentes.

Palavras-chave: biossurfactantes; *Starmerella bombicola*; petróleo; biorremediação; remoção de petroderivados.

1. INTRODUÇÃO

O petróleo, também conhecido como óleo bruto, é uma matéria-prima vital na indústria química, desempenhando um papel significativo no desenvolvimento econômico global (Aryan; Kraft, 2021; Griffiths *et al.*, 2022). No entanto, derramamentos de óleo devido à exploração e transporte acontecem com frequência em todo o mundo (Shaikhah *et al.*, 2024). Como consequência, grandes quantidades de óleo já foram lançadas em

solo e ao mar em derrames de petróleo, deixando efeitos devastadores sobre o ambiente, os quais são ainda maiores em virtude do potencial tóxico dos dispersantes químicos comumente utilizados na remediação desses derramamentos (Purohit *et. al.*, 2024; Zacarias *et.al.*, 2024; Silva *et al.*, 2022).

Nesse contexto, as preocupações ambientais relacionadas com a queima de combustíveis fósseis, especialmente gasolina e carvão, também levou a uma maior consciência social que motivou a busca por processos sustentáveis (Duarah *et. al.*, 2022). Vários países passaram a adotar medidas específicas para seguir o conceito de desenvolvimento sustentável, visando minimizar a crise climática e ambiental que coloca todo o planeta em perigo (Segovia-Hernández *et. al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024b).

Os dispersantes químicos utilizados nos processos de tratamentos de áreas contaminadas com derivados de petróleo são constituídos principalmente por surfactantes como ingredientes ativos. Os surfactantes, por serem moléculas anfífilas, são caracterizadas por sua capacidade de reduzir a tensão interfacial entre fluidos imiscíveis, como óleo e água, proporcionando detergência, dispersão e emulsificação, atividades essenciais à remediação de hidrocarbonetos (Kugaji *et. al.*, 2025; Markam *et. al.*, 2024; Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

Os surfactantes sintéticos à base de petróleo, entretanto, são obtidos a partir de recursos não renováveis, como petróleo bruto (por exemplo, óleo parafínico e aromáticos) e gás natural (por exemplo, propileno e etileno) (Sorhie *et. al.*, 2022). Esses surfactantes dominam o mercado comercial de surfactantes na maioria dos países industrializados, representando aproximadamente 90% da participação de mercado devido à alta produtividade e baixo custo (Al-Sakkaf *et. al.*, 2024; Nandwani *et. al.*, 2024; Dini *et al.*, 2024).

No entanto, os problemas atuais relacionados com saúde, poluição, mudanças climáticas e esgotamento das reservas de recursos fósseis de combustível exigem soluções para suplantiar o uso massivo desses surfactantes convencionais. Neste contexto, os surfactantes verdes, designados como biossurfactantes e surfactantes de base biológica (*biobased surfactants*) surgem como candidatos promissores devido às suas propriedades únicas e diferentes aplicações (Guzmán; Ortega; Rubio, 2024; Kee *et. al.*, 2022; Guzmán; Ortega; Rubio, 2023).

Os biossurfactantes possuem aplicações em uma série de processos industriais, como nos setores de higiene, de alimentos, agrícola, ambiental, petroquímico e de cosméticos (Thakur *et. al.*, 2024; Menezes *et al.*, 2023). Por apresentarem uma gama mais ampla de composições químicas, os biossurfactantes apresentam melhor diversidade estrutural quando comparados aos surfactantes sintéticos (Abbot *et. al.*, 2022; Vieira *et. al.*, 2021; Vučurović *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes são menos tóxicos, mais biodegradáveis e mais estáveis sob condições ambientais adversas em comparação com surfactantes químicos (Verma *et. al.*, 2023). Propriedades como detergência, emulsificação, dispersão e solubilização atribuem grande versatilidade a essas biomoléculas, tornando-as uma alternativa comercial promissora (Jimoh; Lin, 2019; Marinho; Silva; Luna, 2022).

Os biossurfactantes incluem uma grande variedade de estruturas químicas tais como glicolipídeos, lipopeptídeos, complexos proteínas-polissacarídeos, fosfolipídeos, ácidos graxos e lipídeos neutros, produzidos por micro-organismos quando cultivados em substratos insolúveis (óleos, resíduos e hidrocarbonetos) e/ou solúveis (carboidratos) (Sarubbo *et al.*, 2022).

As leveduras do gênero *Starmerella* têm sido muito estudadas quanto ao seu potencial de produção de glicolipídeos, especialmente a *Starmerella bombicola*, conhecida pela produção de soforolipídios,

biossurfactantes formados por um dissacarídeo de glicose e uma cadeia de ácidos graxos com 16 ou 18 átomos de carbono (Sarubbo *et al.*, 2022; Qazi; Wang; Dai, 2022; Santos *et al.*, 2023; Eras-Muñoz *et al.*, 2024).

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo produzir um biossurfactante a partir de *Starmerella bombicola* ATCC 22214 para aplicação na descontaminação de ambientes marinhos e terrestres contaminados por óleo. O biossurfactante foi utilizado para avaliar sua capacidade de aplicação com agente desestabilizador de hidrocarbonetos complexos em superfícies, solos e efluente oleoso industrial como uma solução sustentável, atóxica e de baixo custo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Todos os reagentes utilizados foram de grau analítico para constituição do meio mineral. Visando a obtenção do bioproduto, foram utilizados como fonte carbono, substratos solúveis como, glicose e sacarose. Glicerol, melaço de cana-de-açúcar (cedido por uma usina de açúcar localizada na cidade de Vitória de Santo Antão-PE, Brasil) e como substratos insolúveis o N-hexadecano e o óleo de soja residual de fritura, obtido em estabelecimentos locais em Recife-PE, Brasil. As fontes de nitrogênio utilizadas foram o extrato de levedura e milhocina (subproduto da produção de milho), cedida pela Corn products S.A. do Brasil, Cabo de Santo Agostinho-PE.

O óleo de motor coletado da exaustão, conhecido como um resíduo do uso prolongado no sistema de exaustão, contendo resíduos de combustão, partículas metálicas e outros contaminantes gerados pelo funcionamento do motor, foi utilizado como poluente hidrofóbico. Óleo pesado obtido de uma usina termoeletrica e classificado como óleo combustível B1 especial OCB1 (PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil) também foi utilizado. Este óleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos. Sua viscosidade cinemática a 60 °C é 620 Cst, seu ponto de fulgor 66 °C e sua densidade a 20 °C 0,968 g/mL.

O efluente oleoso foi obtido da ULTRACARGO, uma empresa na área de armazenagem e distribuição de combustíveis e produtos químicos, localizada no Porto de Suape, estado de Pernambuco, Brasil. O efluente possui um elevado teor de petroderivados, constituído por uma mistura de resíduos de Biodiesel - B100, Óleo Diesel – S10, Gasolina, Álcool Etílico Anidro e Hidratado e Óleo pesado - OCB1, resultante das atividades rotineiras da empresa.

2.2. Micro-organismo e preparação do inóculo

A levedura *Starmerella bombicola* ATCC 22214 foi obtida da American Type Culture Collection (ATCC®) e utilizada como produtora do biossurfactante. Inicialmente, as células do micro-organismo foram ativadas ao transferi-las para tubos com meio Yeast Mold Ágar (YMA) esterilizado contendo 0,3% de extrato de levedura, 1% de D-glicose, 0,5% de peptona, 2% de ágar e 100 mL de água destilada, em pH 7. A cultura cresceu durante 24 horas a 28°C, 150 rpm e pH 7.0 em 50 mL de meio Yeast Mold Broth (YMB) autoclavado contido em frascos. Depois foram realizadas diluições do meio até a obtenção de uma concentração de 10⁶ células/mL. O meio YMB tem a mesma composição do YMA, mas sem ágar. A contagem de células foi realizada através da câmara de Neubauer. As autoclavagens foram realizadas a 121°C durante 20 minutos.

2.3. Influência de substratos e condições de cultivo na produção do biossurfactante

A levedura foi cultivada em meio mineral contendo a seguinte composição (g/L): KH_2PO_4 : 0,5 g/L, NaNO_3 : 3 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$: 0,05 g/L, FeCl_3 : 0,05 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,4 g/L e 0,05g/L de extrato de levedura. Combinações de fontes de carbono e nitrogênio foram adicionadas a este meio e condições de cultivo para seleção do melhor meio de produção para a levedura, conforme a Tabela 1. Após o preparo dos meios, o pH foi ajustado para $6,0 \pm 0,2$ com auxílio de uma solução 5.0 M de NaOH e estes foram autoclavados a 121°C por 20 minutos. As fermentações para a produção do biossurfactante foram realizadas em frascos de Erlenmeyer de 250 mL contendo 100 mL do meio, no qual foi incubado 5,0% do pré-inóculo. Ao fim do cultivo, amostras foram retiradas para determinação da tensão superficial e do rendimento em biossurfactante isolado.

2.4. Determinação da tensão superficial e da Concentração Micelar Crítica

A tensão superficial e a Concentração Micelar Crítica (CMC) do biossurfactante foi medida em tensiômetro automático (KSV Sigma 700, Finland) através do método do anel de Du Noüy. A grandeza foi medida através da imersão do anel de platina no líquido metabólico, registrando-se a força requerida para puxá-lo através da interface ar-líquido.

2.5. Determinação da atividade de emulsificação

Para a determinação da atividade de emulsificação, amostras do líquido metabólico livre de células foram analisadas segundo a metodologia descrita por Cooper e Goldenberg (1987), onde 2,0 mL de substratos hidrofóbicos (óleo de motor, diesel, querosene, hexano e óleos vegetais). Foram adicionados a 2,0 mL do líquido metabólico livre de células (biossurfactante bruto) em tubo graduado e a mistura agitada em vórtex por 2 minutos. A estabilidade da emulsão foi determinada após 24 horas e o índice de emulsificação foi calculado dividindo-se a altura da emulsão pela altura total da mistura e multiplicando-se por 100 para fornecer o percentual da emulsão formada no tubo. A taxa de emulsificação foi calculada pela Equação 1:

$$\text{Índice de Emulsificação (\%)} = \frac{\text{Altura da emulsão}}{\text{Altura total do tubo}} \times 10 \quad (1)$$

2.6. Avaliação da estabilidade do biossurfactante

Os efeitos diferentes de temperaturas (5, 70, 100 e 120°C), de diferentes concentrações de NaCl (2,0, 4,0, 6,0, 8,0 e 10,0%) e de diferentes valores de pHs (2,0, 4,0, 6,0, 8,0 e 10,0 e 12,0) e de diferentes tempos de aquecimento a 90°C (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 120 minutos) na atividade do biossurfactantes foram avaliados no líquido metabólico livre de células para determinação da tensão superficial e do índice de emulsificação utilizando óleo de motor como substrato hidrofóbico (Cooper; Goldenberg, 1987).

2.7. Extração e isolamento do biossurfactante

O biossurfactante foi isolado seguindo o método descrito por Farias et al. (2021). O rendimento do biossurfactante isolado foi determinado por gravimetria, de acordo com o volume de amostra do meio de fermentação utilizado, permitindo uma avaliação precisa da eficiência do processo.

2.8. Composição química do biossurfactante

A concentração de proteína do biossurfactante isolado foi determinada através do Kit Labtest. Os carboidratos foram determinados pelo método ácido fenol-sulfúrico, usando D-glicose como padrão (DUBOIS *et al.*, 1956). Os lipídios foram quantificados de acordo com Manocha *et al.*, 1980.

2.9. Análise de ecotoxicidade

A toxicidade do biossurfactante foi determinada para indicadores terrestres e aquático. Sementes de repolho (*Brassica oleracea*) e de tomate (*Solanum lycopersicum*) foram usadas, conforme descrito por Tiquia, Tam e Hodgkiss (1996). Larvas do micro crustáceo *Artemia salina* também foram transferidas para 10 mL de água do mar contida em frascos de penicilina de 15 mL com concentrações de 1% e 2% de biossurfactante diluído em água destilada e na metade da CMC, na CMC e no dobro da CMC, de acordo com Silva *et al.* (2010).

2.10. Dispersão de composto hidrofóbico em água do mar

A capacidade de dispersão ou agregação de manchas de derivado de petróleo foi simulada em laboratório contaminando-se amostras de água do mar com óleo de motor. Os testes foram conduzidos pela adição do biossurfactante bruto ao óleo de motor (1:2, 1:8 e 1:25 vol/vol). Os resultados foram medidos visualmente (Saeki *et al.*, 2009).

2.11. Remoção de derivado de petróleo adsorvido em areia e em solos pelo biossurfactante através de ensaio cinético

Colunas empacotadas de vidro (55 x 6 cm) foram inicialmente preenchidas com 200g de solo e areia padrão contaminado com 10% do contaminante hidrofóbico. Em seguida, à superfície foi inundada por 200 ml das soluções do biossurfactante isolado em diferentes concentrações correspondente a metade da CMC (1/2 CMC), à CMC e no dobro da CMC (2xCMC). As percolações foram monitoradas ao longo de 24 horas. As amostras de solo foram retiradas para a estimativa de óleo de motor por análise de gravimetria. O óleo de motor residual foi extraído num Becker previamente pesado com hexano em funil de decantação. A extração foi repetida duas vezes pra assegurar uma recuperação completa do óleo. Em seguida o hexano foi evaporado e óleo retirado da areia pesado (Rufino et al. 2013).

O percentual de remoção foi calculado usando a equação: óleo de motor removido (%) = [(o inicial – o remanescente) / o inicial] x 100, onde o inicial é o óleo na areia contaminada e o remanescente é o óleo que permanece na areia (g) após a lavagem (Rufino et al. 2013).

2.12. Remoção de derivado de petróleo adsorvido em areia e em solos pelo biossurfactante através de ensaio estático

A remoção do óleo de motor queimado no solo contaminado foi testada através da saturação de 50g de solo com 10% do óleo de motor queimado. O solo previamente contaminado em laboratório foi colocado em frascos de Erlenmeyer de 250 ml de capacidade, adicionado de 50 ml de água destiladas ao frasco controle e 50 ml das soluções do biossurfactante nas concentrações (CMC, $\frac{1}{2}$ CMC e $2 \times$ CMC). Os frascos foram agitados a 150 rpm, 28°C, durante 24 horas. Após esse período todo o conteúdo foi centrifugado a 4700 rpm durante 20 minutos. O óleo residual foi determinado por gravimetria (Luna, et al., 2011).

2.13. Limpeza de superfície oleosa

A capacidade de limpeza do biossurfactante foi investigada revestindo-se as paredes internas de recipientes tipo Béquer com óleo de motor residual e com óleo pesado OCB1. Para remover o óleo aderido, 50,0 mL de solução de lavagem contendo a solução aquosa do biossurfactante em diferentes concentrações (metade da CMC, CMC, dobro da CMC e $5 \times$ CMC) foi adicionado em cada *becker*, sendo os mesmos agitados por 1,0 min e deixado em repouso por 6h (Pruthi; Cameotra, 2000).

