



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

YALI ALVES DA SILVA

**PRODUÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS PARA
APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE ÓLEO E AVALIAÇÃO
DO POTENCIAL ANTIMICROBIANO**

Recife, 17 de fevereiro de 2025

YALI ALVES DA SILVA

**PRODUÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS PARA
APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE ÓLEO E AVALIAÇÃO
DO POTENCIAL ANTIMICROBIANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de 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 de Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Moura de Luna

Co-orientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo

Recife, 17 de fevereiro de 2025

S586p

Silva, Yali Alves da.

Produção de compostos bioativos para aplicação na remoção de óleo e avaliação do potencial antimicrobiano / Yali Alves da Silva, 2025.
108 f.: il.

Orientadora: Juliana Moura de Luna.

Coorientadora: Leonie Asfora Sarubbo.

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. Biossurfactantes. 3. Jambú.
4. Sustentabilidade. 5. Tensoativos. 6. Biodegradação.
I. Título.

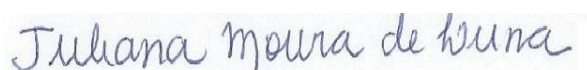
CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB4/1338

PRODUÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS PARA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE ÓLEO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ANTIMICROBIANO

YALI ALVES DA SILVA

Examinadores:



Profa. Dra. Juliana Moura de Luna (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 RAQUEL DINIZ RUFINO
Data: 26/02/2025 20:19:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 THAYSE ALVES DE LIMA E SILVA
Data: 27/02/2025 08:05:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Thayse Alves de Lima e Silva (Titular Externo)
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Defendida em: 17 de fevereiro de 2025

Coordenador: Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão à Profa. Dra. Juliana Moura de Luna pela valiosa oportunidade de desenvolver esta pesquisa. Sou imensamente grata desde a chance, anos atrás, de realizar a iniciação científica e dar continuidade a este caminho com este mestrado.

Agradeço à Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo pela coorientação, apoio e incentivo.

Agradeço aos professores Dra. Adriene Siqueira de Melo, Dr. Clovis Macêdo Bezerra Filho e Msc. Kaleen Massari pelo suporte nas metodologias realizadas.

Agradeço aos integrantes do laboratório de Bioengenharia da Universidade Católica de Pernambuco pelos momentos de troca.

Agradeço à Hugo Morais Meira por todo suporte oferecido ao longo da realização deste trabalho.

Sou profundamente grata à Hozana de Souza Ferreira por todas as palavras gentis e encorajadoras, especialmente durante a etapa final deste trabalho. Seu apoio e incentivo foram indispensáveis nesta jornada.

Meus mais profundos agradecimentos a Artur Maia e Danielle França, pela amizade, pelo apoio, pela escuta e por todos os conselhos ao longo desses dois anos. A amizade de vocês é inestimável.

Agradeço ao laboratorista Lucas Ferreira da Rocha por todo o auxílio.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço à Dra. Raquel Diniz Rufino e Dra. Thayse Alves de Lima e Silva pela disponibilidade em participar da minha banca de defesa.

Agradeço a todos que, de alguma forma, ao longo desses dois anos, seja no ambiente acadêmico ou fora dele, me incentivaram a seguir em frente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
LISTA DE ABREVIACÕES.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1 SURFACTANTES.....	17
3.1.1 Implicações relacionadas ao uso de surfactantes químicos.....	19
3.2 BIOSSURFACTANTES.....	22
3.2.1 Classificação dos biossurfactantes.....	26
3.2.2 Microrganismos produtores de biossurfactantes.....	28
3.2.3 Valorização de resíduos na produção de biossurfactantes.....	30
3.2.4 Aplicação dos biossurfactantes.....	32
3.3 RESISTÊNCIA ANTIMICROBIANA.....	35
3.4 METABÓLITOS VEGETAIS.....	37
3.4.1 <i>Acmella oleracea</i>	37
3.4.2 Composição química de <i>Acmella oleracea</i>	39
3.4.3 Propriedades farmacológicas.....	40
3.4.3.1 Propriedades antimicrobianas.....	42
REFERÊNCIAS.....	45
 CAPÍTULO II - Production and Characterization of a Biosurfactant Produced by <i>Candida guilliermondii</i> UCP 1592 and its Application as a Cleaning and Degreasing Agent.....	 57

Resumo.....	58
1 INTRODUÇÃO.....	59
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
2.1 Microrganismo produtor do biossurfactante.....	61
2.2 Preparo e crescimento do inóculo.....	62
2.3 Meio de cultivo e condições de fermentação.....	62
2.4 Cinética de crescimento e produção do biossurfactante.....	62
2.5 Isolamento do biossurfactante.....	63
2.6 Composição química do biossurfactante.....	63
2.7 Determinação da Tensão Superficial e Concentração Micelar Crítica.....	64
2.8 Determinação da atividade emulsificante.....	64
2.9 Dispersão de contaminante hidrofóbico.....	64
2.10 Avaliação da estabilidade do biossurfactante (pH, temperatura e salinidade).....	65
2.11 Toxicidade do biossurfactante para <i>Tenebrio molitor</i>	65
2.12 Toxicidade frente à <i>Artemia salina</i>	65
2.13 Aplicação do biossurfactante como agente de limpeza e desengordurante.....	66
2.13.1 Limpeza de superfície de vidro contaminada com óleo.....	66
2.13.2 Limpeza e desengorduramento de óleo em tecido de algodão.....	66
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
3.1 Cinética de crescimento e produção.....	67
3.2 Determinação da Tensão Superficial e Concentração Micelar Crítica.....	69
3.3 Capacidade emulsificante.....	71
3.4 Dispersão de óleo.....	71
3.5 Estabilidade do biossurfactante sob diferentes condições ambientais (pH, salinidade e temperatura).....	72
3.6 Caracterização estrutural do biossurfactante.....	74
3.7 Avaliação da toxicidade do biossurfactante.....	77
3.7.1 Toxicidade frente ao <i>Tenebrio molitor</i>	77
3.7.2 <i>Artemia salina</i>	77

3.8 Aplicação de biossurfactante na limpeza de superfícies contaminadas com composto hidrofóbico.....	78
---	----

CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	81

CAPÍTULO III - EVALUATION OF THE ANTIMICROBIAL POTENTIAL OF THE HEXANIC EXTRACT OF *Acmella oleracea* FLOWERS86

RESUMO.....	87
--------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO.....	88
--------------------------	-----------

2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	89
-----------------------------------	-----------

2.1 Material vegetal.....	89
---------------------------	----

2.2 Obtenção do extrato vegetal.....	90
--------------------------------------	----

2.3 Caracterização do extrato vegetal.....	90
--	----

2.4 Avaliação da atividade antimicrobiana dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de <i>Acmella oleracea</i>	90
--	----

2.4.1 Teste antimicrobiano preliminar.....	90
--	----

2.4.1 Teste de difusão de disco do extrato hexânico.....	91
--	----

2.4.2 Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida (CB).....	91
---	----

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
--------------------------------------	-----------

3.1 Seleção do extrato de <i>Acmella oleracea</i>	92
---	----

3.2 Caracterização do extratos de <i>Acmella oleracea</i> usando espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier.....	94
---	----

3.3 Atividade antimicrobiana do extrato de <i>Acmella oleracea</i>	95
--	----

3.3.1 Difusão em disco.....	95
-----------------------------	----

3.3.2 Concentração Inibitória Mínima e Concentração Bactericida.....	97
--	----

CONCLUSÕES.....	99
------------------------	-----------

REFERÊNCIAS.....	100
-------------------------	------------

CAPÍTULO IV103

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
----------------------------------	------------

ANEXOS.....	106
--------------------	------------

LISTA DE ABREVIATÖES

CMC — Concentração Micelar Crítica

CIM — Concentração Inibitória Mínima

CBM — Concentração Bactericida Mínima

EOR — Enhanced Oil Recovery

FITR — Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier

IE — Índice de Emulsificação

LAS — Alquilbenzeno Sulfonato Linear

MEOR — Microbial-enhanced Oil recovery

RMN — Ressonância Magnética Nuclear

SDS — Dodecil Sulfato de Sódio

UCP — Universidade Católica de Pernambuco

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 — Representação da molécula surfactante com base em sua polaridade

Figura 2 — Representação da CMC e da formação de micelas

Figura 3 — Fotografias de *Acmella oleracea*

Figura 4 — Estrutura química do espilantol

CAPÍTULO II

Figura 1 — Curva de produção de biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivada em água destilada suplementada com 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual, a 28 °C, 200 rpm, 144 h

Figura 2 — Determinação da Concentração Crítica Micelar do biossurfactante produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 cultivada em meio suplementado com 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual, por 144 h a 200 rpm, com inóculo de 5% a 28 °C

Figura 3 — Dispersão de óleo de motor queimado pelo biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 e por SDS: (A) líquido metabólico livre de células; (B) ½ CMC; (C) 1 CMC; (D) 2 CMC; (E) SDS

Figura 4 — Espectro de ¹H RMN do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 1592

Figura 5 — Espectro de ¹³C RMN do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 1592

Figura 6 — Espectro FTIR do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 0992

Figura 7 — Percentual de remoção de óleo de motor queimado de tecidos de algodão usando biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592

Figura 8 — Avaliação da integridade estrutural de tecidos de algodão (A) tecido limpo e sem óleo; (B) tecido após lavagem

CAPÍTULO III

Figura 1 — Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier do extrato hexânico de *Acmella oleracea*

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 — Efeitos negativos de surfactantes na saúde humana

Tabela 2 — Empresas produtoras de surfactantes verdes e suas aplicações

Tabela 3 — Classes de surfactantes microbianos

Tabela 4 — Microrganismos produtores de biossurfactantes

Tabela 5 — Tipos de biossurfactantes e suas respectivas aplicações e funções industriais

Tabela 6 — Atividade antimicrobiana de extratos de *Acmella oleracea* contra diferentes patógenos

CAPÍTULO II

Tabela 1 — Estabilidade da tensão superficial do biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivado em água destilada suplementada com milhocina (2,5%) e óleo de fritura residual (5%) com variações de quantidade de NaCl, temperatura e pH