2.14. Desestabilização de óleo OCB1 e óleo diesel em superfície lisa

O biossurfactante isolado foi aplicado diluído em diferentes concentrações (metade da CMC, CMC, dobro da CMC e $5 \times$ CMC), com o objetivo de avaliar a capacidade de desestabilização de óleo de motor e óleo diesel impregnados em superfície lisa em relação ao tempo de atuação. Placas de Petri, com 12 cm de diâmetro foram previamente pesadas para conhecimento do seu peso inicial, em seguida suas superfícies foram homogeneamente impregnadas com os petroderivados. As placas com óleo OCB1 foram deixadas em repouso por dois dias consecutivos para garantir a impregnação. Para o uso de petroderivados mais fluídos (Diesel), foi necessário utilizar um corante hidrofóbico (vermelho escarlate) como indicador para facilitar a visualização da remoção do óleo. Para esses tipos de óleo, as placas foram submetidas a aquecimento em estufa a 100°C por 48 horas, para volatilização das frações mais leves do hidrocarboneto e maior fixação do óleo nas placas. Posteriormente as placas impregnadas com os petroderivados foram novamente pesadas para determinar a quantidade do óleo. Porções estabelecidas das soluções teste (15 e 20 mL) foram adicionadas na camada do óleo impregnado nas placas, espalhadas sem atuação manual e dispostas para determinação dos tempos de atuação para (30 e 60 minutos). Após a desestabilização do óleo, de acordo com os volumes e os tempos estabelecidos, as placas foram lavadas em água destilada sem pressão, removendo qualquer excesso da solução teste e do petroderivados desestabilizados. Estas, então, foram secas em estufa a 50 °C por 30 minutos e após retornarem a temperatura ambiente tiveram seu peso anotado. A remoção foi acompanhada por registro fotográfico após cada ensaio realizado e o índice de remoção foi calculado pela fórmula a seguir:

$$I = 100 \times [(Mc-ML)] / [(Mc-Mi)] \quad (2)$$

Onde Mc representa o peso da placa contaminada, ML o peso da placa pós-lavagem e Mi o peso inicial da placa.

2.15. Aplicação do biossurfactante no tratamento de efluente oleoso industrial

O efluente oleoso, obtido da empresa ULTRACARGO, especializada em armazenagem e distribuição de combustíveis, foi utilizado para avaliar a eficiência do biossurfactante em estudo na remoção de petroderivados de um efluente oleoso real. Garrafas cilíndricas abertas de 1 L (diâmetro: 10 cm) com uma válvula de saída no fundo para amostragem foram usadas no experimento de remoção. Amostras de 200 mL de efluente oleoso foram adicionadas aos frascos. O biossurfactante bruto na proporção biossurfactante-efluente de 1:1 (v/v) e 1:2 (v/v), respectivamente, e o biossurfactante isolado foram adicionados na metade da CMC, na CMC e no dobro da CMC, na proporção 1:1 (v/v) de biossurfactante para efluente. As garrafas foram colocadas em uma mesa agitadora orbital a 28°C para induzir um movimento giratório no conteúdo das garrafas. A velocidade de agitação foi de 150 rpm por um período de 10 minutos, seguido de 1 a 2 minutos de tempo de estabilização do sistema. As amostras foram coletadas pouco depois. Os primeiros 2 mL da amostra foram retirados através da válvula e descartados e 50 mL da amostra foram coletados para análise (Sobrinho *et al.* 2013; Soares da Silva *et al.*, 2019). A amostra foi extraída três vezes com hexano. A eficiência da remoção da fração de óleo foi calculada de acordo com a Eq. (3), com base na absorbância medida nas amostras (determinada pela análise do extrato hexânico) em comparação ao controle (sem tratamento com o biossurfactante):

$$\delta = \frac{C_B - C_A}{C_B} \cdot 100\% \quad (3)$$

Onde δ é o percentual de eficiência de remoção da fração de óleo do efluente, enquanto C_B e C_A são as concentrações de óleo antes e após o tratamento com biossurfactante, respectivamente. O comprimento de onda utilizado foi de 320 nm. As amostras foram analisadas em triplicata.

2.16. Análises estatísticas dos dados obtidos

Os dados colhidos foram expressos como a média $\pm$ desvio padrão dos testes realizados em triplicata. A análise estatística de variância de ANOVA foi aplicada para determinar a significância, onde valores de $p < 0,05$ foram considerados significativos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Meio de produção do biossurfactante

A seleção dos parâmetros de fermentação mais favoráveis foi baseada na determinação da tensão superficial. Embora o estudo de viabilidade técnico-econômica ainda não tenha sido realizado neste trabalho, essa perspectiva precisa ser considerada para futuras etapas da pesquisa, especialmente visando a produção em larga escala e a otimização do rendimento com a redução de etapas posteriores. Para tanto, foram utilizados meios de cultivo formulados com substratos não residuais e outros constituídos com resíduos industriais, avaliando a produção do tensoativo microbiano com foco em seu potencial de viabilidade prática e econômica para o futuro.

Os resultados obtidos para as fermentações em diferentes meios e condições de cultivo estão apresentados na Figura 01, que expressa os valores das leituras de tensões superficiais. Associações de substratos foram adicionadas ao meio mineral, a fim de incluir uma fonte de carbono solúvel e uma insolúvel, totalizando seis meios de cultivo diferentes. Além disso, as condições de pH, agitação e temperatura foram mantidas constantes, enquanto o tempo de cultivo foi variado entre 96, 120 e 144 horas.

O meio mineral formulado com glicerol e glicose como fontes de carbono destacou-se como o mais eficiente entre todos os meios testados em todos os tempos de cultivo avaliados. O desempenho mais promissor foi obtido com a utilização de 5% de glicose e 2% de glicerol ao longo de 144 horas de fermentação, resultando em uma redução significativa da tensão superficial para 27,24 mN/m.

Os meios contendo resíduos industriais demonstraram resultados distintos, principalmente para as condições contendo óleo residual de fritura, as quais demonstraram maior redução da tensão superficial. Esse efeito foi mais evidente no meio composto por melaço e milho-cina. Além disso, a variação do tempo de cultivo influenciou significativamente as fermentações, com uma redução mais acentuada da tensão superficial à medida que o tempo de cultivo aumentava.

Além disso, a utilização de substratos mais solúveis e isentos de particulados sólidos favorece a economia do processo, reduzindo os custos associados aos insumos e reagentes nas etapas de *downstream*. Essa abordagem também contribui para a manutenção de um padrão consistente no processo produtivo, o que, por sua vez, aumenta a competitividade de mercado dos biossurfactantes (Thavasi; Banat, 2019).

É importante ressaltar que o glicerol, co-produto originado do processo de transesterificação dos óleos vegetais e animais na produção de biodiesel, surge como uma alternativa de grande interesse, uma vez que a quantidade anual gerada em todo mundo vem aumentando em função da demanda crescente de biodiesel e de outros derivados (Monteiro *et al.*, 2018).

A literatura oferece diversos estudos sobre a seleção de substratos na produção biossurfactantes microbianos, com propriedades semelhantes às obtidas nesta pesquisa. No estudo realizado por Farias *et al.* (2021), biossurfactantes obtidos de bactérias do gênero *Pseudomonas* foram avaliados em diferentes meios de cultura utilizando os mesmos substratos aplicados nesse estudo. O resultado mais promissor foi obtido para o meio composto por 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose por 96 h a 28°C, atingindo excelentes valores de tensão superficial, em torno de 25,00 a 29,00 mN/m.

Em um estudo realizado com a levedura *Starmerella bombicola* ATCC 22214, Selva Filho *et al.* (2023) identificaram a farinha de casca de batata inglesa, na concentração de 2,0% e o óleo de fritura de canola na concentração de 5,0% como as fontes de carbono solúvel e insolúvel mais promissoras. A combinação dessas fontes levou a uma tensão superficial de 29,60 mN/m, além de serem matérias-primas facilmente acessíveis e economicamente viáveis. Costa *et al.* (2021) utilizaram a cepa *Starmerella bombicola* ATCC 22214 para produzir soforolipídios a partir de azeite de dendê (75 g/L) e glicose (150 g/L), obtendo uma produção de 7,6 g/L. Jadhav *et al.* (2019) utilizaram *Starmerella bombicola* MTCC191 para produção de biossurfactantes, cuja fonte de carbono adotada pelos autores foi uma combinação de glicose (10%, p/v) com (10%, p/v) e de óleo girassol, apresentando um rendimento de $10,2 \pm 0,25$ g/L.

3.2. Tensão superficial

Uma das propriedades mais importantes para determinar a eficácia de um surfactante é a redução da tensão superficial. A tensão superficial de surfactantes químicos varia muito. Alguns exemplos incluem Triton X com a tensão de 33,0 mN/m, o dodecil sulfato de sódio — SDS com um valor de tensão de 40,5 mN/m, o octil sulfato de sódio — SOS com 40,7 mN/m de tensão, entre outros. Biossurfactantes que reduzem a tensão superficial da água de 72 para 35 mN/m são considerados eficazes (Silva *et al.*, 2014).

A tensão superficial do biossurfactante bruto produzido pela levedura *Starmerella Bombicola* ATCC 222214, cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose, apresentou o valor de 27,24 mN/m, sendo este valor muito promissor em termos de atividade tensoativa. Shaji *et al.* (2024), afirma em sua pesquisa que biossurfactantes podem chegar a reduzir a tensão superficial da água de 72 até 27 mN/m, confirmando a eficiência do biossurfactante estudado.

. O fungo *Curvularia lunata*- UFPEDA885 apresentou uma tensão superficial de 32,9 mN/m (Maciel *et al.* 2024). Yuan *et al.* (2025), avaliaram o *Chitinophaga eiseniae* 4H na produção de biossurfactante e obtiveram uma redução de tensão superficial da água para 32,35 mN/m. O biossurfactante de *Saccharomyces cerevisiae* URM 6670 cultivada em meio contendo óleo de soja residual e milhocina foi capaz de reduzir a tensão superficial do meio para 26 mN/m (Ribeiro *et al.*, 2023). A *Candia mogii* UFPEDA 3968 também foi utilizada para a produção de biossurfactante em meio contendo óleo de licuri e glicose. O biossurfactante produzido reduziu a tensão superficial de 71.04 mN/m para 28,66 mN/m (Silva *et al.*, 2024c). Os dados apresentados evidenciam o potencial do biossurfactante produzido pela *Starmerella Bombicola* ATCC 222214 na redução de tensão superficial.

3.3. Atividade de emulsificação

O índice de emulsificação (E24) é um método rápido para avaliar a capacidade de emulsificação de biossurfactantes, que formam emulsões estáveis de óleo em água (O/A) ou de água em óleo (A/O). A atividade emulsificante pode variar dependendo da massa molecular do biossurfactante, sendo que aqueles com maior massa molecular tendem a ter melhor desempenho, enquanto os de menor massa molecular pode apresentar atividade reduzida (Poomalai *et al.*, 2024). A Figura 02 mostra o percentual de emulsificação do biossurfactante para os substratos hidrofóbicos (óleo de motor, diesel, querosene, hexano e óleo soja).

De acordo com a Figura 02, o biossurfactante apresentou percentuais expressivos de emulsificação em relação aos substratos hidrofóbicos, com uma média superior a 50%, exceto no caso do hexano, que apresentou um valor de 29,4%. Por outro lado, para o óleo de motor, o biossurfactante demonstrou uma interação muito satisfatória, atingindo um percentual de $86,6 \pm 0,5\%$ de emulsificação, evidenciando maior afinidade com hidrocarbonetos mais complexos. Esses resultados indicam que o biossurfactante produzido possui boas propriedades emulsificantes, pois, conforme Ferreira *et al.* (2020), valores superiores a 50% de emulsificação são considerados indicativos de eficácia na formação de emulsões.

De acordo com a literatura, Jaysree *et al.* (2021) e Hassanshahihan (2014) também observaram uma faixa quase similar de valores de E24 (15-54% e 10-65%, respectivamente) para os microrganismos produtores de biossurfactantes, isolados de locais contaminados com óleo de motor e óleo diesel. Em um estudo realizado por

Barakat *et al.* (2017), os maiores valores de E24 em óleo Diesel, foi de 56% e 57%, foram relatados para duas cepas diferentes de *Bacillus* 41.

Em termos de comparação, a porcentagem de emulsificação do composto hidrofóbico querosene (52,1%) foi superior ao apresentado por Da Silva *et al.* (2024), que relata em seu estudo com a otimização e produção de biossurfactante pela levedura *Candida moggi*, um percentual de 3.28%.

3.4. Estabilidade do biossurfactante relacionada à manutenção da tensão superficial

A aplicação de biossurfactantes em vários campos depende de sua estabilidade sob diferentes condições de temperatura, pH, resistência ao calor por determinado tempo e concentração de sal. A maioria dos biossurfactantes é considerada promissora devido à sua resistência aprimorada a condições adversas encontradas no processamento de alimentos e na biorremediação (Dini *et al.*, 2024).

A Figura 3 ilustra a variação da tensão superficial do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 submetido a diferentes tempos de aquecimento à 90 °C, diferentes pH, diferentes temperaturas e diferentes de concentrações de NaCl.

Na Figura 3a é possível observar que ao ser submetido a uma temperatura de 90 °C em diferentes intervalos de tempo (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 120 minutos), o biossurfactante apresentou uma pequena variação de tensão superficial, entre valores de 26,89 a 27,55 mN/m.

A avaliação do biossurfactante em estudo, quando submetido a diferentes pHs (2, 4, 6, 8, 10 e 12) demonstrou um pequeno aumento da tensão superficial em meio ácido, atingindo o valor de 32,30 mN/m em pH 4 e variando a tensão superficial entre os valores de 27,45 mN/m a 28,63 mN/m, em meio alcalino (Figura 3b). Souza *et al.* (2018), avaliaram a estabilidade do surfactante produzido pela levedura *Wickerhamomyces anomalus* nos mesmos valores de pH, e relataram uma maior faixa de variação da tensão superficial (30,5-34,7 mN/m). Esses resultados demonstram que o biossurfactante *S. bombicola* ATCC 222214 foi eficaz, dentro da faixa de pH testada.

Os resultados obtidos nos testes referentes ao biossurfactante em diferentes temperaturas mostraram resultados satisfatórios, podendo ser observado que, com o aumento da temperatura, os valores de tensão superficial tendem a subir proporcionalmente (Figura 3c). Purwase *et al.* (2024) relataram, em seu estudo com o biossurfactante por *Pseudoxanthomonas taiwanensis*, que a termoestabilidade do biossurfactante avaliada submetendo-se o sobrenadante a altas temperaturas (120 °C), que o desempenho da biomolécula diminuiu apenas ligeiramente, corroborando os resultados obtidos nesse trabalho.

Ao ser submetido ao aumento da salinidade, o biossurfactante se mostrou eficiente, reduzindo a tensão superficial ao valor de 25,82 mN/m com 10% de NaCl, como ilustra a Figura 3d.

3.5. Concentração Micelar Crítica (CMC) do biossurfactante

Surfactantes com uma baixa CMC são vantajosos para uso aplicado, em comparação com aqueles com valores de CMC mais altos (Sarubbo *et al.*, 2022).

O biossurfactante produzido pela *Starmerella bombicola* ATCC 222214 após o seu isolamento reduziu a tensão superficial da água de 72 mN/m para 26,85 mN/m, com o aumento de sua concentração estabelecendo sua CMC em 0,4 g/L, como representado na Figura 04. Em contrapartida, o biossurfactante isolado apresentou um

rendimento de 1,5 g/L. Embora o rendimento obtido tenha sido inferior aos descritos na literatura para a maioria dos surfactantes produzidos pela levedura *Starmerella bombicola*, muitos surfactantes bacterianos e de leveduras apresentam rendimentos similares, como descrito por Gaur *et al.* (2019), para a *C. albicans* e a *C. glabrata* cultivadas em meios compostos por glicose e uma base nitrogenada de levedura em água destilada, que apresentaram rendimento de 1,320 g/L e 1,6 g/L, respectivamente. Em um estudo referente à produção de um biossurfactante por *Pseudomonas mosselii*, Xia *et al.* (2023), obtiveram o valor de 0,93 g/L determinado em sua CMC e redução da tensão superficial de 73,20 mN/m para 30,61 mN/m. Já Sharma e Pendey, (2020), determinaram, em outro estudo com *Bacillus Subtilis*, uma CMC de 0,5 g/L e um rendimento de 3,5 g/L em biossurfactante isolado. Silva *et al.* (2024a), obtiveram uma variação na CMC entre 7 e 16 mg/mL para o biossurfactante da levedura *Pichia pseudolambica*, conseguindo reduzir a tensão superficial de 70,82 mN/m para 36,47 mN/m.

3.6. Análise de ecotoxicidade com sementes

A toxicidade refere-se ao impacto negativo de uma substância sobre organismos vivos, sendo que o grau de toxicidade depende da concentração e das propriedades da substância, além do tempo de exposição (Werrie *et al.*, 2020).

Sementes de repolhos (*Brassica oleracea*) e de tomate (*Solanum lycopersicum*) foram submetidas a diferentes concentrações do biossurfactante (1/2 CMC, CMC e 2 × CMC), para assim verificar o índice das suas germinações. A Tabela 02 mostra os resultados obtidos no experimento.

O índice de germinação, que combina medidas de germinação relativa de sementes e crescimento relativo de raízes, foi usado para avaliar a toxicidade do biossurfactante para as sementes de *Brassica oleracea* e *Solanum lycopersicum*. Os resultados revelaram que as soluções testadas não tiveram efeito inibitório considerável na germinação de sementes ou no crescimento de raízes, indicando a baixa toxicidade do biossurfactante. No entanto, tanto nas sementes de *Brassica oleracea*, como nas de *Solanum lycopersicum*, o aumento da concentração do biossurfactante provocou uma discreta diminuição no percentual da germinação.

Umar *et al.* (2021) afirmam, em seu estudo na otimização na produção de biossurfactante por *Bacillus subtilis* SNW3, que uma maior porcentagem de germinação foi observada para as sementes de *Solanum lycopersicum* na concentração de 0,7g / 100 mL, com porcentagem de germinação de 68,75% em comparação com a água (controle), que mostrou germinação de 56,25%. Lima *et al.* (2024), relataram que os resultados obtidos em sua pesquisa com a levedura *C. lipolytica* UCP 0988 demonstraram que o biossurfactante também não inibiu a germinação das sementes nem o crescimento das raízes, onde os índices de germinação foram de 99%, 98% e 95% para as soluções na ½ CMC (0,25 g/L), na CMC (0,5 g/L) e no dobro da CMC (1,0 g/L), respectivamente.

3.7. Teste de toxicidade com *Artemia salina*

A *Artemia* é um microcrustáceo que se desenvolve em ambientes extremamente salinos. Este organismo é usado como modelo para avaliar os efeitos tóxicos agudos de várias substâncias inorgânicas e orgânicas. Sua ampla disponibilidade e facilidade de cultivo o tornam uma opção atraente para pesquisa, pois muitos espécimes podem ser obtidos de centros comerciais sem dificuldades significativas (Da Silva; Da Silva, 2023).

O presente estudo realizou o teste com as *Artemia salina* em diferentes concentrações do biossurfactante ($\frac{1}{2}$ CMC, CMC e $2 \times$ CMC) e em soluções do biossurfactante a 1,0 e 2,0%. Os resultados obtidos mostraram uma taxa de sobrevivência entre 95 e 100% dos microcrustáceos, sendo a maior taxa de mortalidade, de 5%, observadas no dobro da CMC 0,8 g/L e 2,0% do biossurfactante. Os resultados obtidos são similares aos encontrados por Lima *et al.* (2024), que descreveram sobrevivência de 95% para o dobro da CMC e para uma solução a 2% do biossurfactante de *C. lipolytica* UCP 0988. Pinto *et al.* (2020), analisaram um biossurfactante de *C. bombicola* nas concentrações de 0,5% e 1% e encontraram taxas letais de 50 e 100%, respectivamente.

3.8. Composição química do biossurfactante

Conhecidas pela produção de glicolipídios, as leveduras da espécie *Starmerella bombicola* têm sido estudadas quanto ao seu potencial de produção de surfactantes com grandes perspectivas de uso no mercado (Li *et al.*, 2018; To *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023).

O biossurfactante em estudo apresentou um total de 42,03% de lipídeos e 55,90% de carboidratos, o que sugere a natureza glicolipídica do biossurfactante. Essa classificação baseia-se na composição química do biossurfactante, que inclui uma porção glicídica, indicando a presença da fração polar, e uma porção lipídica, da natureza apolar, que confere a característica anfipática, essencial para a atividade de redução da tensão superficial/interfacial (Dini *et al.*, 2024). A interação desses componentes dá origem a um biossurfactante multifuncional, com potencial para aplicações diversas, como biorremediação, estabilização de emulsões e desenvolvimento de produtos industriais sustentáveis (Dini *et al.*, 2024). O biossurfactante produzido por *C. lunata* UFPEDA885, no estudo realizado por Maciel *et al.*, (2024), por sua vez, apresentou 0,02% de proteínas, 6,5% de açúcares e 87% de lipídios totais.

3.9. Experimentos de dispersão de composto hidrofóbico em água do mar (aumentar o tópico)

A dispersão do óleo do motor variou entre 50 e 80%, sendo este último o maior valor de dispersão, obtido na proporção 1:25, como ilustra a Figura 05.

Lima *et al.* (2024) apresentaram resultados semelhantes a este estudo ao investigar a produção de biossurfactante por *C. lipolytica* UCP 0988. Em concentrações de 0,5 g/L (CMC) e 0,25 g/L ($\frac{1}{2}$ CMC), o biossurfactante conseguiu dispersar 70% e 40% do óleo de motor, respectivamente, demonstrando sua eficiência na dispersão de hidrocarbonetos.

3.10. Remoção de derivado de petróleo adsorvido em areia e em solos pelo biossurfactante em ensaio cinético (porque a menor na areia padrão)

A remoção do óleo de motor de areia padrão no teste cinético apresentou um aumento progressivo com a adição do biossurfactante isolado, até a concentração da CMC. No entanto, nenhuma melhoria adicional foi observada ao empregar o biossurfactante no dobro da CMC. O aumento do tempo também exerceu influência positiva no processo de remoção do composto hidrofóbico, como evidenciado na Tabela 03.

No solo siltoso utilizado como adsorvente, o uso do biossurfactante a metade da CMC possibilitou a remoção de até $97,21 \pm 0,01\%$ do contaminante. No entanto, um aumento da concentração para a CMC e o dobro da CMC não exerceu efeito significativo na remoção, para o período de 24 horas. Comportamento similar foi

observado quando o solo argiloso foi empregado, com remoções de $98,81 \pm 0,01\%$ para o biossurfactante na CMC e $99,01 \pm 0,02\%$ no dobro da CMC.

O biossurfactante bruto mostrou-se eficiente na remoção de óleo de motor, com maior desempenho nos dois tipos de solo testados e, em menor grau, na areia padrão. Comparado às concentrações do biossurfactante isolado ($\frac{1}{2}$ CMC, CMC e $2x$ CMC), os resultados não apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, o uso do biossurfactante em sua forma bruta representa uma alternativa de baixo custo, especialmente em aplicações que demandam grandes volumes do biotensoativo.

Estudos realizados por Sharma *et al.* (2018) revelaram o efeito do biossurfactante produzido *Bacillus amyloliquefaciens* SAS-1 e *Bacillus subtilis* BR-15, na remoção de óleo do motor em solo, mostrando que os biossurfactantes lipopeptídicos foram capazes para remover entre $56,91 \pm 1,52$ e $66,31 \pm 2,32\%$ do óleo contido no solo. Selva Filho *et al.* (2023), em sua pesquisa com a produção de biossurfactante com a mesma levedura utilizada neste trabalho, cultivada em resíduos industriais, observou valores de remoção para areia padrão, solo siltoso e solo argiloso, de $82,30 \pm 0,07\%$, $94,20 \pm 0,07\%$ e $96,65 \pm 0,09\%$ respectivamente. Portanto os percentuais apresentados nessa pesquisa mostram que o biossurfactante produzido pela *Starmerella bombicola* é de alta eficiência. Na remoção de óleo motor em areia padrão Lima *et al.* (2024) atingiu a maior taxa de remoção sendo de 80% com o seu biossurfactante bruto produzido pela *C. lipolytica*. Assim como os resultados obtidos nessa pesquisa, Nascimento *et al.* (2023) obtiveram taxas de remoção do óleo de motor superiores à 90% para os solos siltoso e argiloso na concentração de $2 \times$ CMC do seu biossurfactante produzido pela *Candida bombicola*.

3.11. Remoção de contaminantes hidrofóbicos da areia e solos por biossurfactante em ensaio estático

Os biossurfactantes modificam a molhabilidade das partículas do solo por meio da adsorção do componente hidrofóbico na superfície das partículas e da interação com o componente hidrofílico presente na fase aquosa. Além disso, a remoção do contaminante é otimizada devido ao comportamento repulsivo entre a porção polar do biossurfactante e as partículas do solo (Ren *et al.*, 2020; Vu; Mulligan, 2023).

O biossurfactante foi testado na remoção do óleo de motor através da sua percolação nos solos argiloso e siltoso, bem como, na areia padrão. Os resultados apresentados na Tabela 04 demonstram a eficiência da biomolécula na limpeza dos solos, alcançando uma remoção de $99,50 \pm 0,03\%$ no solo argiloso no dobro da CMC.

A utilização do biossurfactante bruto mostrou-se satisfatória principalmente nos solos siltoso e argiloso, chegando a uma remoção de $85 \pm 0,34 \%$ para o solo siltoso e de $81,40 \pm 0,27 \%$ para o solo argiloso. Na areia padrão, o líquido metabólico livre de células também mostrou um bom desempenho, com remoção de $49,35 \pm 1,08 \%$ do contaminante, visto que o aumento da remoção de óleo pelo biossurfactante na CMC foi apenas $14,35 \%$ superior, permitindo também a aplicação da forma bruta da biomolécula, em condições estáticas, com um menor custo. A Figura 06 ilustra a capacidade de remoção do composto hidrofóbico através da percolação do biossurfactante, deixando evidente a eficiência do biotensoativo.

Os estudos realizados por Nascimento *et al.* (2023) mostraram resultados inferiores aos apresentados por essa pesquisa. A nível de comparação, o biossurfactante produzido pela *C. bombicola* conseguiu uma taxa de $59,04 \pm 0,5 \%$ na remoção do composto hidrofóbico no solo siltoso, enquanto o surfactante produzido pela *Starmerella bombicola* ATCC 222214, nas condições desse estudo, atingiu um percentual de $96,87 \pm 0,30 \%$. Os resultados apresentados por Lima *et al.* (2024), com biossurfactantes brutos e isolados produzido pela *C.*

lipolytica, atingiram taxas de remoção de 20, 33 e 50% do óleo de motor com as diferentes concentrações testadas (CMC—0,5 g/L; $\frac{1}{2}$ CMC—0,25 g/L e $2 \times$ CMC—1,0 g/L, respectivamente) na areia padrão.

3.12. Limpeza de petroderivados em superfície oleosa pelo biossurfactante

O percentual de remoção de óleo de motor das superfícies lisas dos recipientes atingiu resultados satisfatórios, como descrito na Tabela 05, onde é possível observar que com o aumento da concentração do biossurfactante foram obtidas maiores remoções.

Valores de $85,58 \pm 0,71\%$ e $88,49 \pm 3,49\%$ de remoção foram alcançados para o óleo de motor e o óleo OCB1 para o biossurfactante na concentração de $5 \times$ CMC, demonstrando a eficiência do surfactante microbiano na limpeza de superfícies oleosas.

A Figura 07 ilustra o aumento da remoção do óleo pesado OCB1, um petroderivado que apresenta maior dificuldade de remoção devido a sua alta viscosidade, com o aumento da concentração do biossurfactante.

Com o aumento da concentração do biossurfactante, ao longo das 24 horas, foi possível observar o aumento significativo da remoção do óleo OCB1 nas paredes dos *Beckers*, mostrando que a biomolécula foi eficaz na remoção de óleo pesado de superfícies lisas. Barata *et al.* (2024), realizou o teste de remoção de óleo em superfície lisa (lâminas de vidro) contaminada com óleo de motor, para verificar o poder de remoção pelo detergente formulado com o biossurfactante de *Bacillus invictae* UCP1617, conseguindo obter um resultado de $98,42 \pm 1,02\%$. Em seu estudo na formulação de biodetergente produzido a partir do biossurfactante de *P. aeruginosa* ATCC 10145, Farias *et al.* (2021), conseguiram obter uma remoção de 100% do composto hidrofóbico OCB1 em superfície lisa.

3.13. Desestabilização de petroderivados em superfície lisa

Este teste teve o objetivo de avaliar a capacidade de desestabilização de petroderivados (óleo OCB1 e diesel) em superfícies lisas pelo biossurfactante. A impregnação das placas de Petri pelos compostos hidrofóbicos foi testada nas concentrações de metade da CMC, na CMC, no dobro da CMC e $5 \times$ CMC do surfactante microbiano. Os gráficos apresentados na Figura 08 mostram a porcentagem de remoção para cada petroderivado utilizado no experimento.

O poder do biossurfactante no óleo diesel chegou a $99,87 \pm 0,13\%$, tendo o seu menor percentual na metade da CMC, onde o menor valor obtido foi de $94,44 \pm 0,04\%$. Já o poder de remoção no óleo OCB1 teve um percentual reduzido quando comparado ao óleo diesel, o que seria esperado devido à alta viscosidade do óleo pesado, ficando em torno de $22,22 \pm 1,58\%$ e $28,88 \pm 1,40\%$. É importante ressaltar que a variação de volume do biossurfactante e o tempo de ação não influenciaram diretamente o poder de remoção de ambos os petroderivados. A Figura 09 ilustra o processo de remoção dos poluentes hidrofóbicos em diferentes concentrações do biossurfactante.

Para o óleo OCB1, é possível observar que o aumento da concentração do biossurfactante ajudou no processo de remoção. Por outro lado, mesmo em concentrações baixas, como a metade da CMC, o poder de remoção em óleo diesel pelo surfactante foi extremamente eficaz.