Tabela 2 — Estabilidade da emulsificação de óleo de motor pelo biossurfactante de *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivado em água destilada suplementada com milhocina (2,5%) e óleo de fritura residual (5%) com variações de quantidade de NaCl, temperatura e pH

CAPÍTULO III

Tabela 1 — Rendimento dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de *Acmella oleracea*

Tabela 2 — Atividade antimicrobiana do extrato bruto de *Acmella oleracea*

Tabela 3 — Concentração Inibitória Mínima e Concentração Bactericida Mínima do extrato de *Acmella oleracea*

RESUMO

A busca por compostos bioativos com potencial biotecnológico tem crescido significativamente, impulsionada pela necessidade de alternativas sustentáveis para aplicações industriais e biomédicas. Dentre esses compostos, os biossurfactantes e os extratos vegetais destacam-se por suas propriedades químicas e funcionais, permitindo aplicações em diversos setores. Este trabalho abordou a produção de biossurfactante por *Candida guilliermondii* UCP 1592, sua aplicação na remoção de óleo e a avaliação do extrato de *Acmella oleracea* (jambu) contra microrganismos resistentes. A produção de biossurfactante foi realizada pela levedura *C. guilliermondii* UCP 1592 em meio contendo milhocina (2,5%) e óleo residual de fritura (5%), durante 144 horas a 200 rpm. Após essa etapa foi realizada a caracterização, avaliação da estabilidade, toxicidade e aplicação na remoção de óleo. A tensão superficial obtida foi de 30 mN/m, com uma Concentração Micelar Crítica (CMC) de 0,3 g/L e um rendimento de 18 g/L. Testes em condições extremas de pH, temperatura e NaCl indicaram a estabilidade do biossurfactante. As estruturas químicas do biossurfactante foram identificadas por Espectroscopia de infravermelho e Ressonância Magnética Nuclear, onde revelou a natureza de um ácido graxo. O biossurfactante de natureza aniônico não foi tóxico para *Tenebrio molitor* e *Artemia salina* e apresentou germinação superiores a 50% para sementes de *Solanum lycopersicon* e *Lactuca sativa*. Além disso, o biossurfactante destacou-se como um desengordurante ecológico, removendo 100% do óleo de motor de superfícies de vidro e atingindo até 91% de remoção em tecidos de algodão, dependendo da concentração utilizada. O potencial antimicrobiano dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de *Acmella oleracea* foi avaliado. O extrato hexânico demonstrou a maior atividade antimicrobiana e, por meio de análises de FTIR, foi identificada uma composição rica em lipídios, compostos fenólicos e espilantol, substâncias conhecidas por suas propriedades antimicrobianas. Ensaio de difusão em disco evidenciaram que *Candida guilliermondii* e *Candida albicans* exibiram os maior sensibilidade ao extrato, enquanto *Bacillus cereus* e *Staphylococcus aureus* também foram altamente sensíveis. Nas análises de Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM), o extrato mostrou forte atividade antifúngica contra *C. albicans* e *C. guilliermondii*. Para bactérias Gram-positivas, *S.*

aureus e *B. cereus* destacaram-se como sensíveis, enquanto *Pseudomonas aeruginosa* apresentou maior resistência. Os resultados obtidos destacam o potencial do biossurfactante como uma alternativa sustentável para aplicações industriais, especialmente em processos de limpeza e remoção de óleos. Além disso, evidenciam a eficácia do extrato hexânico de *Acmella oleracea* como agente antimicrobiano, com atividade significativa contra leveduras e bactérias Gram-positivas, reforçando sua relevância na busca por alternativas naturais para o combate à resistência antimicrobiana. Em conjunto, os estudos apresentados reafirmam a importância de explorar compostos naturais e biotecnológicos como soluções sustentáveis para desafios ambientais e de saúde pública, ampliando o leque de aplicações práticas e ecológicas em diversos setores.

Palavras-chave: biossurfactantes; tensoativos biodegradáveis; *Acmella oleracea*; sustentabilidade; biotecnologia.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação global com os impactos ambientais gerados pelos setores industriais, aliada à conscientização sobre práticas sustentáveis, reciclagem e reaproveitamento de resíduos, tem impulsionado o desenvolvimento de novos processos biotecnológicos que atendam às demandas do mercado com baixa toxicidade, biodegradabilidade e alta eficiência (Araújo *et al.*, 2019). Nesse contexto, biossurfactantes e extratos vegetais surgem como alternativas promissoras, tanto na substituição de compostos químicos agressivos quanto na busca por novas abordagens terapêuticas (Yumnam; Gyanendra; Singh, 2024; Câmara *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes são moléculas anfipáticas produzidas por microrganismos, capazes de reduzir a tensão superficial e interagir com substâncias hidrofóbicas, o que os torna valiosos para aplicações industriais e ambientais. Em comparação com os surfactantes sintéticos, esses compostos apresentam vantagens como menor toxicidade, maior biodegradabilidade e eficácia na remoção de óleos e contaminantes em diferentes superfícies (Markande; Patel; Varjani, 2021). Além disso, sua aplicação na sanitização e limpeza contribui para a redução da poluição causada pelo descarte inadequado de produtos de limpeza convencionais, que podem comprometer a qualidade da água e do solo (Sarubbo *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

Paralelamente, a crescente disseminação da resistência antimicrobiana tem se tornado um dos maiores desafios para a saúde pública. O uso indiscriminado de antibióticos na pecuária, na aquicultura e na medicina, agravado pela falta de uma gestão eficaz desses fármacos, tem acelerado a seleção de microrganismos multirresistentes (MDR). Estima-se que, até 2050, a resistência antimicrobiana possa tornar ineficazes diversos tratamentos atualmente disponíveis, caso não sejam desenvolvidas novas abordagens terapêuticas (Caioni *et al.*, 2024; Polly *et al.*, 2022). Diante desse cenário, os extratos vegetais ricos em metabólitos bioativos têm ganhado destaque como potenciais agentes antimicrobianos, oferecendo compostos naturais com atividade contra microrganismos patogênicos (Nasim; Sandeep; Mohanty, 2022).

A planta *Acmella oleracea* (jambu) contém compostos bioativos de interesse farmacológico, incluindo espilantol, flavonoides e compostos fenólicos, que

apresentam propriedades antimicrobianas e anti-inflamatórias. Estudos demonstram que seus extratos podem ser eficazes contra bactérias e fungos, tornando-se uma alternativa viável na busca por novas substâncias naturais com ação antimicrobiana (Liu; Prentice; Webber, 2024).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo a produção e caracterização de um biossurfactante microbiano, avaliando sua aplicação na remoção de óleo, bem como a investigação do potencial antimicrobiano do extrato hexânico de *Acmella oleracea*. Essa abordagem integrada visa contribuir tanto para o desenvolvimento de produtos de limpeza sustentáveis quanto para a busca por alternativas naturais no combate à resistência antimicrobiana.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar compostos bioativos na remoção de óleo e como agente antimicrobiano frente a microrganismos resistentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir o biossurfactante por *Candida guilliermondii* UCP 1592 em meio contendo resíduos industriais;
- Determinar a tensão superficial e emulsificação do biossurfactante;
- Determinar a Concentração Micelar Crítica;
- Avaliar a estabilidade do biossurfactante;
- Caracterizar estruturalmente o biossurfactante;
- Avaliar a toxicidade do biossurfactante;
- Avaliar o potencial de remoção de composto oleoso de superfícies;
- Extrair e isolar composto de extrato vegetal de *Acmella oleracea*;
- Determinar a atividade antimicrobiana do extrato.

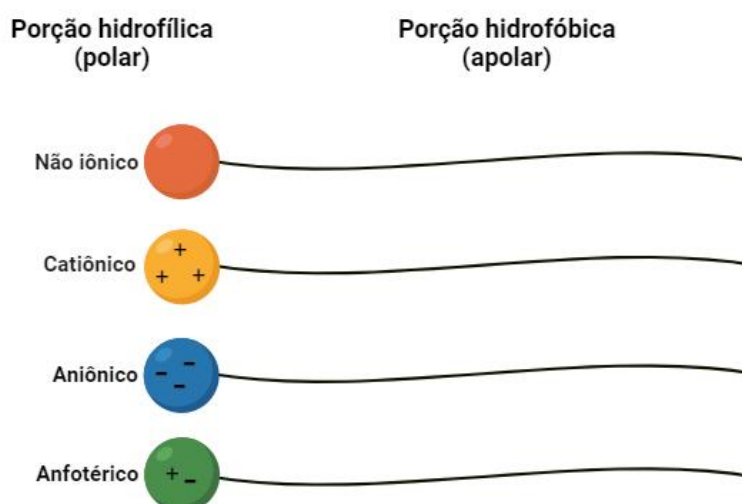
3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 SURFACTANTES

Surfactante é uma junção das palavras *surface-active-agent*, termo criado a partir das características funcionais de substâncias com propriedades tensoativas. São moléculas anfifílicas que consistem em uma porção hidrofílica ligada a uma longa cadeia hidrofóbica e, devido suas características e variedade química, são empregados em diversos setores industriais (Lavanya; Machado, 2024).

Os tipos de surfactantes se distinguem com base em sua polaridade (Figura 1), sendo classificados em iônicos ou não iônicos. Os iônicos são divididos em aniônicos (carregados negativamente em sua porção hidrofílica), catiônicos (carregados positivamente em sua porção hidrofílica) e, anfotéricos ou *zwitteriônicos* (apresentam duas cargas distintas e opostas em locais adjacentes ou não adjacentes). A parte apolar de um surfactante é composta, em geral, por ácido graxo de cadeia longa, ácido graxo hidroxílico ou ácido graxo α -alquil- β -hidroxi, enquanto a parte polar pode ser constituída por carboidratos, aminoácidos, peptídeos cíclicos, fosfato, ácidos carboxílicos ou álcoois. Essa classificação contribui significativamente para a determinação da aplicação do composto (Shaban; Kang; Kim, 2020; Agger; Zeuner, 2022).