Esse mesmo teste foi realizado por Soares da Silva *et al.* (2024) para avaliar a eficiência de um biodetergente atóxico e um detergente comercial na desestabilização do óleo combustível OCB1. A capacidade de remoção do

óleo pesado foi mais favorável para o biodetergente, o qual demonstrou desestabilização total do petroderivado em apenas 2 minutos, enquanto o produto comercial exigiu o dobro do tempo para desestabilização parcial do óleo.

3.14. Aplicação do biossurfactante no tratamento de efluente oleoso industrial

O "teste do frasco giratório" ou das "garrafas cilíndricas" foi desenvolvido para avaliar a eficácia de biossurfactantes como dispersantes de óleos derramados, segundo Sobrinho *et al.* (2013) e Santos *et al.*, (2017).

No presente estudo, um experimento análogo foi conduzido para avaliar a ação do biossurfactante de *Starmerella Bombicola* ATCC 222214 no tratamento de efluente oleoso proveniente de uma empresa de combustíveis. Para realização da leitura da absorbância do efluente industrial, o mesmo foi diluído 6 vezes com hexano para o resultado ser obtido. O biossurfactante isolado demonstrou uma taxa de remoção de óleo de cerca de 70,73% quando aplicado na metade de sua CMC. Na CMC, o surfactante conseguiu remover $83,76 \pm 1,53$ % do contaminante. O maior índice de remoção do óleo foi de $92,52 \pm 1,18$ %, alcançada quando a concentração foi o dobro da CMC, o que indica uma alta eficiência e sugere que o aumento na concentração do biossurfactante favorece a remoção do óleo. A água destilada, utilizada como controle, removeu apenas $0,75 \pm 1,32$ % do contaminante. A Figura 10 ilustra o poder de remoção do surfactante microbiano.

Em estudo similar, com a utilização de biossurfactante produzido pela *Pseudomonas cepacia* na remoção do óleo de um efluente industrial de termelétrica, Soares Silva *et al.* (2019) atingiram valores semelhantes aos alcançados nessa pesquisa, com 40%, 60% e 100%, nas concentrações de $\frac{1}{2}$ CMC; CMC e $2 \times$ CMC respectivamente.

4. CONCLUSÕES

A *Starmerella bombicola* ATCC 222214 demonstrou capacidade de produzir um biossurfactante altamente eficiente em meios formulados com substratos de baixo custo, destacando seu significativo potencial biotecnológico. A *levedura* produziu compostos com atividades surfactantes e emulsificantes, utilizando matérias-primas comercialmente viáveis. O biossurfactante gerado apresentou excelente desempenho como agente tensoativo, alcançando uma tensão superficial compatível com os valores descritos na literatura para microrganismos reconhecidos como superprodutores de biossurfactantes. Esse biossurfactante mostrou-se eficaz como emulsificante de óleos e hidrocarbonetos derivados do petróleo, destacando seu potencial para o tratamento de ambientes contaminados por óleos pesados. Os resultados indicaram que o biossurfactante bruto é viável para uso direto na área ambiental, com a vantagem de reduzir significativamente os custos de produção. Além disso, a biomolécula demonstrou estabilidade sob condições ambientais extremas, sugerindo sua aplicabilidade em cenários adversos, como derramamentos de petróleo no mar, recuperação de petróleo e processos industriais que envolvam altas temperaturas. A ausência de toxicidade nas concentrações testadas reforça a segurança do biossurfactante para aplicações ambientais e industriais. A utilização do biossurfactante no tratamento de um efluente industrial corroborou seu potencial para processos de descontaminação ambiental. Por fim, a possível aplicação comercial do biossurfactante como aditivo biotecnológico está em consonância com políticas de preservação ambiental e redução de impactos nos ecossistemas, consolidando-o como uma solução inovadora e sustentável.

5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Fundação Nacional de Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE). Os autores agradecem a Empresa Ultracargo Logística S.A. e aos laboratórios da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e do Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Brasil.

6. REFERÊNCIAS

Abbot, V., Paliwal, D., Sharma, A., Sharma, P., 2022. A review on the physicochemical and biological applications of biosurfactants in biotechnology and pharmaceuticals. *Heliyon* 8, 10149. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10149>.

Al-Sakkaf, M.K., Onaizi, S.A., 2024. Effects of emulsification factors on the characteristics of crude oil emulsions stabilized by chemical and biosurfactants: A review. *Fuel* 361, 130604. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130604>.

APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington. (1998).

Aryan, V., Kraft, A., 2021. The crude oil value chain: Global availability and the influence of regional energy policies. *J. Cleaner Prod.* 280, 124616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124616>.

Baharuddin, S.H., Mustahil, N.A., Reddy, A.V.B., Abdullah, A.A., Mutalib, M.I.A., Moniruzzaman, M., 2020. Development, formulation and optimization of a novel biocompatible ionic liquids dispersant for the effective oil spill remediation, *Chemosphere*, 126125. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126125>.

Barakat, K.M., Hassan, S.W.M. Darwesh, O.M., 2017. Biosurfactant production by *Haloalkaliphilic Bacillus* strains isolated from Red Sea, Egypt. *Egypt. J. Aquat. Res.* 43, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.09.001>.

Barata, M.I.C., Cavalcanti, M.H.C., Rufino, R.D., De Almeida, F.C.G., Sarubbo, L.A., 2024. Optimized production and properties of biosurfactant from *Bacillus invictae* UCP1617 and its performance in a detergent formulation for environmental applications. *J. Surfactants Deterg.* 28, 155-169. <https://doi.org/10.1002/jsde.12788>.

- Biktasheva, L., Gordeev, A., Usova, A., Kirichenko, A., Kuryntseva, P., Selivanovskaya, S., 2024. Bioremediation of oil-contaminated soils using biosurfactants produced by bacteria of the genus *Nocardiopsis* sp. Microbiol 15, 2575–2592. <https://doi.org/10.3390/microbiolres15040171>.
- Castilho, L.V.A., Duarte, A.M., Pasqualino, I.P., Sousa, J.S., Nogueira, F.C.S., Gomez, J.G.C., Seldin, L., Freire, D.M.G., 2025. Mono- and di-rhamnolipids mixtures from *Pseudomonas aeruginosa* for use in extreme conditions of pre- and post-salt oil reservoirs compared with synthetic surfactants. Colloids Surf. B Biointerfaces 245, 114311. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.114311>.
- Cooper, D.G., Goldenberg, B.G., 1987. Surface-active agents from two *Bacillus* species. Appl. Environ. Microbiol 53, 224-229. <https://doi.org/10.1128/aem.53.2.224-229>.
- Elayaperumal, S., Sivamani, Y., Bhattacharya, D., Lahiri, D., Nag, M., 2025. Eco-friendly biosurfactant solutions for petroleum hydrocarbon cleanup in aquatic ecosystems. Sustainable Chemistry for the Environment 2949-8392. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100207>.
- Da Silva, I.A., De Almeida, F.C.G., Alves, R.N., Cunha, M.C., De Oliveira, J.C.M., Fernandes, M.L.B., Sarubbo, L.A., 2024. The formulation of a natural detergent with a biosurfactant cultivated in a low-cost medium for use in coastal environmental remediation. Fermentation 10 (7), 332. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070332>.
- Da Silva, L.M., Da Silva, F.J., 2023. Bioassay with artemia salina l.: A gateway to understanding the toxicity of medicinal plant extracts. Botânica, Ecologia e Sustentabilidade: uma perspectiva multidisciplinária 1, 50-69. <https://doi.org/10.37885/230814206>.
- Dini, S., Bekhit, A.E.D.A., Roohinejad, S., Vale, J.M., Agyei, D., 2024. The physicochemical and functional properties of biosurfactants: A review. Molecules 29 (11), 2544, <https://doi.org/10.3390/molecules29112544>.
- Duarah, P., Haldar, D., Patel, A.K., Dong, C.D., Singhanian, R.R., Purkait, M.K.A., 2022. Review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. Bioresource Technology 348, 126791. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126791>.
- Essghaier, B., Mallat, N., Khwaldia, K., Mottola, F., Rocco, L., Hannachi, H., 2023. Production and characterization of new biosurfactants/bioemulsifiers from *Pantoea alhagi* and their antioxidant, antimicrobial and anti-biofilm potentiality evaluations. Molecules 28 (4), 1912. <https://doi.org/10.3390/molecules28041912>.
- Eras-Muñoz, E., Wongsirichot, P., Ingham, B., Winterburn, J., Gea, T., Font, X., 2024. Screening of alternative nitrogen sources for sophorolipid production through submerged fermentation using *Starmerella bombicola*. Waste Management 186, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.048>.

- Farias, C.B.B., Almeida, F.C., Silva, I.A., Souza, T.C., Meira, H.M., Soares da Silva, R.C.F., Luna, J.M., Santos, V.A., Sarubbo, L.A., 2021. Production of green surfactants: Market prospects. *Electron. J. Biotechnol* 51, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.02.002>.
- Farias, C.B.B., Soares Da Silva R.D.C.F., Almeida, F.C.G., Santos, V.A., Sarubbo, L.A., 2021. Removal of heavy oil from contaminated surfaces with a detergent formulation containing biosurfactants produced by *Pseudomonas spp*. *PeerJ* 9, 12518. <https://doi.org/10.7717/peerj.12518>.
- Ferreira, I.N.S., Rodríguez, D.M., Campos-Takaki, G.M., Da Silva Andrade, R.F., 2020. Biosurfactant and bioemulsifier as promising molecules produced by *Mucor hiemalis* isolated from Caatinga soil. *Electron. J. Biotechnol.* 47, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.06.006>.
- Galitskaya, P., Gordeev, A., Ezhkin, N., Biktasheva, L., Kuryntseva, P., Selivanovskaya, S., 2023. Bacterial cultural media containing lipopeptides for heavy oil recovery enhancement: The results of sand-packed column experiment. *Processes* 11, 3203. <https://doi.org/10.3390/pr11113203>.
- Gaur, V.K., Regar, R.K., Dhiman, N., Gautam, K., Srivastava, J.K., Patnaik, S., Kamthan, M., Manickam, N., 2019. Biosynthesis and characterization of sophorolipid biosurfactant by *Candida spp.*: Application as food emulsifier and antibacterial agent. *Bioresource Technology* 285, 121314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121314>.
- Griffiths, S., Sovacool, B.K., Kim, J., Bazilian, M., Uratani, J.M., 2022. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science* 89, 102542. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102542>.
- Guzmán, E., Maestro, A., Ortega, F., Rubio, R.G., 2023. Association of oppositely charged polyelectrolyte and surfactant in solution: equilibrium and nonequilibrium features. *J. Condens. Matter Phys* 35 (32), 323001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/acd041>.
- Guzmán, E., Ortega, F., Rubio, R.G., 2024. Exploring the world of rhamnolipids: A critical review of their production, interfacial properties, and potential application. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci* 69, 101780. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2023.101780>.
- HASSANSHAHIAN M., 2014. Isolation and characterization of biosurfactant producing bacteria from *Persian gulf* (bushehr provenance). *Marine Pollution Bulletin* 86 (1), 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.043>.
- Jaysree R.C., Basu S., Singh P.P., Ghosal T., Patra P.A., Keerthi Y., 2011. Isolation of Biosurfactant Producing Bacteria from Environmental samples. *Pharmacologyonline* 63, 1427-1433.

- Jimoh, A.A., Lin, J., 2019. Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 184, 109607. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109607>.
- Kee, S.H., Ganeson, K., Rashid, N.F.M., Yatim, A.F.M., Vigneswari, S., Amirul, A.A.A., Ramakrishna, S., Bhubalan, K., 2022. A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants. *Fuel* 321, 124039. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124039>.
- Kugaji, M., Ray, S.K., Parvatikar, P., Raghu, A.V., 2025. Biosurfactants: A review of different strategies for economical production, their applications and recent advancements. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 337, 103389. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103389>.
- Kumari, K., Behera, H.T., Nayak, P.P., Sinha, A., Nandi, A., Ghosh, A., Raina, V., 2023. Amelioration of lipopeptide biosurfactants for enhanced antibacterial and biocompatibility through molecular antioxidant property by methoxy and carboxyl moieties. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 161, 114493. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114493>.
- Lavanya, M., Machado, A.A., 2024. Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: A comprehensive review. *Sci. Total Environ* 908, 168407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>.
- Li, J., Li, H., Liang, S., Song, D., 2018. Characterization of sophorolipids from the yeast *Starmerella bombicola* O-13-1 using waste fried oil and cane molasses as substrates. *Desalination and Water Treatment* 119, 267–275. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22062>.
- Lima, B.G., Santos, J.C., Silva, R.R., Caldas, M.C.F., Meira, H.M., Rufino, R.D., Luna, J.M., 2024. Sustainable production of biosurfactant grown in medium with industrial waste and use for removal of oil from Soil and Seawater. *Surfaces* 7 (3), 537-549. <https://doi.org/10.3390/surfaces7030036>.
- Luna, J.M., Rufino, R.D., Albuquerque, C.D., Sarubbo, L.A., Campos-Takaki, G.M., 2011. Economic optimized medium for tensio-active agent production by *Candida sphaerica* UCP0995 and application in the removal of hydrophobic contaminant from sand. *Int. J. Mol. Sci.* 12 (4), 2463-2476. <https://doi.org/10.3390/ijms12042463>.
- Maciel, C.D.C.S., Da Silva Andrade, R.F., De Gusmão, N.B., De Campos Takaki, G.M., 2024. Caracterização de biossurfactante por *Curvularia lunata*-ufpeda885 para descontaminação de solos por óleo automotivo. *Interfaces Científicas-Saúde e Ambiente* 9 (3), 7-23. <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2024v9n3p7-23>.

- Markam, S.S., Raj, A., Kumar, A., Khan, M.L., 2024. Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste. *Curr. Res. Microb. Sci.* 7, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100266>.
- Meyer, B.N.N.R., Ferrigni, J.E., Putnam, L.B., Jacobsen, D.E., Nichols, D.E., McLaughlin, J.L., 1982. Brine shrimp: A convenient general bioassay for active plant constituents. *J. Med. Plant Res.* 45, 31. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971236>.
- Monteiro, M.R., Kugelmeier, C.L., Pinheiro, R.S., Batalha, M.O., César, A.S., 2018. Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>.
- Nandwani, S.K., Saxena, N., Kumar, A., 2024. Enhanced oil recovery potential analysis through simulation of a bio-based surfactant using CFD. *J. Mol. Liq.* 396, 124112. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124112>.
- Nikolova, C., Gutierrez, T., 2021. Biosurfactants and their applications in the oil and gas industry: Current state of knowledge and future perspectives. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9, 626639. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.626639>.
- Plaza, G., Achal, V., 2020. Biosurfactants: Eco-friendly eco-friendly and innovative biocides against biocorrosion. *Int. J. Biol. Macromol.* 21, 2152. <https://doi.org/10.3390/ijms21062152>.
- Poomalai, P., Krishnan, J., Ravichandran, A., Sureshkumar, R., 2024. Biosurfactants: Sustainable alternative to synthetic surfactants and their applications. *Int. J. Appl. Pharm* 16, 34-43. <https://dx.doi.org/10.22159/ijap.2024v16i2.50061>.
- Purohit, B.K., Tewari, S., Prasad, K.S.N.V., Talari, V.K., Pandey, N., Choudhury, P., Panda, S.S., 2024. Marine oil spill clean-up: A review on technologies with recent trends and challenges. *Regional Studies in Marine Science* 80, 103876. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103876>.
- Purwasena, I.A., Fitri, D.K., Putri, D.M., Endro, H., Zakaria, M.N., 2024. Lipopeptide biosurfactant as a potential root canal irrigation agent: Antimicrobial and anti-biofilm evaluation. *Journal of Dentistry* 144, 104961. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104961>.
- Qazi, M.A., Wang, Q., Dai, Z., 2022. Sophorolipids bioproduction in the yeast *Starmerella bombicola*: Current trends and perspectives. *Bioresource Technology* 346, 126593. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126593>.