Figura 1 — Representação da molécula surfactante com base em sua polaridade



Fonte: adaptado de Kalam *et al.*, 2021

Os surfactantes aniônicos, em particular, são amplamente empregados em detergentes, destacando-se exemplos como o Dodecil Sulfato de Sódio (SDS) e o Alquilbenzeno Sulfonato Linear (LAS). Esses são regularmente utilizados em detergentes para roupas, produtos de limpeza doméstica, e encontram aplicações na indústria cosmética, farmacêutica, bem como na remoção de hidrocarbonetos do solo. Comumente, os surfactantes aniônicos são os mais disponíveis entre os produzidos sinteticamente e naturalmente. Por outro lado, surfactantes catiônicos são frequentemente empregados em amaciantes de roupa e como condicionadores de cabelo. Isso ocorre porque as superfícies de roupas e cabelos geralmente apresentam carga negativa, facilitando a adsorção do surfactante. Como resultado, as moléculas adsorvidas modificam a textura da superfície, conferindo-lhe uma sensação mais suave (Johnson *et al.*, 2021; Sarubbo *et al.*, 2022).

Já os surfactantes anfotéricos exibem comportamentos distintos em ambientes ácidos e básicos. Em meios ácidos, atuam como surfactantes catiônicos, enquanto em ambientes básicos desempenham o papel de surfactantes aniônicos, demonstrando uma notável variação em sua resposta química (Lavanya; Machado, 2024).

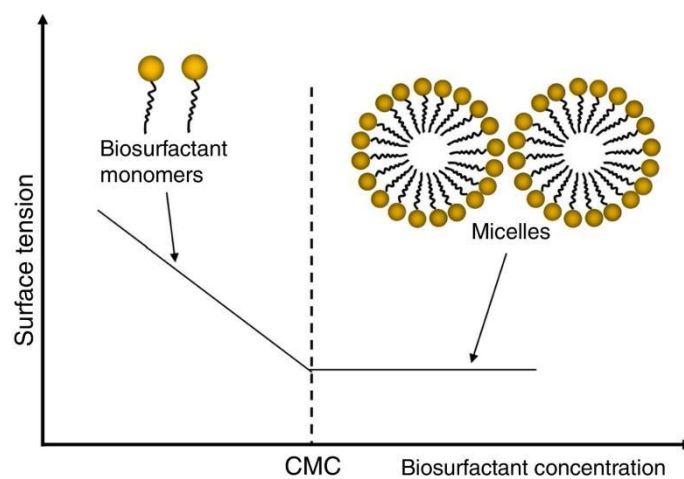
Por sua vez, os surfactantes não-iônicos, que são caracterizados por não possuírem cargas elétricas em sua estrutura, são normalmente usados como co-tensoativos para melhorar a compatibilidade do surfactante iônico. São amplamente utilizados como emulsificantes, agentes umectantes e agentes estabilizantes de espuma (Johnson *et al.*, 2021; Lavanya; Machado, 2024).

Os surfactantes são basicamente definidos por duas principais propriedades concomitantes: 1) a diminuição da tensão superficial e interfacial de fluidos, facilitando as interações entre moléculas de polaridade diferentes, como por exemplo, misturas de água/óleo e 2) micelização (Johnson *et al.*, 2020).

A caracterização mais eficaz de um surfactante envolve a mensuração da força de atração entre as moléculas de líquidos, permitindo a classificação do surfactante com base em sua capacidade de influenciar as tensões superficiais e interfaciais. Surfactantes eficientes demonstram a habilidade de reduzir as tensões superficiais, facilitando as interações entre moléculas de diversas naturezas polares (Sarubbo *et al.*, 2023).

No fenômeno da micelização, que representa uma característica crucial dos surfactantes, ocorre a formação de micelas (Figura 2). Essa propriedade está intrinsicamente ligada à habilidade das porções hidrofílicas e hidrofóbicas dos surfactantes de se organizarem em soluções. Durante esse processo, as moléculas de surfactante se agregam, originando diferentes tipos micelares. Em soluções com solventes polares, as porções hidrofílicas orientam-se para a fase aquosa, enquanto as porções hidrofóbicas ocupam a parte interna da micela. Em contraste, em presença de fases oleosas, as porções hidrofílicas residem internamente, enquanto as porções hidrofóbicas se posicionam externamente.

Figura 2 — Representação da CMC e da formação de micelas



Fonte: Akbari *et al.*, 2018

A Concentração Micelar Crítica (CMC) é estabelecida como a concentração mínima necessária de surfactante para alcançar a máxima redução da tensão superficial. A CMC, portanto, serve como um parâmetro de referência crucial para a concentração efetiva do surfactante. Esse valor não apenas possibilita a comparação direta do desempenho entre diferentes tipos de surfactantes, mas também determina a concentração mínima essencial para que o produto cumpra sua função de maneira eficaz, ou seja, alcançando a menor tensão superficial estável (Johnson *et al.*, 2020; Turchi; Karcz; Andersson, 2022). A Figura 2 ilustra, de maneira objetiva, o conceito explicado sobre a concentração micelar crítica.

3.1.2 Implicações relacionadas ao uso de surfactantes químicos

Embora existam surfactantes comerciais derivados de fontes consideradas ambientalmente mais amigáveis, com origem animal, microbiológica ou vegetal, a produção predominante ainda é baseada em petroquímicos, o que possibilita uma produção de baixo custo e alto rendimento. Os surfactantes sintéticos são amplamente empregados em diversas indústrias, porém, seu uso está associado a impactos ambientais adversos significativos, apresentando problemas de toxicidade e biocompatibilidade, causando danos aos ecossistemas e restringindo ainda mais sua aplicação (Sarubbo *et al.*, 2022).

Tabela 1 — Efeitos negativos de surfactantes na saúde humana

Surfactante	Consequências para a saúde humana
4-nonylphenol - NP	Classificado como produto químico disruptor endócrino
4-tert-octylphenol - OP	Tumores cancerígenos, distúrbios reprodutivos, distúrbios do sistema imunológico e obesidade
Triton X-100 - TX-100	Potencialmente, pode produzir irritações graves
Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate - SDBS	Absorvido pela pele, danifica o fígado e causa estreitamento e outros sintomas crônicos; teratogênico e cancerígeno
Linear Alkylbenzene Sulfonate - LAS	Irritação na pele e problema no sistema respiratório. Pode gerar subprodutos cancerígenos e tóxicos quando degradado
Sodium dodecyl sulfate - SDS	Inibe a atividade ATPase da glicoproteína P, danifica as estruturas da membrana e inicia a resposta ao estresse oxidativo
Perfluorooctanoic Acid - PFOA	Possíveis compostos cancerígenos e agentes potencialmente tóxicos para a reprodução humana
Perfluoroalkyl Carboxylates - PFCAs	Efeitos hormonais e de desenvolvimento, imunotoxicidade e promoção do crescimento tumoral em roedores através do seu papel como agonistas do PPAR α

Fonte: Adaptado de Collivignarelli *et al.*, 2019

Estima-se que aproximadamente 60% dos surfactantes sintéticos acabam por ser introduzidos em ambientes aquáticos, resultando em sérios danos à fauna e flora desses ecossistemas. A poluição de recursos hídricos por surfactantes, incluindo corpos de água doce, tem se tornado uma preocupação crescente devido à sua liberação por indústrias e áreas urbanas em escala global (Akbari *et al.*, 2018; Johnson *et al.*, 2021). A capacidade desses poluentes de serem solúveis em água resulta em sua persistência no ambiente por períodos prolongados, agravando os problemas ambientais e impactando negativamente a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos (Jena; Dutta; Daverey, 2023).

A presença de surfactantes em águas cinzas é considerado um problema emergente devido ao seu potencial de causar riscos à saúde humana. Entre os problemas gerados, estão a disfunção endócrina, distúrbios do sistema reprodutivo, respiratório e imunológico, além do potencial teratogênico e cancerígeno (Collivignarelli *et al.*, 2019). A Tabela 1 detalha alguns principais tipos de surfactantes químicos e os seus diversos efeitos negativos à saúde humana.

Os surfactantes contribuem para a formação de espuma nos rios, resultando na eutrofização de lagos e estações de tratamento (Shreya *et al.*, 2021). Eles promovem esse processo ao aumentar a solubilidade dos contaminantes, o que pode levar ao aumento da solubilidade de certos poluentes nos sistemas hídricos, representando, inclusive, uma ameaça para espécies planctônicas. A presença exacerbada desses compostos também podem afetar o crescimento e a capacidade fotossintética das algas, bem como causar efeitos patológicos, fisiológicos e bioquímicos em animais aquáticos, além de reduzir a transferência de oxigênio entre a interface ar/água. Quando os surfactantes estão presentes na água em concentrações acima de um determinado limiar, há uma redução na qualidade da água, causando sabor e odor desagradáveis e provocando mudanças de curto e longo prazo nos ecossistemas. Além disso, os surfactantes podem agir sinergicamente com outros compostos tóxicos presentes na água (Siyal *et al.*, 2020; Jena; Dutta; Daverey, 2023).

Devido às suas propriedades antimicrobianas, os surfactantes também podem comprometer a eficácia dos microrganismos empregados na remoção de poluentes e decomposição do lodo de esgoto, consequentemente resultando em níveis mais elevados de poluição ambiental (Johnson *et al.*, 2021).

3.2 BIOSSURFACTANTES

Com o avanço da biotecnologia nas últimas décadas, aliado à crescente busca por alternativas ecologicamente sustentáveis e seguras, tem ocorrido o impulsionamento de pesquisas e desenvolvimento para a produção de biossurfactantes, focando em alternativas que tornem tal produção competitiva com o mercado. Este interesse é motivado pela sua utilização potencialmente eco-amigável em uma ampla variedade de usos, oferecendo alternativas industriais viáveis e substituindo eficientemente seus equivalentes de origem sintética. Este cenário reflete não apenas a crescente consciência ambiental, indo de encontro aos Objetivos Sustentáveis das Nações Unidas, mas também a adaptação da indústria para atender às demandas contemporâneas de sustentabilidade e promover uma economia verde sustentável (Sarubbo *et al.*, 2022; Qamar; Pacifico, 2023; Yumnam; Gyanendra; Singh, 2024)

Biossurfactantes emergem como produtos da biossíntese do metabolismo secundário de diversos sistemas biológicos, como bactérias, fungos e leveduras. Eles são sintetizados no final da fase de crescimento exponencial desses microrganismos, sendo secretados extracelularmente ou permanecendo aderidos às superfícies celulares (Banat *et al.*, 2021; Shaji *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes têm recebido considerável atenção devido às suas características notáveis e promissoras, que incluem biodegradabilidade, toxicidade reduzida, diversidade estrutural e capacidade de demonstrar atividade superficial. Além disso, eles mantêm sua estabilidade mesmo em condições extremas de pH, temperatura e altas concentrações salinas (Datta *et al.*, 2024).

Considerando a ampla gama de funcionalidades dos biossurfactantes, que abrangem não apenas a detergência, formação de espuma e emulsificação, mas também a biorremediação de metais pesados e hidrocarbonetos, a síntese e estabilização de nanopartículas, a lubrificação, a dispersão e solubilização de compostos hidrofóbicos, essas moléculas demonstram uma versatilidade surpreendente. Sua aplicabilidade se estende por diversos setores, desde a indústria cosmética até aprimoramentos na recuperação de petróleo. Além disso, os biossurfactantes desempenham um papel crucial na sustentabilidade ambiental, oferecendo soluções inovadoras para desafios como a contaminação por poluentes orgânicos e inorgânicos em diferentes ambientes. Com sua capacidade de substituir

produtos químicos convencionais por alternativas mais ecologicamente corretas e eficazes, esses compostos estão se destacando cada vez mais como uma ferramenta promissora em diversas aplicações industriais e ambientais (Geetha; Banat; Joshi, 2018; Jahan *et al.*, 2020; Mishra *et al.*, 2021; Abbot *et al.*, 2022; Sondhi, 2023; Mahanty *et al.*, 2024; Ali *et al.*, 2024; Chabhadiya *et al.*, 2024).

Estima-se que o mercado de biossurfactantes experimente um crescimento robusto, com uma taxa de expansão de 11,0%, atingindo a marca de US\$2,3 bilhões até 2028, partindo de US\$1,3 bilhão em 2023. Esse crescimento é primariamente impulsionado pela crescente demanda por produtos sustentáveis e naturais, especialmente focados em cuidados pessoais e cosméticos. Embora em ascensão em diversos continentes, a Europa se destaca como líder em pesquisa e produção de surfactantes verdes, seguida pela América do Norte e Ásia, onde empresas proeminentes e já consolidadas no mercado global têm forte presença (Market and Markets, 2023). A Tabela 2 lista empresas que fabricam surfactantes verdes e suas aplicações específicas em produtos sustentáveis.

Tabela 2 — Empresas produtoras de surfactantes verdes e suas aplicações

Empresa/País	Biossurfactante	Aplicação
Evonik – Alemanha	Ramnolipídeos, soforolipídeos	Cosméticos, produtos de limpeza, líquidos para lavar louça
TeeGene Biotech – Reino Unido	Ramnolipídios, lipopeptídeos	Produtos farmacêuticos, cosméticos, antimicrobianos e ingredientes anticancerígenos
Jeneil Biosurfactant – USA	Ramnolipídeo	Limpeza e recuperação de óleo de tanques de armazenamento, EOR
Rhamnolipid Companies – USA	Ramnolipídeo	Agricultura, cosméticos, EOR, biorremediação, produtos alimentícios, produtos farmacêuticos
TensioGreen – USA	Ramnolipídeo	Indústria petrolífera, limpeza e recuperação de óleo de tanques de armazenamento, EOR
Cognis (BASF) – Germany – USA	Surfactante verde Alquil poliglicosídeos (APG) –0810-65	Shampoo, sabonete líquido; lavagem facial; sabão de mão líquido; lenços umedecidos, lavanderia, limpeza de superfícies duras
Paradigm Biomedical Inc – USA	Ramnolipídeo	Produtos farmacêuticos
Logos Technologies – USA	Ramnolipídeo	Indústria petrolífera, limpeza e recuperação de óleo de tanques de armazenamento, EOR
Allied Carbon Solutions (ACS) Ltd – Japão	Soforolipídeos	Produtos agrícolas, pesquisa ecológica
Saraya Co. Ltd. – Japão	Soforolipídeos	Produtos de limpeza, produtos de higiene
Kaneka Corporation – Japão	Surfactina sódica	Cosméticos
Kanebo Cosmetics Inc. – Japão	Manosileritritol lipídio B (MEL-B)	Cosméticos
BioFuture – Irlanda	Ramnolipídeo	Lavagem de tanques de combustível
EcoChem Organics Company – Canadá	Ramnolipídeo	Dispersante de hidrocarbonetos insolúveis em água
Ecover Eco-Surfactant – Bélgica	ACS-Sophor/Soforolipídeo	Recuperação e processamento de petróleo, EOR; agente de remoção de biofilme, inibidor de crescimento de biofilme; ação detergente
Sabo S.p.A. – Itália	Surfactina sódica	Cosméticos
Soliance – França	Sopholiance S (Soforolipídeos)	Cosméticos e produtos farmacêuticos
Lipofabrik – França	Lipopeptídeos	Produtos farmacêuticos
ZFA Technologies Inc. – China	BERO™ (Biosurfactant Enzyme for Recovery of Oil)	Produtos de limpeza, produtos de higiene, recuperação avançada de petróleo (EOR)

Urumqi Unite Bio- Technology Co. Ltd. – China	Ramnolipídeo	Limpeza e recuperação de óleo de tanques de armazenamento, EOR
Soft Chemical Laboratories – Áfrida do Sul	Surfactina	Produtos de limpeza, detergentes
MG Intobio Co. Ltd. – Coreia do Sul	Sopholine (Soforolipídeos)	Cosméticos

Fonte: adaptado de Farias *et al.* (2021) e Sarubbo *et al.* (2022)

3.2.1 Classificação dos biossurfactantes

Enquanto os surfactantes químicos são comumente caracterizados com base em sua respectiva polaridade, os biossurfactantes são categorizados, sobretudo, com base em sua origem microbiana, peso molecular e modo de ação (Drakontis; Amin, 2020; Chabhadiya *et al.*, 2024).

Os biossurfactantes são classificados de acordo com sua composição química, geralmente apresentando uma porção hidrofílica composta por aminoácidos, peptídeos, mono-, di- ou polissacarídeos, e uma porção hidrofóbica constituída por diferentes comprimentos de cadeias de ácidos graxos (Sharma; Sundar; Srivastava, 2021).

Além disso, sua classificação também considera a massa molecular, a qual varia de 500 Da a 1500 Da, sendo classificados como agentes tensoativos de baixo peso molecular (como glicolipídeos, lipopeptídeos e fosfolipídios), os quais são reconhecidos por reduzir a tensão superficial; e tensoativos de alto peso molecular (lipoproteínas, lipopolissacarídeos, heteropolissacarídeos, ácidos graxos e lipídios neutros), os quais demonstram maior eficácia na formação de emulsões estáveis de óleo/água, sendo denominados de bioemulsificantes (Drakontis; Amin, 2020; Balakrishnan *et al.*, 2023). A Tabela 3 detalha a classificação molecular dos biossurfactantes de acordo com suas classes e subclasses.

Compostos biotensoativos de alto e baixo peso molecular têm uma vasta gama de aplicações, incluindo cuidados pessoais, domésticos, agroquímicos, biorremediação, recuperação microbiana aprimorada de petróleo (MEOR), têxteis e biomédicas. Atualmente, eles são amplamente utilizados em produtos domésticos e de cuidados pessoais, com destaque para soforolipídios em produtos de limpeza e higiene, e ramnolipídios e lipídios manosileritritol em cosméticos e produtos de higiene pessoal (Salek; Euston, 2019; Twigg *et al.*, 2021; Kraus *et al.*, 2024).

Os ramnolipídeos, por exemplo, são biossurfactantes produzidos principalmente por bactérias da espécie *Pseudomonas aeruginosa*, consistindo em mono e dissacarídeos de ramnose ligados por ligações glicosídicas a moléculas de ácidos graxos β -hidroxi. São capazes de reduzir a tensão superficial da água de 72 mN/m para cerca de 30-25 mN/m, o que os torna excelentes tensoativos (Markam *et al.*, 2024).

Tabela 3 — Classes de surfactantes microbianos

Classe	Subclasses de biossurfactante
Glicolípídeo	Ramnolipídios
	Soforolipídios
	Trehalolipídios
	Lipídios manosileritritol
Lipopeptídeos e lipoproteínas	Viscosina
	Serrawettin
	Polimixina
	Gramicidina
	Subtilisina
	Surfactina
	Peptídeo-lipídio
Ácidos graxos, lipídios neutros e fosfolipídios	Ácidos graxos
	Fosfolipídios
	Lipídios neutros
Tensoativos poliméricos	Emulsão
	Alasca
	Biodispersan
	Lipomana
	Liposan
	Proteína lipídica manana
	Carboidrato-lipídio-proteína
	Proteína PA
Surfactante particulado	Vesículas

Fonte: Adetunji & Olaniran, 2021

3.2.2 Microrganismos produtores de biossurfactantes

Ao longo dos anos, tem havido um esforço contínuo para identificar microrganismos com potencial de produzir surfactantes com fortes propriedades de atividade superficial e capacidade emulsificante. A produção de biossurfactantes depende não apenas do tipo de microrganismo, mas também de suas fontes de isolamento, que podem influenciar a eficiência e o rendimento. Esses microrganismos estão amplamente distribuídos na natureza e podem ser encontrados em diversos habitats, incluindo água, solo e ambientes extremos, como regiões com alta salinidade, temperaturas extremas e pH elevado. A exploração de microrganismos de ambientes adversos tem se mostrado promissora, pois eles frequentemente possuem mecanismos de adaptação que favorecem a produção desses metabólitos, com características específicas para diferentes aplicações industriais, ambientais e farmacêuticas (Adetunji; Olaniran, 2021).