- Ren, H., Zhou, S., Wang, B., Peng, L., Li, X., 2020. Treatment mechanism of sludge containing highly viscous heavy oil using biosurfactant. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 585, 124117. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124117>.
- Ribeiro, B.G., Leão, V.L.X.S., Guerra, J.M.C., Sarubbo, L.A., 2023. Cookies and muffins containing biosurfactant: Textural, physicochemical and sensory analyses. J. Food Sci. Technol. 60, 2180–2192. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05745-9>.
- Rufino, R.D., Luna, J.M., Marinho, P.H.C., Farias, C.B.B., Ferreira, S.R.M., Sarubbo, L.A., 2013. Removal of petroleum derivative adsorbed to soil by biosurfactant Rufisan produced by *Candida lipolytica*. J. Petrol. Sci. Eng. 109, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.014>.
- Sacki, H., Sasaki, M., Komatsu, K., Miura, A., Matsuda, H., 2009. Oil spill remediation by using the remediation agent JE1058BS that contains a biosurfactant produced by *Gordonia* sp. strain JE-1058. Bioresource Technology 100, 572-577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.046>.
- Sarubbo, L.A., Silva, M.G.C., Durval, I.J.B., Bezerra, K.G.O., Ribeiro, B.G., Silva, I.A., Banat, I.M., 2022. Biosurfactants: production, properties, applications, trends, and perspectives. Biochemical Engineering Journal 181, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>.
- Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., Sánchez-Ramírez, E., 2022. Tackling sustainability challenges in latin america and caribbean from the chemical engineering perspective: A literature review in the last 25 years. Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers 188, 483–527. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.012>.
- Selva Filho, A.A.P., Converti, A., Soares Da Silva, R.D.C.F., Sarubbo, L.A. Biosurfactants as multifunctional remediation agents of environmental pollutants generated by the petroleum industry. Energies 16 (3), 1209. <https://doi.org/10.3390/en16031209>.
- Shaikhah, D., Loise, V., Angelico, R., Porto, M., Calandra, P., Abe, A.A., Caputo, P., 2024. New trends in biosurfactants: From renewable origin to green enhanced oil recovery applications. Molecules 29 (2), 301. <https://doi.org/10.3390/molecules29020301>.
- Shaji, A., Thamarai, P., Deivayanai, V.C., Saravanan, A., Yaashikaa, P.R., 2024. Progress in sustainable remediation: Utilizing biosurfactants for eco-friendly contaminant cleanup. Bioresource Technology Reports 101901. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101901>.

- Sharma, R., Singh, J., Verma, N., 2018. Production, characterization and environmental applications of biosurfactants from *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 16, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.028>.
- Sharma, S., Pandey, L.M., 2020. Production of biosurfactant by *Bacillus subtilis* RSL-2 isolated from sludge and biosurfactant mediated degradation of oil. *Bioresource Technology* 307, 123261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123261>.
- Silva, I.A., Almeida, F.C.G., Souza, T.C., Bezerra, K.G.O., Durval, I.J.B., Converti, A., Sarubbo, L.A., 2022. Oil spills: Impacts and perspectives of treatment technologies with focus on the use of green surfactants. *Environmental Monitoring and Assessment* 194 (3), 143. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09813-z>.
- Silva, J.R.M., De Oliveira Barros, V.P., Terceiro, P.S., De Oliveira, I.N., Da Silva Moura, O.F., De Freitas, J.D., Landell, M.F., 2024. Brazilian mangrove sediments as a source of biosurfactant-producing yeast *Pichia pseudolambica* for bioremediation. *Chemosphere* 365, 143285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143285>.
- Silva, M.D.G.C., Medeiros, A.O., Converti, A., Almeida, F.C.G., Sarubbo, L.A., 2024. Biosurfactants: promising biomolecules for agricultural applications. *Sustainability* 16 (1), 449. <https://doi.org/10.3390/su16010449>.
- Silva, P.F.F., Da Silva, R.R., Sarubbo, L.A., Guerra, J.M.C., 2024. Production and optimization of biosurfactant properties using *Candida mogii* and Licuri oil (*Syagrus coronata*). *Foods* 13, 4029. <https://doi.org/10.3390/foods13244029>.
- Soares Da Silva, R.D.C.F., De Almeida, D.G., Brasileiro, P.P.F., Rufino, R.D., De Luna, J.M., Sarubbo, L.A., 2019. Production, formulation and cost estimation of a commercial biosurfactant. *Biodegradation* 30, 191-201. <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9830-4>.
- Sobrinho, H.B.S., De Luna, J.M., Rufino, R.D., Figueiredo, A.L., Sarubbo, P.A., 2013. Application of biosurfactant from *Candida sphaerica* UCP 0995 in removal of petroleum derivative from soil and sea water. *J. Life Sci.* 7 (6), 559-569. <https://doi.org/10.17265/1934-7391/2013.06.001>.
- Sorhie, V., Alemtoshi, Gogoi, B., Walling, B., Acharjee, S.A., Bharali, P., 2022. Role of micellar nanoreactors in organic chemistry: Green and synthetic surfactant review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 30, 100875. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100875>.

- Souza, K.S.T., Gudiña, E.J., Schwan, R.F., Rodrigues, L.R., Dias, D.R., Teixeira, J.A., 2018. Improvement of biosurfactant production by *Wickerhamomyces anomalus* CCMA 0358 and its potential application in bioremediation. J. Hazard. Mater 346, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.021>.
- Tathong, S., Muangchinda, C., Kongsuwan, C., Khondee, N., Luepromchai, E., Soonglerdsongpha, S., Pinyakong, O., 2022. Production of lipopeptide biosurfactant by *Bacillus subtilis* GY19 and its application as oil-contaminated surface cleaning agent. Science Asia 48 (1), 43-50. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2022.009>.
- Thakur, V., Baghmare, P., Verma, A., Verma, J.S., Geed, S.R., 2024. Recent progress in microbial biosurfactants production strategies: Applications, technological bottlenecks, and future outlook. Bioresource Technology, 408, 131211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131211>.
- Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J., 1996. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. Environmental Pollution 93, 249-256. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(96\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00052-8).
- To, M.H., Wang, H., Miao, Y., Kaur, G., Roelants, S.L.K.W., Lin, C.S.K., 2023. Optimal preparation of food waste to increase its utility for sophorolipid production by *Starmerella bombicola*. Bioresource Technology 379, 128993. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128993>.
- Umar, A., Zafar, A., Wali, H., Siddique, M.P., Malik, Z.A., Ahmed, S., 2021. Surfactin-like biosurfactant production and optimization by *Bacillus subtilis* SNW3: Product characterization and its influence on seed development and plant growth. Res. Sq. 550205. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-550205/v1>.
- Verma, C., Hussain, C.M., Quraishi, M.A., Alfantazi, A., 2023. Green surfactants for corrosion control: Design, performance and applications. Adv. Colloid. Interface Sci. 311, 102822. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102822>.
- Vieira, I.M.M., Santos, B.L.P., Ruzene, D.S., Silva, D.P., 2021. An overview of current research and developments in biosurfactants. J. Ind. Eng. Chem., 100, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.017>.
- Vu, K.A., Mulligan, C.N., 2023. An overview on the treatment of oil pollutants in soil using synthetic and biological surfactant foam and nanoparticles. Int. J. Mol. Sci. 24 (3), 1916. <https://doi.org/10.3390/ijms24031916>.
- Vučurović, D., Bajić, B., Trivunović, Z., Dodić, J., Zeljko, M., Jevtić-Mučibabić, R., Dodić, S., 2024. Biotechnological utilization of agro-industrial residues and by-products—sustainable production of biosurfactants. Foods 13 (5), 711. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>.

Werrie, P.Y., Durenne, B., Delaplace, P., Fauconnier, M.L., 2020. Phytotoxicity of essential oils: Opportunities and constraints for the development of biopesticides. *Foods* 9 (9), 1291. <https://doi.org/10.3390/foods9091291>.

Xia, M., Wang, S., Chen, B., Qiu, R., Fan, G., 2023. Enhanced solubilization and biodegradation of HMW-PAHs in water with a *Pseudomonas mosselii*-released biosurfactant. *Polymers* 15 (23), 4571. <https://doi.org/10.3390/polym15234571>.

Yuan, C., Wang, J., Wu, J.C., Li, Q., 2025. Degradation of puffed feather to produce functional biosurfactants by *Chitinophaga eiseniae* 4 H. *Process Biochemistry* 148, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.11.024>.

Zacharias, D.C., Lemos, A.T., Keramea, P., Dantas, R.C., Da Rocha, R.P., Crespo, N.M., Sylaios, G., Jovane, L., Da Silva Santos, I.G., Montone, R.C., De Oliveira Soares, M., Lourenço, R.A., 2024. Offshore oil spills in Brazil: An extensive review and further development. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116663. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116663>.

Zhao, F., Cui, Q., Su, H., Li, C., Dong, M., 2025. Biosurfactants are green and versatile enhancers for sustainable treatment of oily sludge: A review. *J. Environ. Chem. Eng.* 13, 115087. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115087>.

Tabela 01

Meios e condições de cultivo avaliados para produção de biossurfactante pela levedura *Starmerella bombicola* ATCC 222214

Meios testados	Condições de cultivo
5,0% glicerol e 2,0% glicose	pH 7,0 200 rpm 96, 120 e 144h 28°C
1,0% N-hexadecano e 2,0% glicose	
3,0% sacarose e 0,1% extrato de levedura	
3,0% sacarose; 0,1% extrato de levedura e 2% óleo de fritura residual	
2,0% melaço de cana-de-açúcar e 3,0% milhocina	
2,0% melaço de cana-de-açúcar; 3,0% milhocina e 2% óleo de fritura residual	

Tabela 02

Avaliação da fitotoxicidade do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm para sementes de tomate (*Solanum lycopersicum*) e repolho (*Brassica oleracea*). Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$

Concentrações do Biossurfactante isolado	Índice de germinação (%)	
	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Repolho (<i>Brassica oleracea</i>)
$\frac{1}{2}$ CMC	90,5 $\pm$ 0,18	80,5 $\pm$ 0,11
CMC	86,0 $\pm$ 0,13	72,2 $\pm$ 0,14
2 $\times$ CMC	80,8 $\pm$ 0,15	65,0 $\pm$ 0,12

Tabela 03

Avaliação da remoção do óleo de motor em ensaio cinético em areia e solos pelo biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$

Tipos de solos	Biossurfactante	Tempo de contato (horas)	Índice de remoção (%)
Areia padrão	Biossurfactante bruto	0,5	16,96 $\pm$ 0,21
		1,0	27,39 $\pm$ 0,05
		2,0	53,51 $\pm$ 0,81
		24,0	55,11 $\pm$ 0,22
	Biossurfactante isolado ½ CMC	0,5	48,89 $\pm$ 0,16
		1,0	65,66 $\pm$ 0,92
		2,0	72,26 $\pm$ 0,11
		24,0	75,75 $\pm$ 0,14
	Biossurfactante isolado CMC	0,5	56,05 $\pm$ 0,16
		1,0	69,51 $\pm$ 0,18
		2,0	73,62 $\pm$ 0,23
		24,0	82,48 $\pm$ 0,12
	Biossurfactante isolado 2 $\times$ CMC	0,5	55,85 $\pm$ 0,17
		1,0	69,82 $\pm$ 1,14
		2,0	74,02 $\pm$ 0,27
		24,0	82,01 $\pm$ 0,22
Solo argiloso	Biossurfactante bruto	0,5	62,40 $\pm$ 2,65
		1,0	77,43 $\pm$ 0,05
		2,0	77,92 $\pm$ 2,75
		24,0	88,00 $\pm$ 0,24
	Biossurfactante isolado ½ CMC	0,5	76,87 $\pm$ 0,48
		1,0	91,00 $\pm$ 0,08
		2,0	91,40 $\pm$ 1,08
		24,0	98,68 $\pm$ 0,01
	Biossurfactante isolado CMC	0,5	81,07 $\pm$ 0,06
		1,0	91,45 $\pm$ 0,17
		2,0	91,72 $\pm$ 2,23
		24,0	98,81 $\pm$ 0,01
	Biossurfactante isolado 2 $\times$ CMC	0,5	85,79 $\pm$ 1,58
		1,0	92,66 $\pm$ 0,17
		2,0	93,87 $\pm$ 0,63
		24,0	99,01 $\pm$ 0,02
Solo siltoso	Biossurfactante bruto	0,5	50,31 $\pm$ 0,45
		1,0	82,94 $\pm$ 0,05
		2,0	85,38 $\pm$ 0,04
		24,0	89,80 $\pm$ 0,01
	Biossurfactante isolado ½ CMC	0,5	62,57 $\pm$ 1,57
		1,0	96,00 $\pm$ 0,00
		2,0	96,20 $\pm$ 0,78
		24,0	97,01 $\pm$ 0,03
	Biossurfactante isolado CMC	0,5	68,50 $\pm$ 0,85
		1,0	96,25 $\pm$ 0,01
		2,0	97,00 $\pm$ 0,11
		24,0	97,21 $\pm$ 0,01
	Biossurfactante isolado 2 $\times$ CMC	0,5	71,00 $\pm$ 2,18
		1,0	97,04 $\pm$ 0,08
		2,0	97,22 $\pm$ 0,63
		24,0	97,61 $\pm$ 0,00

Tabela 04

Porcentagem de remoção de óleo motor em ensaio estático em areia e solos pelo biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$

Solos	Porcentagem de remoção (%)				
	Água (controle)	Biossurfactante bruto	Biossurfactante isolado		
			$\frac{1}{2}$ CMC	CMC	$2 \times$ CMC
Areia Padrão	10,52 $\pm$ 2,3%	49,35 $\pm$ 1,08 %	52,00 $\pm$ 0,60 %	63,70 $\pm$ 0,59 %	72,05 $\pm$ 0,80 %
Siltoso	5,67 $\pm$ 0,64%	85,48 $\pm$ 0,34 %	92, 81 $\pm$ 0,21 %	93,95 $\pm$ 0,43 %	96,87 $\pm$ 0,30 %
Argiloso	8,12 $\pm$ 1,59%	81,40 $\pm$ 0,27 %	97,15 $\pm$ 0,11 %	99,20 $\pm$ 0,08 %	99, 50 $\pm$ 0,03 %

Tabela 05

Percentual de remoção dos compostos hidrofóbicos (óleo de motor e OCB1) das superfícies oleosas pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm

Compostos Hidrofóbicos	Concentrações do biossurfactante				
	Água (controle)	Biossurfactante isolado			
		½ CMC	CMC	2 × CMC	5 × CMC
Óleo de Motor	25,38 ± 4,21	72,15 ± 0,69	80,83 ± 8,10	83,34 ± 2,54	85,58 ± 0,71
OCB1	5,94 ± 2,21	58,93 ± 8,93	72,76 ± 0,57	86,87 ± 1,36	88,49 ± 3,49

Legenda das Figuras

Fig. 1. Seleção dos substratos e das condições de cultivo para produção do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214.