Os biossurfactantes demonstram grande potencial devido, sobretudo, às suas variadas fontes e métodos de produção ecologicamente sustentáveis. Esses compostos são sintetizados por uma diversidade de microrganismos, como bactérias, fungos e leveduras, sendo produtos inerentes ao metabolismo e crescimento dessas espécies. As estruturas dos biossurfactantes são geralmente formadas intracelularmente e, em seguida, secretadas para o meio extracelular ou permanecem aderidas à superfície celular (Banat *et al.*, 2021; Chabhadiya *et al.*, 2024).

A variedade de microrganismos capazes de produzir biossurfactante é imensa, dentre bactérias (*Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Rhodococcus* sp., *Acinetobacter* sp.), leveduras (*Candida* sp., *Rhodotorula* sp.) e fungos (*Aspergillus* sp.) (Meneses *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2020; Gupta *et al.*, 2020; Othman *et al.*, 2022; Sankhyan *et al.*, 2024; Mousa *et al.*, 2024; Sanmartin *et al.*, 2024). O ambiente marinho, por exemplo, desponta como uma fonte promissora de diversidade microbiana com elevado potencial para a produção de biossurfactantes (Barros *et al.*, 2024; Rajitha; Nancharaiah; Venugopalan, 2024; Nalini *et al.*, 2021; Nayak *et al.*, 2020). Em contrapartida, ambientes contaminados também são fonte de microrganismos com potencial de produção de metabólitos, como solos contaminados por hidrocarbonetos (Rawat *et al.*, 2024; Du *et al.*, 2023; Balakrishnan *et al.*, 2022).

Esses microrganismos, quando cultivados em diferentes meios de cultura, com fontes de carbono e nitrogênio compatíveis com suas respectivas características e necessidades, tendem a produzir uma diversidade de metabólitos secundários com potencial surfactante, como apresentado na Tabela 4, onde vê-se a diversidade de microrganismos, entre bactérias, fungos e leveduras e as classes de biossurfactantes produzidos pelos mesmos (Qamar; Pacifico, 2023).

Entre os principais gêneros e espécies produtores de biossurfactantes, destacam-se as bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Bacillus*. Estudos recentes apontam várias espécies de *Pseudomonas* como promissoras na produção desses compostos, como *P. cepacia* CCT 6659, *P. syringae*, *P. aeruginosa*, *P. citronellolis* e *P. antarctica* 28E, que têm apresentado excelentes resultados na produção de tensoativos e emulsificantes naturais da classe dos ramnolipídios (Faccioli *et al.*, 2022; Haidar *et al.*, 2024; Sankhyan *et al.*, 2024; Varnava *et al.*, 2024; Ciurko *et al.*, 2024).

As leveduras também se destacam na produção de biossurfactantes, com espécies como *Candida albicans* e *Starmerella bombicola* sendo amplamente estudadas (Gaur *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2024b). Essas leveduras têm mostrado capacidade de produzir biossurfactantes, como soforolipídios, que possuem grande potencial para aplicações industriais devido às suas propriedades emulsificantes, de baixa toxicidade e biodegradabilidade (Aslam *et al.*, 2024).

O ramnolipídio produzido por *Bacillus velezensis* S2 apresentou excelente valor de tensão superficial, 30 mN/m, bem como mostrou atividade significativa de emulsificação e formação de espuma (Sultana *et al.*, 2024). O mesmo foi apresentado pelo glicolipídeo produzido por *Rhodotorula mucilaginosa* (LBP4), o qual apresentou potencial tensoativo com uma tensão superficial de 30,56 mN/m e capacidade emulsificante acima de 50% para óleo vegetal e de motor (Azevedo *et al.*, 2024).

A levedura produzida por *Pichia pseudolambica*, prospectada de sedimentos de mangue do nordeste brasileiro, apresentou potencial para aplicações na remediação de poluentes provenientes de hidrocarbonetos recalcitrantes (Silva *et al.*, 2024). Por sua vez, Barros *et al.* (2024) produziram um biossurfactante com propriedades emulsificantes, identificado como uma glicoproteína, a partir de cepas da levedura *Yarrowia lipolytica* LMS 24B isoladas de zoantídeos marinhos, que demonstrou um potencial emulsificante superior a 50%.

Tabela 4 — Microrganismos produtores de biossurfactantes

Microrganismo	Biossurfactante	Fonte
<i>Yarrowia lipolytica</i> LMS 24B	Glicoproteína	Barros <i>et al.</i> (2024)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> NG4	Ramnolipídio	Sankhyan <i>et al.</i> (2024)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> C11	Lipopeptídeos	Schalchli <i>et al.</i> (2023)
<i>Bacillus</i> sp. G6	Surfactina	Rawat <i>et al.</i> (2024)
<i>Pseudomonas citronellolis</i>	Lipopeptídeos	Varnava <i>et al.</i> (2024)
<i>Bacillus alveayuensis</i>	Surfactina	Argentin <i>et al.</i> (2023)
<i>Aeromonas salmonicida</i>	Lipopeptídeos	Kadiri <i>et al.</i> (2022)
<i>Pseudomonas antarctica</i> 28E	Lipopeptídeos	Ciurko <i>et al.</i> (2023)
<i>Klebsiella pneumoniae</i> ssp. ozaenae BK34	Glicolipopeptídeo	Kumar <i>et al.</i> (2024)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> JS29	Ramnolipídeo	Malakar <i>et al.</i> (2024)
<i>Paracoccus</i> sp. MJ9	Ramnolipídeo	Xu <i>et al.</i> (2020)
<i>Bacillus cereus</i> UCP 1615	Lipopeptídeos	Durval <i>et al.</i> (2020)
<i>Serratia marcescens</i> SMΔR	Lipopeptídeos	Chen <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autora, 2024

3.2.3 Valorização de resíduos na produção de biossurfactantes

A produção de biossurfactantes é fortemente influenciada por fatores como a disponibilidade de nutrientes, especialmente a relação entre carbono e nitrogênio, além das condições operacionais, como temperatura, pH do meio, aeração, agitação, bem como o tempo de fermentação. Assim, a otimização dessas condições e a escolha de microrganismos adaptados a ambientes específicos são essenciais para maximizar a produção dessas biomoléculas (Qamar; Pacifico, 2023).

Os biossurfactantes microbiológicos são metabólitos secundários de bactérias, fungos ou leveduras e, para sua produção, uma variedade de substratos, incluindo substratos residuais provenientes de diversas indústrias, podem ser utilizados como fonte de carbono e nitrogênio, produzindo biossurfactantes com uma grande variedade de estruturas moleculares e diferentes atividades superficiais. A valorização desses resíduos renováveis é essencial, pois não só reduz a

dependência de materiais sintéticos mais caros, mas também oferece uma solução sustentável para o reaproveitamento de resíduos, contribuindo tanto para a economia quanto para a redução do impacto ambiental (Bezerra *et al.*, 2018; Jahan *et al.*, 2020).

Estudos recentes indicam que fontes de carbono não convencionais, como óleos residuais ou melaço, podem ser eficazes na produção de biossurfactantes, especialmente ao considerar microrganismos como *Pseudomonas aeruginosa* e *Bacillus subtilis*. O ajuste da relação carbono/nitrogênio é crucial para melhorar a produção, com experimentos mostrando que variações nos níveis de carbono e nitrogênio afetam diretamente a eficiência da biossíntese (Zhou *et al.*, 2023).

A utilização de substratos residuais como fonte de carbono e nitrogênio para a produção de biossurfactantes têm atraído grande interesse, tanto pela eficiência no processo quanto pelos benefícios ambientais e econômicos. Entre os substratos mais utilizados, destacam-se os óleos vegetais de diversas origens, como óleo de fritura residual (soja, girassol, algodão, milho), óleo de farelo de arroz, óleo de palma, resíduo de óleo de azeite, melaço, soro de leite, glicerol bruto, bagaço etc. Esses resíduos apresentam alta disponibilidade tornando-os fontes de carbono ideais para o metabolismo de microrganismos como bactérias, fungos e leveduras (Vučurović *et al.*, 2024; Gautam *et al.*, 2023).

Além de fornecer uma fonte de carbono acessível, o uso de óleos residuais em processos fermentativos oferece a vantagem de reduzir o custo de produção, que é um dos principais obstáculos à comercialização em larga escala dos biossurfactantes. Ao valorizar esses resíduos, é possível não só diminuir a dependência de insumos sintéticos caros, mas também promover uma abordagem mais sustentável, contribuindo para a economia circular. Ao mesmo tempo, esse reaproveitamento ajuda a mitigar o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses óleos, que podem gerar problemas de poluição em corpos d'água e solos (Markam *et al.*, 2024; Qamar; Pacifico, 2023).

Azevedo *et al.* (2024) investigaram a produção de biossurfactante pela levedura *Rhodotorula mucilaginosa* (LBP4), utilizando resíduos de cervejaria como fonte de carbono. Os resultados mostraram que o biossurfactante produzido demonstrou uma alta capacidade emulsificante para diversos substratos hidrofóbicos, como óleo de soja (64,4%), óleo de motor (62,2%), querosene (67,4%) e óleo diesel (56,81%). Além disso, o biossurfactante destacou-se por sua

estabilidade em condições extremas de temperatura, pH e salinidade, mantendo suas propriedades funcionais. Uma das principais características foi sua capacidade de reduzir significativamente a tensão superficial, passando de 71,26 mN/m para 30,56 mN/m, o que demonstra seu grande potencial de aplicação em diversos setores industriais, como o de remediação ambiental e processamento de petróleo.

Lima *et al.* (2024) utilizaram *Candida lipolytica* para a produção de biossurfactante em um meio contendo 4% de melaço e 2,5% de óleo de fritura residual como fontes de carbono. O biossurfactante produzido resultou em uma redução significativa da tensão superficial, de 72 mN/m para 25 mN/m. Além disso, o composto demonstrou alta capacidade emulsificante, com índices de emulsificação variando entre 88% e 92% para óleo de motor. Esses resultados destacam o potencial tensoativo e emulsificante do biossurfactante produzido. Já Silva *et al.* (2024) utilizando *Starmerella bombicola* ATCC 22214 para produção de um soforolípido em meio contendo óleo de canola, obteve redução da tensão superficial de 72 mN/m para 32,76 mN/m, bem como um rendimento de 23 g/L e emulsificação 96,25% para óleo de motor usado.