Fig. 2. Índice de emulsificação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm para os substratos hidrofóbicos (óleo de motor, diesel, querosene, hexano e óleo soja). Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$.

Fig. 03. Tensão superficial do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm na presença de diferentes tempos de aquecimento à 90 °C (a), diferentes pH (b), diferentes temperaturas (c) e diferentes concentrações de NaCl (d). Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$.

Fig. 4. Concentração Micelar Crítica do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm.

Fig. 5. Ilustração da capacidade dispersante do óleo de motor na água do mar com ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. Os resultados são expressos como médias $\pm$ DP (n = 3), onde as médias são significativas em $p < 0,05$.

Fig. 6. Ilustração da remoção do óleo de motor na percolação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm.

Fig. 7. Ilustração da capacidade de remoção do óleo OCB1 em superfície lisa pelo biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm.

Fig. 8. Percentual de remoção do óleo OCB1 e do óleo Diesel em placas de Petri pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. (A) Percentual de remoção de Óleo Diesel; (B) Percentual de remoção de Óleo OCB1.

Fig. 9. Representação da capacidade de remoção do óleo OCB1 e do óleo diesel em placas de Petri pela ação do biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivada em meio mineral suplementado com 5,0% de

glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. (A) Remoção do óleo OCB1 em diferentes concentrações do BS; (A) Remoção do óleo diesel em diferentes concentrações do biossurfactante.

Fig. 10. lustração do processo de remoção do óleo do efluente industrial pelo biossurfactante de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 cultivado em meio mineral suplementada com 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose a 28 °C, por 144 h a 200 rpm. (A) Efluente antes do teste; (B) Homogeneização do biossurfactante com o efluente; (C) Escala de remoção do óleo contido no efluente pela ação do controle (água destilada) e do biossurfactante isolado na metade da CMC, na CMC e no dobro da CMC, respectivamente.

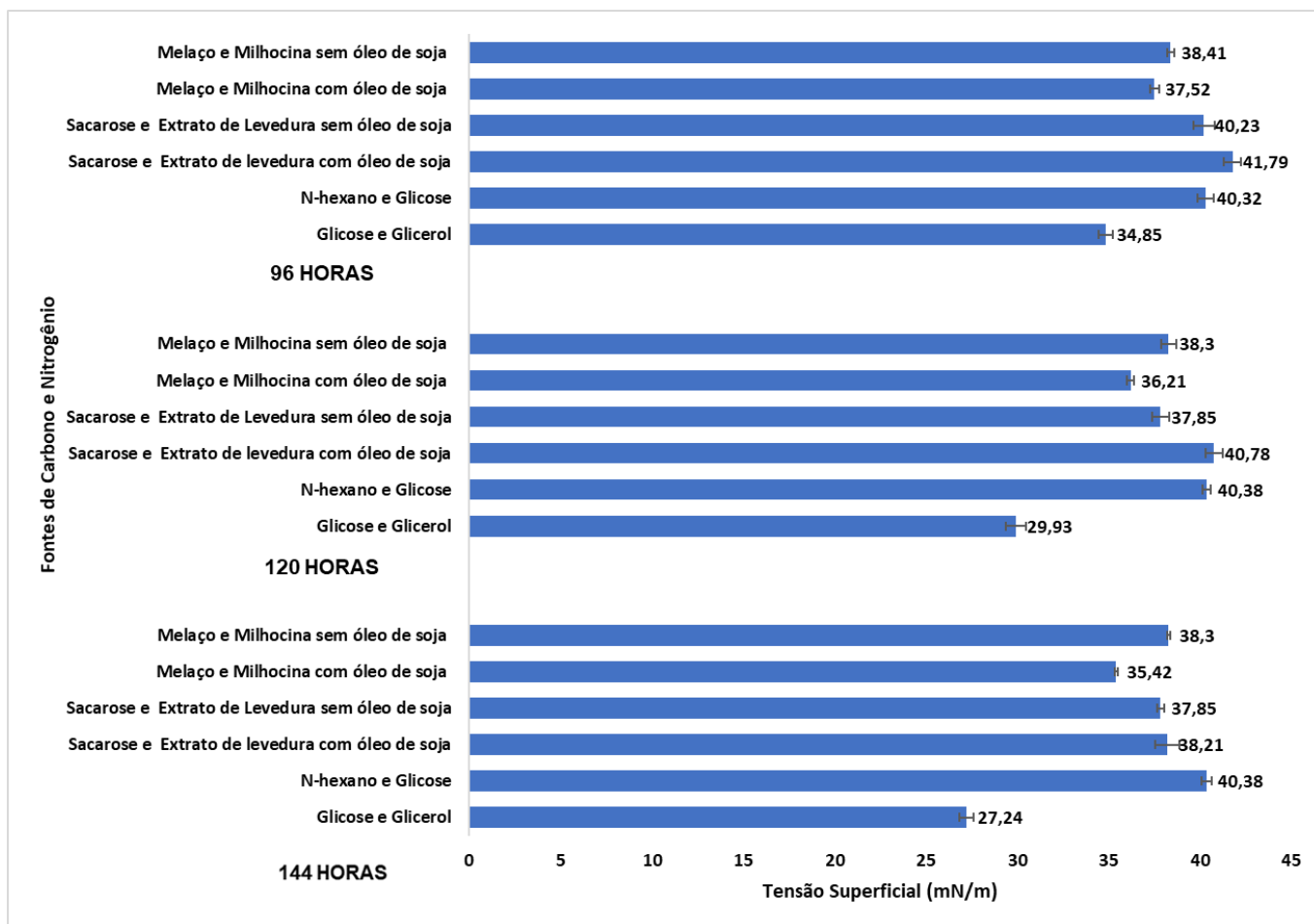


Fig. 1.

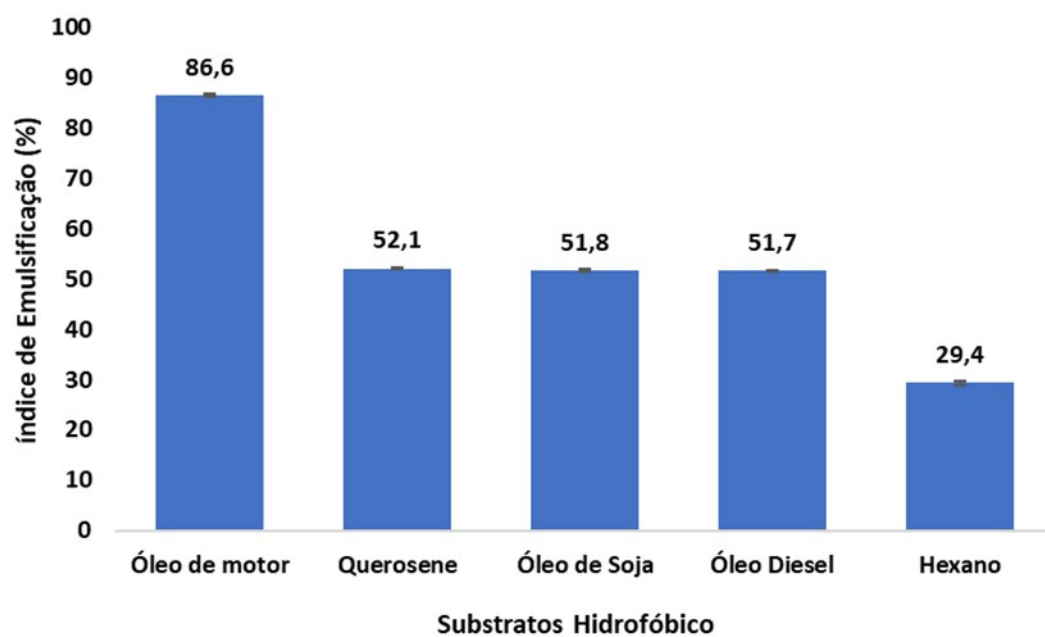


Fig. 2.

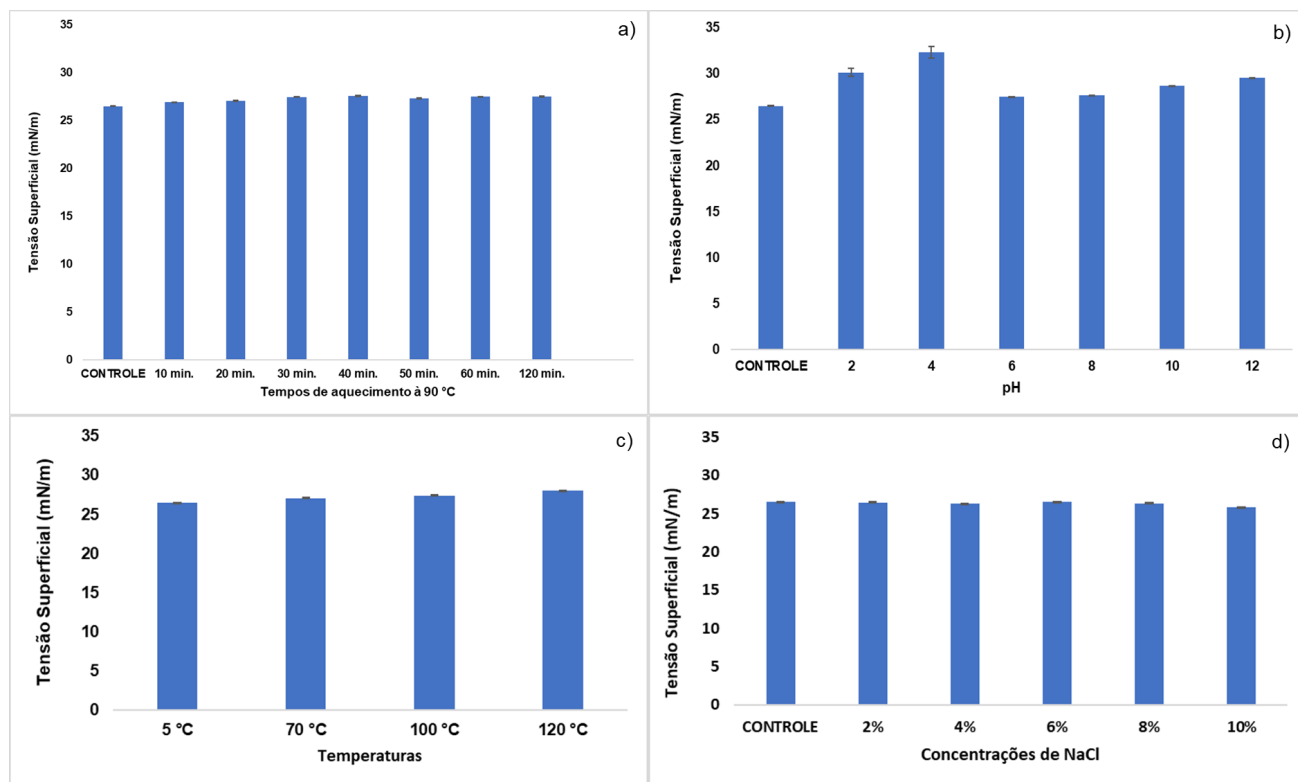


Fig. 3.

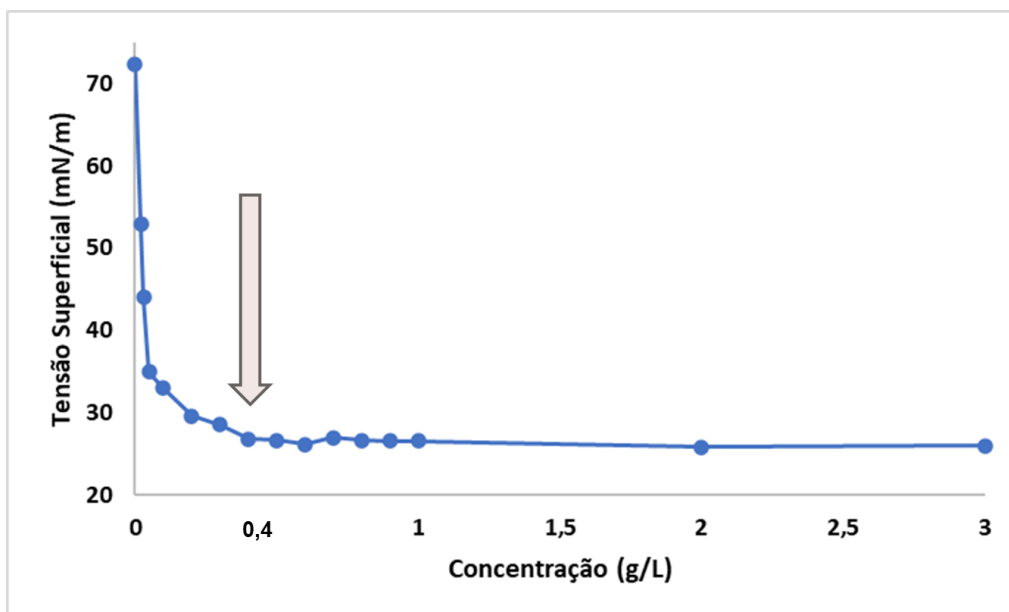


Fig. 4.

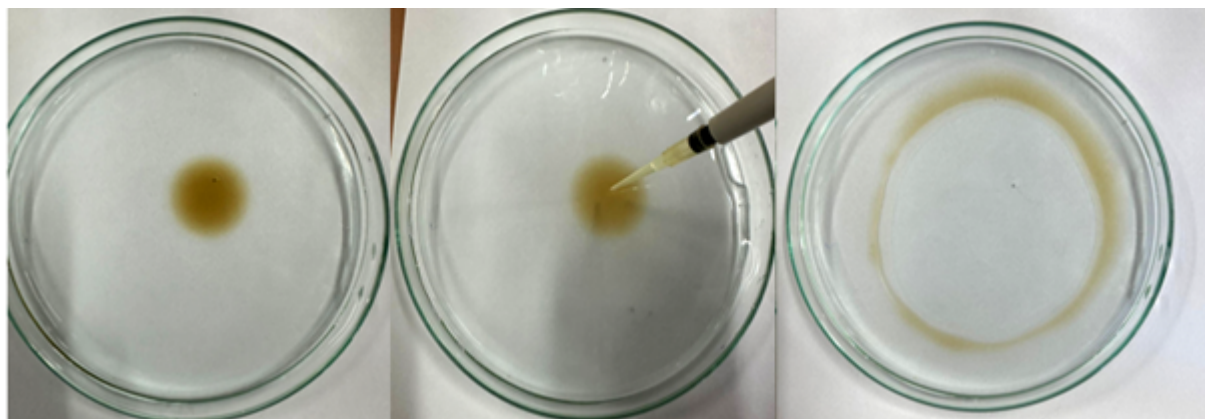


Fig. 5.