A utilização de fontes de nitrogênio residual ou de baixo custo na produção de biossurfactantes têm também se mostrado uma estratégia eficaz e sustentável. Vários estudos abordam esse tema, destacando a importância de aproveitar subprodutos agroindustriais como fontes de nitrogênio, o que pode reduzir significativamente os custos de produção. Em estudo conduzido por Taowkrue *et al.* (2024) utilizando extrato de levedura e farelo de soja, foi constatado melhoria na produção de soforolípídios por *Starmerella riodocensis*.

3.2.4 Aplicação dos biossurfactantes

Atualmente, os biossurfactantes são moléculas multifuncionais de relevância no século XXI. Sua notoriedade reside não apenas na abrangência de suas aplicações em diversas áreas, mas primordialmente na caracterização como moléculas "amigas do meio ambiente". Inseridos na categoria de "produtos verdes", esses compostos não apenas evitam impactos adversos à natureza, mas também se destacam como elementos de uma tecnologia biocompatível, sustentável e segura, alinhada às crescentes demandas por práticas ecologicamente responsáveis e conscientes (Jimoh; Lin, 2019).

Os biossurfactantes desempenham diversas funções, incluindo a redução das tensões superficial e interfacial, emulsificação, detergência, formação de espuma e umectação. Em virtude dessas propriedades, sua aplicabilidade se estende por uma gama de setores industriais, com aplicações primárias abrangendo a indústria do petróleo, farmacêutica, medicina, cosmética, alimentícia, têxtil, de papel e tintas. Esses compostos desempenham papéis cruciais na recuperação avançada de petróleo (MEOR), fabricação de detergentes, especialmente em produtos destinados à manutenção e limpeza doméstica, na agricultura, em bioprocessos industriais envolvendo microemulsões e biotransformações, nanotecnologia e aplicações ambientais, incluindo processos de dispersão de óleos e biorremediação de metais pesados de solos e águas residuais (Liu *et al.*, 2020; Chernyshova; Slabov; Kota, 2023; Datta *et al.*, 2024; Lourenço; Duarte; Ribeiro, 2024).

Além disso, os biossurfactantes são reconhecidos por sua natureza multifuncional, apresentando propriedades anti-adesivas, estabilizadoras, umectantes, emulsificantes e antimicrobianas. Essa versatilidade acrescenta uma camada adicional de valor aos biossurfactantes, ampliando ainda mais seu potencial de aplicação em diversos contextos científicos e industriais, como representado na Tabela 5 (Akbari *et al.*, 2018; Fenibo *et al.*, 2019; Jimoh; Lin, 2019; Sondhi, 2023; Chauhan *et al.*, 2023).

Tabela 5 — Tipos de biossurfactantes e suas respectivas aplicações e funções industriais

Biossurfactante	Indústria	Aplicação	Função
Ramnolipídios, soforolipídios e lipopeptídios	Petróleo	Recuperação aprimorada de petróleo em oleodutos	Emulsificação de óleos, redução da tensão interfacial, desemulsificação de emulsões de óleo, solubilização de óleos, redução de viscosidade, dispersão de óleos, umedecimento de superfícies sólidas, espalhamento, detergência, formação de espuma, inibição de corrosão em óleos combustíveis e equipamentos
Ramnolipídios, soforolipídios e lipopeptídios	Meio Ambiente	Biorremediação; operações de limpeza de derramamentos de óleo; remediação e lavagem de solo; tratamento de águas residuais; remediação de metais pesados; bioincrustação	Emulsificação e desemulsificação de óleos, redução da tensão interfacial, dispersão de óleos, solubilização de óleos, umectação, mobilização, espalhamento, detergência, formação de espuma, inibição de corrosão em óleos combustíveis e equipamentos; ligação, dessorção e mobilização de metais pesados
Glicolipídios e surfactantes poliméricos	Mineração	Operações de limpeza de metais pesados; remediação de solo; flotação; recuperação de metais pesados	Umectação e formação de espuma, coletores e espumantes, remoção de íons metálicos de soluções aquosas, solo e sedimentos, sequestrantes de metais pesados, espalhamento, inibição de corrosão em óleos
Ramnolipídios, soforolipídios e lipopeptídios	Agricultura	Biocontrole; fertilizantes; proteção de plantas	Umectação, dispersão, suspensão de pesticidas e fertilizantes em pó, emulsificação de soluções de pesticidas, facilitação de mecanismos de biocontrole de micróbios, eliminação de patógenos de plantas e aumento da biodisponibilidade de nutrientes para micróbios benéficos associados às plantas
Glicolipídios e surfactantes poliméricos	Alimentícia	Emulsificação	Solubilização de óleos aromatizados, controle de consistência, emulsificação, molhante, espalhamento, detergente, formação de espuma, espessante
Ramnolipídios, soforolipídios e lipopeptídios	Médica	Microbiológica; farmacêutica e terapêutica	Agentes antiadesivos, agentes antifúngicos, agentes antibacterianos, agentes antivirais, vacinas, terapia genética, moléculas imunomoduladoras

Soforolipídios, lipídios manosileritritol, ramnolipídios e lipopeptídeos	Cosméticos	Produtos de saúde e beleza	Emulsificantes, agentes espumantes, solubilizantes, agentes umectantes, limpadores, agentes antimicrobianos, mediadores da ação enzimática, propriedades antioxidantes, hidratantes, cicatrizantes e tonificantes da pele
Ramnolipídios, soforolipídios e lipídios manosileritritol	Limpeza	Detergentes	Detergentes e sanitizantes para lavanderia, umectação, formação de espuma, espalhamento, solubilização e inibição de corrosão
Biodispersante	Têxtil	Preparação de fibras; tingimento e estamparia; acabamento de têxteis	Umectação, penetração, solubilização, emulsificação, detergência e dispersão, umectação e emulsificação em formulações de acabamento, amaciamento
Ramnolipídios e lipopeptídeos	Nanotecnologia	Síntese de nanopartículas	Emulsificação, estabilização

Fonte: Adaptado de Sarubbo *et al.*, 2022

3.3 RESISTÊNCIA ANTIMICROBIANA

Os antibióticos, amplamente utilizados desde o início do século XX, quando foram descobertos, salvaram inúmeras vidas. No entanto, a crescente resistência antimicrobiana (RAM) tornou-se uma preocupação crítica na saúde, bem como em outras áreas, como a pecuária. Em 2019, a RAM bacteriana foi responsável por 1,27 milhão de mortes, superando AIDS e malária. Embora a resistência seja um fenômeno antigo, a exposição prolongada a antibióticos em ambientes clínicos e agrícolas favoreceu a disseminação de mutações e elementos genéticos de resistência, que afetam até mesmo antibióticos em fase de ensaio clínico (Bognár; Spohn; Lázár, 2024).

Assim, a resistência aos antimicrobianos foi reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como uma importante emergência mundial, prevendo-se que esta cause 10 milhões de mortes por ano até 2050, ultrapassando a estimativa de 8.2 milhões de mortes por câncer (WHO, 2023; Jim O'Neill, 2016).

A RAM ocorre quando microrganismos, como bactérias e fungos, desenvolvem a capacidade de sobreviver à exposição a antimicrobianos que antes os eliminavam. Esse processo de resistência é causado principalmente pelo uso excessivo e inadequado de antibióticos, tanto na medicina quanto na agricultura, o que gera pressão seletiva: apenas os microrganismos resistentes sobrevivem e se multiplicam. A seleção natural desempenha um papel fundamental nesse processo, pois os microrganismos com mutações vantajosas para resistir aos antimicrobianos têm maior probabilidade de sobreviver e transmitir esses genes resistentes (Caioni *et al.*, 2024; Liu; Prentice; Webber, 2024; Darby *et al.*, 2023).

Na saúde pública, a RAM representa uma ameaça crescente, uma vez que limita a eficácia de tratamentos para doenças infecciosas comuns, como pneumonias e infecções urinárias. Com a RAM, essas infecções se tornam mais difíceis de tratar, aumentando o risco de mortalidade, internações prolongadas e custos elevados para o sistema de saúde. Em nível econômico, a RAM é associada a perdas substanciais na produtividade e ao aumento dos gastos com terapias mais complexas, com projeções que indicam que, até 2050, o impacto econômico global da RAM poderá ultrapassar os 100 trilhões de dólares (Ferdinand *et al.*, 2023).

A prevenção da RAM requer estratégias globais e intersetoriais, abordando a administração prudente de antibióticos, tanto para humanos quanto para animais, além da promoção de boas práticas de higiene e saneamento (Naghavi *et al.*, 2024). Contudo, a implementação de políticas eficazes enfrenta desafios, como a variabilidade das regulamentações e o uso indiscriminado de antimicrobianos na agricultura. Dentro da abordagem "One Health", que integra saúde humana, animal e ambiental, é essencial reduzir o uso desnecessário de antimicrobianos em todas as áreas para evitar a propagação da resistência (Rahman; Hollis, 2023).

O desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos é crucial, mas enfrenta obstáculos devido ao alto custo e ao baixo retorno financeiro dessas pesquisas. Novas abordagens incluem o uso de terapias combinadas, o desenvolvimento de medicamentos com alvos moleculares inovadores e a exploração de alternativas, como a terapia bacteriófágica e o uso de produtos naturais (Caioni *et al.*, 2024; Igarashi, 2019). As pesquisas atuais buscam não apenas novos antibióticos, mas também alternativas que prolonguem a eficácia dos tratamentos existentes, o que é fundamental para lidar com a resistência e garantir que as infecções continuem

tratáveis no futuro (MacNair; Rutherford; Tan, 2024; Global AMR R&D Hub; OMS, 2023).

3.4 METABÓLITOS VEGETAIS

As plantas são fontes valiosas de produtos naturais com propriedades terapêuticas, historicamente usadas para tratamento de doenças em formas de chás e infusões. Esses compostos bioativos têm ação contra diversos patógenos e são a base de muitos medicamentos atuais, com vários metabólitos secundários já identificados e estudados por suas propriedades farmacológicas (Nasim; Sandeep; Mohanty, 2022).

Na indústria contemporânea, as plantas assumem um papel fundamental e versátil. A busca por alternativas naturais e sustentáveis ao uso de compostos sintéticos impulsionou uma nova valorização das plantas e de seus metabólitos secundários — compostos bioativos produzidos como defesa contra predadores e doenças. Esses metabólitos, como os alcaloides, flavonoides, terpenoides e compostos fenólicos, possuem propriedades antimicrobianas, antioxidantes e anti-inflamatórias, o que justifica seu uso crescente em indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética (Câmara *et al.*, 2024).

Recentemente, diversos estudos têm se dedicado a compreender e explorar as propriedades bioativas de diferentes espécies vegetais, com o objetivo de desenvolver produtos que atendam a uma demanda global por soluções naturais (Moureu *et al.*, 2023; Canli *et al.*, 2023; Sateriale *et al.*, 2022). No setor farmacêutico, por exemplo, plantas com atividade antimicrobiana são de particular interesse, dadas as preocupações com a resistência bacteriana e os efeitos colaterais associados ao uso prolongado de antibióticos (Angelini, 2024).

3.4.1 *Acmella oleracea*

Acmella oleracea (L.) RK Jansen, também conhecida como *Spilanthes acmella* Murr. ou *Spilanthes oleracea* L é uma planta de destaque conhecida por seu potencial medicinal (Aktar *et al.*, 2024). Sendo amplamente cultivada na América do Sul, é uma planta naturalmente distribuída e provavelmente originária da floresta amazônica, com destaque de sua ocorrência em países como México, Peru,

Bolívia e Brasil, neste, seu cultivo ocorre principalmente no Estado do Pará, na região Norte. Popularmente, é conhecida por nomes como jambu e agrião-do-Pará, abecedária, agrião-bravo, agrião-do-Brasil, agrião-do-norte, agrião selvagem, botão-de-ouro, erva-maluca e jabuaçu e nhambu (Maxim *et al.*, 2024; Moura *et al.*, 2023).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o jambu é classificado como uma hortaliça não convencional ou tradicional. Essa classificação deve-se à sua distribuição restrita a determinadas localidades ou regiões do Brasil, onde exerce significativa influência na alimentação e na cultura de populações tradicionais (Brasil, 2010).

A *A. oleracea* é uma angiosperma tropical da classe das dicotiledôneas, pertencente à família Asteraceae (Moura *et al.*, 2023). É uma planta herbácea de baixo crescimento, com caule cilíndrico, carnoso, decumbente e ramificado, variando de 20 a 30 cm de altura. Sua inflorescência é um capítulo globoso terminal de coloração amarela com flores hermafroditas; suas folhas e flores são amarelas (Figura 4) e causam leve formigamento e dormência na língua devido à presença de espilantol, que é uma alquilamida com diversas bioatividades de proteção vegetal, incluindo ação analgésica (Gomes *et al.*, 2020).

O cultivo do jambu ocorre em áreas próximas às residências rurais e é destinado principalmente ao consumo familiar e à venda do excedente em feiras livres. Por esse motivo, é considerada uma hortaliça doméstica de grande importância para a economia familiar de pequenos agricultores do norte do Brasil (Moura *et al.*, 2023).

Esta planta tem sido tradicionalmente usada em várias preparações culinárias locais da Amazônia, como “pato no tucupi” e “tacacá”, devido à sua capacidade de proporcionar um leve efeito anestésico e um sabor único e levemente picante. Também é amplamente utilizada como erva tradicional na medicina popular, devido a diversas propriedades farmacológicas, como anti-inflamatória, anestésica, analgésica, antioxidante, antipirética, inseticida, diurética e afrodisíaca, atribuídas à presença de espilantol e outros compostos (Kavallieratos *et al.*, 2023; Sharma; Arumugam, 2021; Gomes *et al.*, 2020).

Figura 3 — Fotografias de *Acmella oleracea*

Fonte: Yadav; Sharma; Saxena (2023)

3.4.2 Composição química de *Acmella oleracea*

Acmella oleracea já é conhecida por ser uma rica fonte de importantes compostos bioativos, como amidas, α - e β -amirínester, glicosídeos de álcool miricílico, sitosterol, saponinas, estigmasterol e triterpenos, que são atribuídos a diferentes atividades biológicas (Kavallieratos *et al.*, 2023).

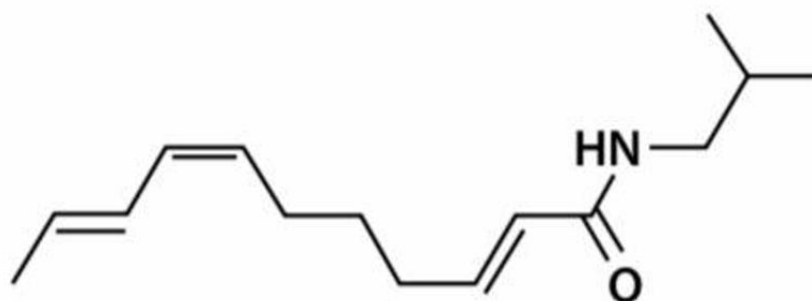
Pesquisas sobre as atividades biológicas do jambu destacam o espilantol como seu principal composto bioativo. Esse composto, uma alquilamida (alcaloide), está presente em todas as partes da planta do gênero *Acmella*, com maior concentração nas inflorescências. Biossinteticamente, o espilantol é formado a partir do ácido α -linolênico e do aminoácido valina, o que confere características hidrofílicas e lipofílicas devido à presença de uma amida relativamente polar e de um ácido graxo menos polar. Diversas espécies que contêm alquilamidas, pertencentes às famílias Asteraceae, Solanaceae e Piperaceae, têm sido amplamente utilizadas em medicamentos tradicionais. Assim, o uso medicinal destas plantas está diretamente relacionado ao espilantol, reconhecido como o principal responsável por sua bioatividade (Sharma; Arumugam, 2021).

As folhas do jambu apresentam os maiores teores de compostos fenólicos em comparação com outras partes da planta, como inflorescências e caule. Estudos identificaram quinze fenólicos presentes nas inflorescências do jambu (*Spilanthes oleracea*), com destaque para os flavonóis como compostos majoritários, seguidos por antocianinas e ácido hidroxicinâmico. Além disso, foram identificados seis compostos fenólicos na parte aérea da planta, incluindo folhas, inflorescências e

caule, em análises realizadas com *Spilanthes acmella* Murr. (Abey Siri *et al.*, 2019; Navarro-González *et al.*, 2019).

O espilantol, também conhecido como afinina, é uma das alquilamidas mais representativas da *Acmella oleracea*, destacando-se por suas atividades biológicas e seu efeito sensorial característico. Seu nome IUPAC é N-isobutil-2E,6Z,8E-decatrienamida, com fórmula molecular $C_{14}H_{23}NO$, sendo também encontrado em outras espécies como *Acmella ciliata*, *Acmella oppositifolia*, *Acmella radicans* e *Heliopsis longipes*. Trata-se de um composto anfifílico, possuindo uma amida relativamente polar e um ácido graxo menos polar, o que permite sua extração utilizando diferentes solventes, como metanol, etanol, CO_2 supercrítico ou hexano (Figura 5) (Stein, 2020).

Figura 4 — Estrutura química do espilantol



Fonte: Uthpala; Navaratne, 2021

3.4.3 Propriedades farmacológicas

Os extratos de *Acmella oleracea* apresentam importantes propriedades medicinais, como analgésicas, anestésicas locais, anti-inflamatórias e antioxidantes e antimicrobiana, além de apresentar atividade larvicida e inseticida (Kavallieratos *et al.*, 2023; Uthpala; Navaratne, 2020).

O efeito anti-inflamatório da *A. oleracea* está associado, principalmente, à presença de compostos bioativos como o espilantol, uma alquilamida com propriedades reconhecidas no combate à inflamação. Estudos indicam que o espilantol atua inibindo mediadores pró-inflamatórios, como as prostaglandinas, óxido nítrico (NO), citocinas e enzimas como a ciclooxygenase (COX) e a

lipoxigenase (LOX). Essa atividade é atribuída à sua capacidade de modular respostas imunológicas e de reduzir a produção de radicais livres (Jerônimo *et al.*, 2024).

Além disso, os extratos de *A. oleracea* têm demonstrado eficácia na diminuição de edemas e no alívio de processos inflamatórios agudos e crônicos em modelos experimentais. Esses efeitos tornam a planta uma potencial candidata para o desenvolvimento de fitoterápicos e produtos naturais destinados ao tratamento de condições inflamatórias, como artrite, lesões musculares e outras doenças associadas a processos inflamatórios exacerbados (Silva *et al.*, 2024)..

A presença de outros compostos, como flavonoides e fenólicos, nas folhas e inflorescências também contribui para a atividade anti-inflamatória, uma vez que possuem propriedades antioxidantes que ajudam a proteger os tecidos contra danos inflamatórios (Spinozzi *et al.*, 2021).

O extrato de *A. oleracea* tem sido amplamente estudado por suas propriedades no manejo da dor, especialmente devido ao efeito anestésico proporcionado pelo espilantol, uma alquilamida bioativa. Esse composto é conhecido por sua capacidade de promover uma sensação de formigamento e dormência, efeitos que têm sido utilizados para o alívio de dores de diversas origens, incluindo dores dentárias, articulares e musculares (Yein *et al.*, 2023; Dallazen *et al.*, 2022; Rondanelli *et al.* 2020).