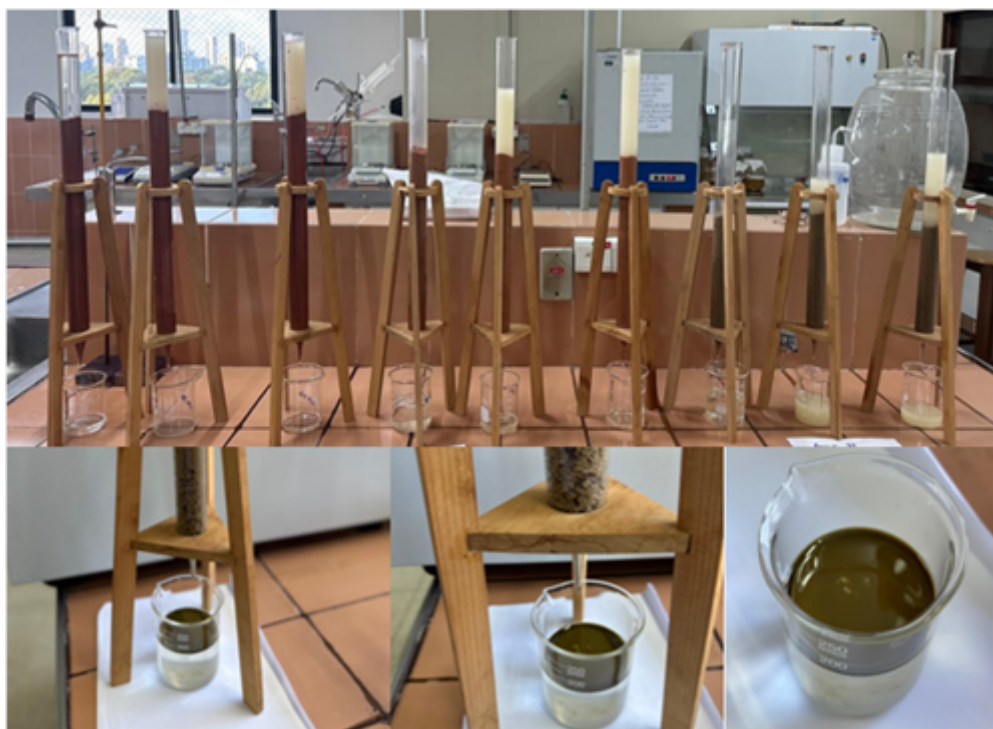


Fig. 6.

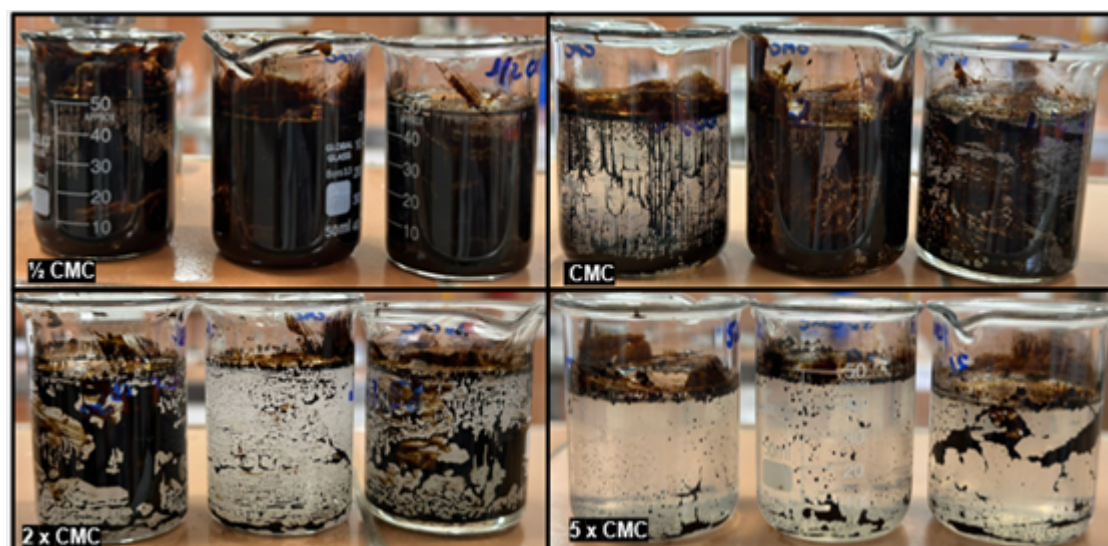


Fig. 7.

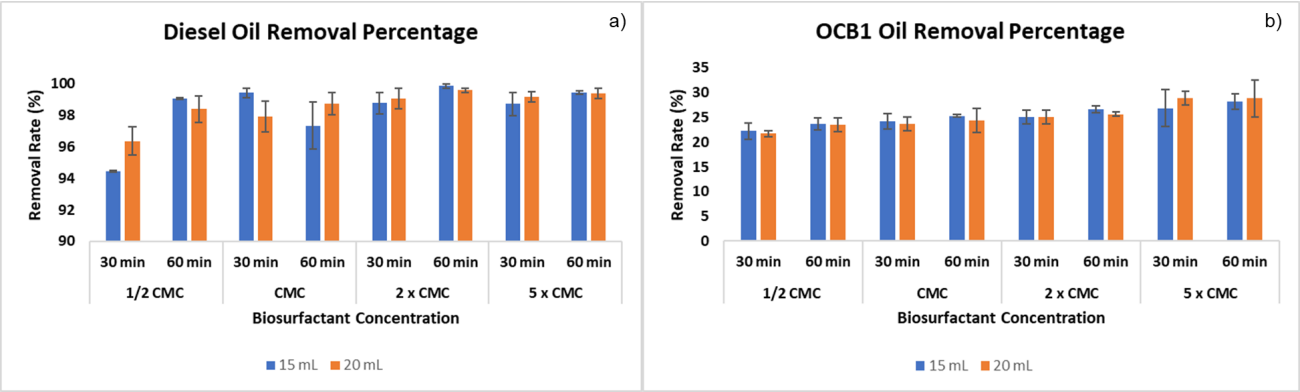


Fig. 8.

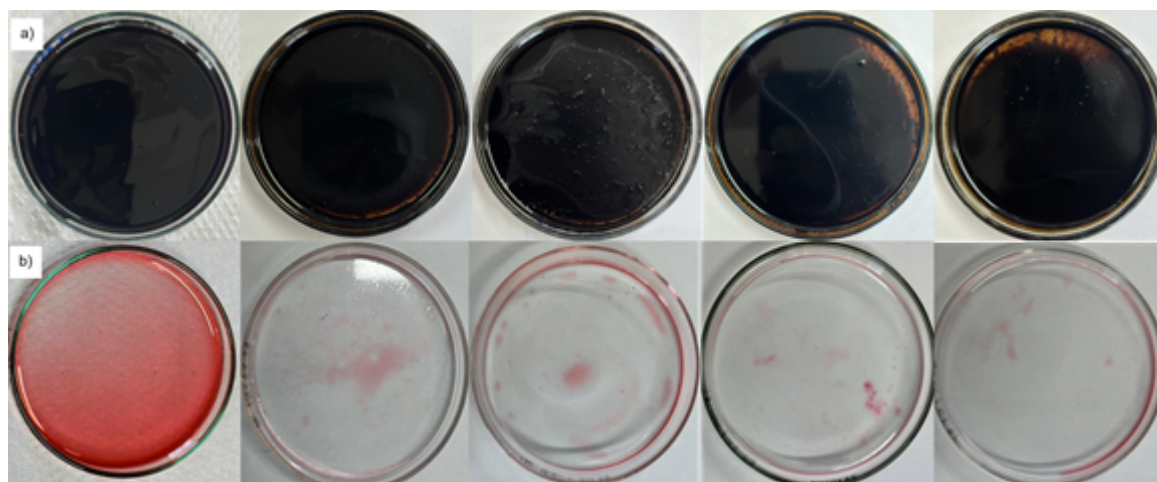


Fig. 9.

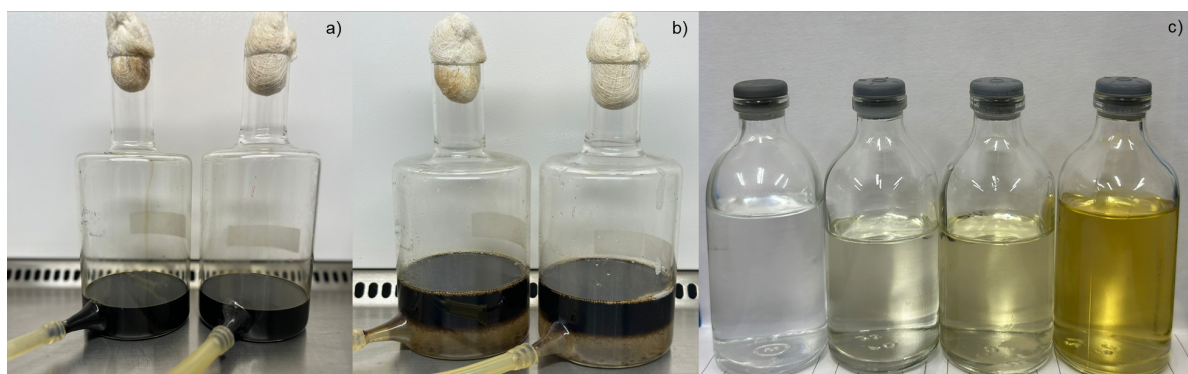


Fig. 10.

CAPÍTULO III

1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados com a linhagem de *Starmerella bombicola* ATCC 222214 permitem as seguintes conclusões:

- A *Starmerella bombicola* ATCC 222214 demonstrou grande potencial como produtora de composto com atividades surfactante e emulsificante utilizando substratos comercialmente promissores.
- O biossurfactante produzido apresentou elevado potencial como agente tensoativo, alcançando um valor de tensão superficial equivalente aos valores descritos na literatura para microrganismos reconhecidos como superprodutores de biossurfactantes.
- O biossurfactante produzido pode ser utilizado como emulsificante de óleos e hidrocarbonetos de petróleo, evidenciando sua aplicação no tratamento de ambientes contaminados com óleos pesados.
- A aplicação do biossurfactante bruto mostrou-se viável, indicando a possibilidade de uso direto na área ambiental, com redução significativa nos custos de produção.
- O biossurfactante apresentou estabilidade em condições ambientais extremas, sugerindo seu uso em cenários adversos, como derramamentos de petroderivados no mar, recuperação de petróleo e processos industriais que envolvam altas temperaturas.
- O surfactante microbiano demonstrou não apresentar toxicidade nas concentrações utilizadas para máxima eficiência, destacando-se como uma alternativa segura para aplicações ambientais e industriais.
- Foi comprovada a eficiência do biossurfactante na remoção de óleo de efluente industrial, reforçando seu potencial para uso em processos de tratamentos de efluentes e descontaminação ambiental.
- A possível utilização comercial do biossurfactante como aditivo biotecnológico está alinhada com as políticas de preservação ambiental e redução de impactos nos ecossistemas, consolidando-o como uma solução sustentável e inovadora.

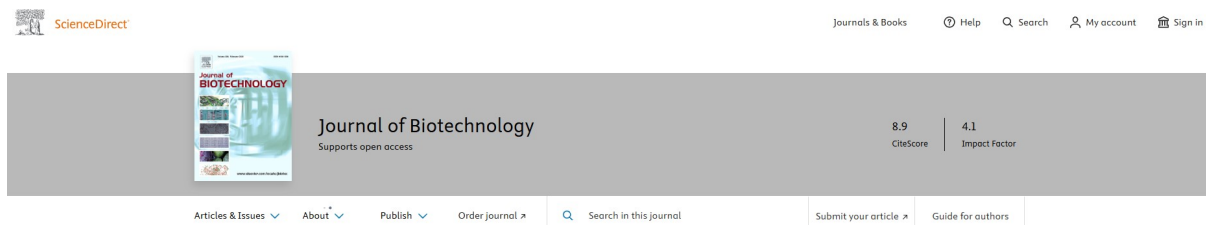
2. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

O desenvolvimento de estudos futuros, com o objetivo de trazer melhorias e explorar novas aplicações do biossurfactante em estudo, inclui as seguintes direções:

- Durante o aumento de escala de produção em biorreator semi-industrial, identificar o ponto ótimo de operação que maximize a produção e permita a obtenção de uma maior concentração do biossurfactante isolado.
- Elucidar a estrutura molecular do biossurfactante por meio de análises avançadas, como Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (CG-MS).
- Avaliar a estabilidade do biossurfactante a longo prazo quando tratado com conservantes de alimentos, visando potencializar sua durabilidade e eficiência.
- Aplicar o biossurfactante em revestimentos ecológicos anticorrosivos para investigar sua capacidade inibidora em diferentes superfícies.
- Estudar a ação do biossurfactante como agente inibidor de corrosão metálica por fatores atmosféricos em ensaios realizados em uma Câmara de Corrosão Acelerada (CCA).
- Avaliar a eficiência do biossurfactante na inibição de corrosão em aço utilizado em concreto armado, considerando sua aplicabilidade em estruturas de construção.
- Comparar a eficiência do biossurfactante na inibição de corrosão metálica com a de produtos comerciais disponíveis no mercado, buscando verificar sua competitividade e vantagens.

3. ANEXOS

3.1. NORMAS DA REVISTA



<https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-biotechnology/publish/guide-for-authors>

3.2. COMPROVANTE DE SUBMISSÃO



JBIOTEC-D-25-00097 - Confirming your submission to Journal of Biotechnology

De emjbiotec.0.9111f4.99439b8e@editorialmanager.com
<emjbiotec.0.9111f4.99439b8e@editorialmanager.com>
em nome de
em@editorialmanager.com <em@editorialmanager.com>

Data Ter, 28/01/2025 18:46

Para LEONIE ASFORA SARUBBO GAMA <leonie.sarubbo@unicap.br>

Re: Eco-friendly biosurfactant: Tackling oil pollution in terrestrial and aquatic ecosystems
by Kaio Wédann de Oliveira; Alexandre Augusto P. Selva Filho; Yslla Emanuely Faccioli; Gleice
Paula de Araújo; Rita de Cássia F. Soares da Silva; Leonie Asfora Sarubbo
Research Paper

Dear Sarubbo,

Your submission entitled "Eco-friendly biosurfactant: Tackling oil pollution in terrestrial and aquatic ecosystems" has been received by Journal of Biotechnology. It has been assigned the following manuscript number: **JBIOTEC-D-25-00097**.

You may check on the progress of your paper by logging on to the Editorial Manager as an author. The URL is <https://www.editorialmanager.com/jbiotec/>.

Your username is: leonie.sarubbo@unicap.br

If you need to retrieve password details, please go to: [click here to reset your password](#)

Thank you for submitting your work to this journal.

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EM via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

Kind regards,

Editorial Manager
Journal of Biotechnology

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, then you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated Scientific Managing Editor, a tool assisted recommendation, or a combination. For more details see the journal guide for authors.

At Elsevier, we want to help all our authors to stay safe when publishing. Please be aware of fraudulent messages requesting money in return for the publication of your paper. If you are publishing open access with Elsevier, bear in mind that we will never request payment before the paper has been accepted. We have prepared some guidelines (<https://www.elsevier.com/connect/authors-update/seven-top-tips-on-stopping-apc-scams>) that you may find helpful, including a short video on Identifying fake acceptance letters (<https://www.youtube.com/watch?v=o5l8thD9XtE>). Please remember that you can contact Elsevier's Researcher Support team (<https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>) at any time if you have questions about your manuscript, and you can log into Editorial Manager to check the status of your manuscript (https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/29155/c/10530/supporthub/publishing/kw/status/).

#AU_JBIOTEC#

To ensure this email reaches the intended recipient, please do not delete the above code

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. ([Remove my information/details](#)). Please contact the publication office if you have any questions.

3.3. PUBLICAÇÕES E PARTICIPAÇÕES EM EVENTOS CIENTÍFICOS NO PERÍODO DO MESTRADO

Artigos completos publicados em periódicos

<https://doi.org/10.3390/fermentation10120602>



Article

Application of *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 Biosurfactant as a Metal Corrosion Inhibitor in a Constructed Accelerated Corrosion Chamber (ACC)

Rita de Cássia F. Soares da Silva ¹, Alexandre Augusto P. Selva Filho ^{1,2,3}, Yslla Emanuely S. Faccioli ^{1,2,3}, Yasmim K. Silva ², Kaio W. Oliveira ^{1,2}, Gleice Paula Araujo ^{1,2,3}, Nathália Maria P. Rocha e Silva ^{1,4}, Attilio Converti ⁴ and Leonie A. Sarubbo ^{1,2,3,*}

¹ Advanced Institute of Technology and Innovation (IATI), Rua Potyra, n. 31, Prado, Recife CEP 50751-310, Pernambuco, Brazil; rita.freire@iati.org.br (R.d.C.F.S.d.S.); alexandre.selva@ufrpe.br (A.A.P.S.F.); ysfaccioli@hotmail.com (Y.E.S.F.); kaio.olliver@hotmail.com (K.W.O.); nathalia.padilha@iati.org.br (N.M.P.R.e.S.)

² School of Technology and Communication, Catholic University of Pernambuco (UNICAP), Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, Recife CEP 50050-900, Pernambuco, Brazil; yasmim.20202041608@unicap.br

³ Biotechnology Northeast Network (RENORBIO), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n—Dois Irmãos, Recife CEP 52171-900, Pernambuco, Brazil

⁴ Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genoa (UNIGE), Pole of Chemical Engineering, Via Opera Pia, n. 15, 16145 Genoa, Italy; converti@unige.it

* Correspondence: leonie.sarubbo@unicap.br



Citation: Soares da Silva, R.d.C.F.; Selva Filho, A.A.P.; Faccioli, Y.E.S.; Silva, Y.K.; Oliveira, K.W.; Araujo, G.P.; Rocha e Silva, N.M.P.; Converti, A.; Sarubbo, L.A. Application of *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 Biosurfactant as a Metal Corrosion Inhibitor in a Constructed Accelerated Corrosion Chamber (ACC). *Fermentation* **2024**, *10*, 602. <https://doi.org/10.3390/fermentation10120602>

Academic Editor: Mohamed Kouban

Received: 29 October 2024

Revised: 19 November 2024

Accepted: 22 November 2024

Published: 25 November 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Corrosion is the deterioration of metals due to environmental exposure. Commercial inhibitors used to control corrosion often contain heavy metal salts, which are highly toxic to both the environment and human health. A biosurfactant produced by the bacterium *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 was tested as a corrosion inhibitor on carbon steel and galvanized iron surfaces. Matrices based on plant ingredients with different compositions were tested in a laboratory-constructed accelerated corrosion chamber (ACC) simulating a critical maritime atmosphere in conditions of 40 °C, 5% NaCl, and 100% humidity. The most stable matrix was selected for biosurfactant incorporation in different concentrations, expressed as critical micellar concentration (CMC), and was applied to metal surfaces to evaluate its ability to inhibit corrosion. Additionally, to evaluate the potential of the biosurfactant as a low-toxicity corrosion inhibitor additive in paint systems, iron and carbon steel samples were coated with three biosurfactant-containing commercial paints and subjected to critical atmospheric conditions for testing coating effectiveness. The formulation containing vegetable resin as a plasticizer, oleic acid, ethanol, and CaCO₃ was chosen to incorporate the biosurfactant. The addition of the biosurfactant at twice its CMC led to a reduction in carbon steel sample mass loss from 123.6 to 82.2 g/m², while in the galvanized iron plates, the mass loss decreased from 285.9 to 226.7 g/m² at the same biosurfactant concentration. When supplemented with the biosurfactant, the alkyd resin-based paint (A) ensured less mass loss in samples (46.0 g/m²) compared to the control without biosurfactant (58.0 g/m²). Using the paint formulated with oil-based resin (B), the mass loss decreased from 53.0 to 24.1 g/m², while with that based on petroleum derivatives (C), it decreased from 82.2 to 27.6 g/m². These results confirm the feasibility of using biosurfactants in biodegradable coatings, reducing the need for commercial corrosion inhibitors.

Keywords: corrosion; biosurfactant; anticorrosion; matrices; biodegradation

1. Introduction

Corrosion is basically defined as the deterioration that can be commonly found in metal structures exposed to the atmosphere or submerged in natural water [1]. This process involves redox reactions that convert the metal or metal component into oxide, hydroxide, or salt when in contact with harmful gases or moisture. A destructive oxidative process

<https://doi.org/10.3390/en17205042>



Review

Biosurfactants: Chemical Properties, Ecofriendly Environmental Applications, and Uses in the Industrial Energy Sector

Yslla Emanuelly da Silva Faccioli ^{1,2,3}, Kaio Wédann de Oliveira ^{2,3}, Janyffer Medeiros Campos-Guerra ⁴,
Attilio Converti ^{2,3}, Rita de Cássia F. Soares da Silva ² and Leonie A. Sarubbo ^{1,2,3,*}

- ¹ Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n—Dois Irmãos, Recife 52171-900, Brazil; ysfaccioli@hotmail.com
² Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Rua Potyra, n. 31, Prado, Recife 50751-310, Brazil; kaio.olliver@hotmail.com (K.W.d.O.); converti@unige.it (A.C.); rita.freire@iati.org.br (R.d.C.F.S.d.S.)
³ Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, Recife 50050-900, Brazil
⁴ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife 50670-901, Brazil; janyffer.campos@ufpe.br
⁵ Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, Politecnico di Genova, University of Genoa (UNIGE), Via Opera Pia 15, 16145 Genoa, Italy
* Correspondence: leonie.sarubbo@unicap.br

Abstract: The exploitation of nature and the increase in manufacturing production are the cause of major environmental concerns, and considerable efforts are needed to resolve such issues. Oil and petroleum derivatives constitute the primary energy sources used in industries. However, the transportation and use of these products have huge environmental impacts. A significant issue with oil-related pollution is that hydrocarbons are highly toxic and have low biodegradability, posing a risk to ecosystems and biodiversity. Thus, there has been growing interest in the use of renewable compounds from natural sources. Biosurfactants are amphipathic microbial biomolecules emerging as sustainable alternatives with beneficial characteristics, including biodegradability and low toxicity. Biosurfactants and biosurfactant-producing microorganisms serve as an ecologically correct bioremediation strategy for ecosystems polluted by hydrocarbons. Moreover, synthetic surfactants can constitute additional recalcitrant contaminants introduced into the environment, leading to undesirable outcomes. The replacement of synthetic surfactants with biosurfactants can help solve such problems. Thus, there has been growing interest in the use of biosurfactants in a broad gamut of industrial sectors. The purpose of this review was to furnish a comprehensive view of biosurfactants, classifications, properties, and applications in the environmental and energy fields. In particular, practical applications of biosurfactants in environmental remediation are discussed, with special focus on bioremediation, removal of heavy metals, phytoremediation, microbial enhanced oil recovery, metal corrosion inhibition, and improvements in agriculture. The review also describes innovating decontamination methods, including nanobioremediation, use of genetically modified microorganisms, enzymatic bioremediation, modeling and prototyping, biotechnology, and process engineering. Research patents and market prospects are also discussed to illustrate trends in environmental and industrial applications of biosurfactants.

Keywords: biosurfactant; environmental contamination; remediation; industrial applications; environmental biotechnology



Citation: Faccioli, Y.E.d.S.; de Oliveira, K.W.; Campos-Guerra, J.M.; Converti, A.; Soares da Silva, R.d.C.F.; Sarubbo, L.A. Biosurfactants: Chemical Properties, Ecofriendly Environmental Applications, and Uses in the Industrial Energy Sector. *Energies* **2024**, *17*, 5042. <https://doi.org/10.3390/en17205042>

Academic Editor: Antonio Zuorro

Received: 13 September 2024

Revised: 5 October 2024

Accepted: 8 October 2024

Published: 10 October 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Environmental contamination by complex pollutants is a problem that threatens numerous forms of life and results from human activities [1]. Oil and petroleum derivatives are the most widely used energy sources. The transport and use of these products

Capítulos de livros publicados em periódicos

<https://doi.org/10.56238/alookdevelopv1-063>



<https://doi.org/10.51859/ampla.cti3437-7>

CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: TENDÊNCIAS E DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

CAPÍTULO VII

DO LIXO AO LUXO: INOVAÇÕES EM TRATAMENTO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

FROM TRASH TO LUXURY: INNOVATIONS IN THE
TREATMENT OF ELECTRO-ELECTRONIC WASTE

DOI: 10.51859/AMPLA.CTI3437-7

Allem Karolyne Dino da Silva ¹

Alcides Miguel da Silva Júnior ²

Felipe Casa Nova Furtado ³

Kaio Wêdann de Oliveira ⁴

Yali Alves da Silva ⁵

Angelo Just da Costa e Silva ⁶

Eliana Cristina Barreto Monteiro ⁷

¹ Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processo Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), e-mail: allemkdino@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5136-4109>

² Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processo Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), e-mail: alcides.00000850166@unicap.br, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7129-2859>

³ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processo Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), e-mail: felipe.2022602149@unicap.br, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4441-8972>

⁴ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processo Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), e-mail: kaio.oliver@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0955-4145>

⁵ Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processo Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), e-mail: yali.alves@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0708-7589>

⁶ Professor Assistente da Universidade de Pernambuco e Universidade Católica de Pernambuco, e-mail: angelo.silva@unicap.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0759-6439>

⁷ Professora Adjunta da Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco, e-mail: eliana.monteiro@unicap.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

RESUMO

Nos últimos anos, a sociedade tem testemunhado uma crescente proliferação de dispositivos eletroeletrônicos, impulsionada pela incessante inovação tecnológica. No entanto, essa rápida evolução tem gerado uma sombra indesejada: uma montanha de resíduos eletroeletrônicos, ou e-waste, que se acumula com uma velocidade alarmante. Este capítulo parte em jornada rumo ao entendimento e transformação do "lixo em luxo", explorando a natureza complexa e multifacetada dos resíduos eletroeletrônicos, bem como os impactos ambientais e econômicos decorrentes de sua gestão inadequada. Ao adentrar este capítulo, embarca-se em uma busca por inovações tecnológicas, práticas sustentáveis e regulamentações cruciais que estão moldando a maneira como a sociedade enfrenta o desafio do e-waste. O objetivo do capítulo é compreender, abordar e, por fim, redefinir o papel desses resíduos na sociedade, enquanto encontramos o caminho para

uma transição sustentável. O luxo, afinal, pode surgir das cinzas do descarte, desde que abracemos a inovação, a responsabilidade e a visão de um amanhã mais próspero. Portanto, a adoção de uma abordagem sustentável e tecnologicamente avançada no tratamento de resíduos eletroeletrônicos emerge como uma necessidade premente. As inovações e práticas discutidas neste capítulo oferecem uma base sólida para a conversão do "lixo" em "luxo", destacando a importância de não mais negligenciar essa oportunidade em nossa busca por um mundo mais sustentável.

Palavras-chave: Tecnologias. Sustentabilidade. Resíduos. Inovações. Eletrônicos.

ABSTRACT

In recent years, society has witnessed a growing proliferation of electronic devices, driven by incessant technological innovation. However, this rapid

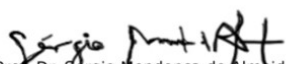


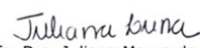
Participação em evento científico



Certificamos que Kaio Wedann de Oliveira, participou do evento IV CONBASE - CONGRESSO NACIONAL DE BIOTECNOLOGIA, AMBIENTE, SAÚDE E EDUCAÇÃO, realizado no período de 06/11/2024 a 08/11/2024, na Universidade Católica de Pernambuco, com carga horária de 5 horas.

Recife, 08 de novembro de 2024.


Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida
Coordenador do Curso de Ciências Biológicas


Profa. Dra. Juliana Moura de Luna
Coordenadora do CONBASE

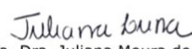


Autores do Trabalho
Kaio Wédann de Oliveira
Gleice Paula de Araújo
Alexandre Augusto Paredes Selva Filho
Yslla Emanuelly Faccioli
Rita de Cássia Freire Soares da Silva
Leonie Astora Sanubbo

Certificamos que o trabalho **BIOSURFACTANTES: PRODUÇÃO, CLASSES E PROPRIEDADES QUÍMICAS** foi apresentado em Apresentação Painei, durante o IV CONBASE - CONGRESSO NACIONAL DE BIOTECNOLOGIA, AMBIENTE, SAÚDE E EDUCAÇÃO, realizado no período de 06/11/2024 a 08/11/2024, na Universidade Católica de Pernambuco.

Recife, 08 de novembro de 2024.


Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida
Coordenador do Curso de Ciências Biológicas


Profa. Dra. Juliana Moura de Luna
Coordenadora do CONBASE



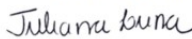


Autores do Trabalho
Kaio Wladann de Oliveira
Gleice Paula de Araújo
Alexandre Augusto Paredes Selva Filho
Yslla Emanuelly Faccioli
Rita de Cássia Freire Soares da Silva
Leonie Asfora Sarubbo

Certificamos que o trabalho APLICAÇÃO DE BIODISSURFACTANTE EM ÁREAS INDUSTRIAIS E AMBIENTAIS foi apresentado em Apresentação Pôster, durante o IV CONBASE - CONGRESSO NACIONAL DE BIOTECNOLOGIA, AMBIENTE, SAÚDE E EDUCAÇÃO, realizado no período de 06/11/2024 a 08/11/2024, na Universidade Católica de Pernambuco.

Recife, 08 de novembro de 2024.


Prof. Dr. Sergio Mendonça de Almeida
Coordenador do Curso de Ciências Biológicas


Profa. Dra. Juliana Moura de Luna
Coordenadora do CONBASE