O uso de extratos de *A. oleracea* como inseticida também têm sido investigados e oferecem uma alternativa mais sustentável e ecológica aos pesticidas químicos convencionais (Kavallieratos *et al.*, 2023; Benelli *et al.*, 2019). Os pesticidas sintéticos frequentemente causam impactos negativos no meio ambiente, como a contaminação do solo e da água, além de representarem riscos à saúde humana. Em contraste, os extratos de *A. oleracea* são biodegradáveis e podem ser aplicados de forma mais segura, promovendo uma agricultura mais sustentável (Boukouvala *et al.*, 2023).

A *Acmella oleracea* também tem se destacado como uma alternativa natural no controle de carrapatos, especialmente *Rhipicephalus microplus*, um dos principais vetores de doenças em animais. Diversos estudos demonstraram que extratos das partes aéreas da planta, como os extratos hexânico e metanólico, apresentam ação acaricida significativa, sendo capazes de induzir a mortalidade das larvas e afetar a oviposição e a eclodibilidade dos ovos. Além disso, compostos

como o espilantol, presentes na planta, têm mostrado eficácia no comprometimento dos processos digestivos e reprodutivos dos carrapatos, sugerindo o potencial de *A. oleracea* como uma alternativa sustentável para o manejo de ectoparasitas e o controle de doenças transmitidas por esses insetos (Oliveira *et al.*, 2016; Cruz *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2014).

3.4.3.1 Propriedades antimicrobianas

Acmella oleracea, conhecida por suas diversas propriedades terapêuticas, tem se destacado no campo da pesquisa por seu potencial antimicrobiano. Diversos estudos têm evidenciado a eficácia de extratos dessa planta contra uma ampla gama de microrganismos, incluindo bactérias patogênicas, fungos e até parasitas. Compostos bioativos presentes em suas partes aéreas, como espilantol, d-limoneno e outros, demonstraram propriedades antibacterianas, antifúngicas e anti-inflamatórias, tornando *A. oleracea* uma alternativa promissora para o desenvolvimento de agentes terapêuticos naturais. Seu uso tem sido explorado em várias áreas, desde a odontologia, no combate a patógenos orais como *Streptococcus mutans*, até na medicina tradicional, para o tratamento de infecções bacterianas e fúngicas, destacando seu potencial como recurso no controle de doenças infecciosas (Uthpala *et al.*, 2021).

Masevhe *et al.* (2015) investigaram, *in vitro*, a atividade antibacteriana e antifúngica de *Spilanthes acmella* contra patógenos do canal radicular, como *E. faecalis* e *C. albicans*, e compararam sua eficácia com o hidróxido de cálcio. Os resultados mostraram que o extrato de *S. acmella* apresentou boa atividade contra esses patógenos, frequentemente associados ao insucesso do tratamento endodôntico. Padhan *et al.* (2017) estudaram o efeito do óleo essencial de *A. oleracea* e do d-limoneno contra *Trichophyton rubrum*, observando atividade inibitória das enzimas relacionadas à síntese da parede celular.

Peretti *et al.* (2021) analisaram a atividade bactericida e antibiofilme de extratos aquosos e hidroetanólicos de *A. oleracea* contra *Streptococcus mutans*, observando que os extratos apresentaram resultados semelhantes ao gluconato de clorexidina 0,12%, indicando o potencial da planta como coadjuvante no controle da cárie dentária.

Bueno (2019) analisou a eficácia do extrato de *A. oleracea* na inibição das bactérias *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, obtendo 100% de inibição observado após 24 horas de incubação. No entanto, quando o extrato foi incorporado em composições de alginato e quitosana para a produção de filmes antimicrobianos, os resultados foram diferentes. Em todas as combinações testadas, *Escherichia coli* não apresentou inibição, e as demais bactérias também exibiram níveis de inibição significativamente mais baixos.

A tabela apresentada resume os estudos sobre a atividade antimicrobiana de diferentes extratos de *A. oleracea* contra uma variedade de patógenos. As pesquisas envolvem diversas partes da planta, como flores e folhas, e utilizam diferentes solventes para a obtenção dos extratos, como álcool, metanol, água e etanol. Os testes de atividade antimicrobiana incluem a determinação da concentração inibitória mínima (CIM) e da concentração bactericida mínima (CBM), além de métodos como difusão em disco e difusão em poço. Os patógenos testados incluem bactérias gram-positivas e gram-negativas, como *Streptococcus pyogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, entre outros, evidenciando o amplo espectro de ação antimicrobiana de *A. oleracea*. Os resultados indicam que a planta apresenta potencial como fonte de agentes antimicrobianos naturais, com atividades significativas contra vários microrganismos patogênicos.

Os achados descritos na literatura destacam o significativo potencial antimicrobiano de *Acmella oleracea* contra uma ampla gama de patógenos, incluindo bactérias gram-positivas e gram-negativas, como *Streptococcus pyogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, e *Pseudomonas aeruginosa*. Diversos estudos relataram que os extratos das flores e folhas da planta, quando extraídos com solventes como etanol e metanol, demonstraram notável atividade antibacteriana e antifúngica. As pesquisas indicam que a planta possui um bom espectro de ação contra patógenos frequentemente associados a infecções orais e outros distúrbios de saúde.

Tabela 6 — Atividade antimicrobiana de extratos de *Acmella oleracea* contra diferentes patógenos

Parte da planta	Solventes	Patógenos	Teste antimicrobiano	Fonte
Flores	Álcool	<i>Streptococcusuberis</i> , <i>S. pyogenes</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> (cepas NP23, LB25923, B24e NP38), <i>S.epidermidis</i> e <i>Enterococcus faecalis</i> ; <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27853, <i>Shigella flexneri</i> NP122	Difusão em disco, concentração inibitória mínima e concentração bactericida mínima	Alencar <i>et al.</i> (2020)
Folhas e flores	Clorofórmio, Hexano e Metanol	<i>Bacillus megaterium</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. cereus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Nocardia sp.</i> and <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Difusão em disco	Borate; Disale (2013)
Flores	Etanol, água, benzina	<i>taphylococcus aureus</i> , <i>Bacillussubtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonasaeruginosa</i>	Difusão em disco	Uthpala <i>et al.</i> (2021)
Folhas e caule	Água, etanol	<i>Streptococcus mutans</i>	Concentração inibitória mínima e concentração bactericida mínima	Peretti <i>et al.</i> (2021)
Toda a planta	Metanol	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 25923), <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922) e <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 27853)	Difusão em poço	Afza <i>et al.</i> (2023)
Toda a planta	Metanol	<i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. Coli</i>	Difusão em disco, concentração inibitória mínima e concentração bactericida mínima	Afza <i>et al.</i> (2022)
Folhas	Etanol	<i>Streptococcus mutans</i> (<i>S. mutans</i>), and <i>Lactobacillus fermentum</i> (<i>L. fermentum</i>), <i>Porphyromonas gingivalis</i> (<i>P. gingivalis</i>), <i>Capnocytophaga gingivalis</i> (<i>C. gingivalis</i>)	Difusão em poço, concentração inibitória mínima e concentração bactericida mínima	Shivananda <i>et al.</i> (2024)
Folhas, caule e flores	Etanol	<i>Streptococcus mutans</i> ATCC 51715; <i>Porphyromonas gingivalis</i> ATCC 33277	Concentração inibitória mínima e concentração bactericida mínima	Villalobos <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autora, 2024

Esses resultados publicados sugerem que *A. oleracea* é uma fonte promissora de compostos antimicrobianos naturais, com grande potencial para o

desenvolvimento de novos tratamentos terapêuticos, especialmente frente ao crescente problema da resistência bacteriana. Assim, a literatura corrobora a viabilidade de *A. oleracea* como uma alternativa eficaz para o desenvolvimento de medicamentos naturais com propriedades antimicrobianas.

REFERÊNCIAS

ABBOT, V. *et al.* A review on the physicochemical and biological applications of biosurfactants in biotechnology and pharmaceuticals. **Heliyon**, v. 8, n. 8, e10149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10149>

ADETUNJI, A. I.; OLANIRAN, A. O. Production and potential biotechnological applications of microbial surfactants: An overview. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 1, p. 669–679, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.058>

AFZAL, A. *et al.* *Spilanthes acmella* extract-based natural oils loaded emulgel for anti-microbial action against dermatitis. **Gels**, v. 9, n. 10, p. 832, 2023. <https://doi.org/10.3390/gels9100832>

AGGER, J. W.; ZEUNER, B. Bio-based surfactants: enzymatic functionalization and production from renewable resources. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 78, 102842, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102842>

AKBARI, S. *et al.* Biosurfactants—a new frontier for social and environmental safety: a mini review. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 2, n. 1, p. 81–90, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2018.09.001>

AKTAR, M. A. *et al.* Pharmacological and phytochemical review of *Acmella oleracea*: A comprehensive analysis of its therapeutic potential. **Discovery and Applied Science**, v. 6, p. 412, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06108-5>

ALBASRI, H. M. *et al.* Production and characterization of rhamnolipid biosurfactant from thermophilic *Geobacillus stearothermophilus* bacterium isolated from Uhud mountain. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, 2024. [10.3389/fmicb.2024.1358175](https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1358175)

ALENCAR, G. S. *et al.* Estudo do potencial antimicrobiano de *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen contra cepas padrões de importância veterinária e humana. In: **Farmacologia Aplicada à Enfermagem: Aspectos Teóricos e Práticos**, capítulo 6, p. 87-100, 2021. DOI: 10.37885/210203397

ALI, A. *et al.* Biosurfactants as an alternative eco-friendly solution for water-in-diesel emulsions-A review paper. **Heliyon**, v. 10, n. 17, e37485, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37485>

ANGELINI, P. Plant-derived antimicrobials and their crucial role in combating antimicrobial resistance. **Antibiotics**, v. 13, n. 8, 2024.

ARGENTIN, M. N. *et al.* Biosurfactant from a thermo-halophilic strain of *Bacillus alveayuensis* isolated from a Brazilian oil reservoir: Production, chemical

characterization, antimicrobial activity, and efficiency in wettability reversal and oil removal from oil-soaked sand. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 231, 212324, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212324>

ASHITHA, A.; RADHAKRISHNAN, E. K.; MATHEW, J. Characterization of biosurfactant produced by the endophyte *Burkholderia* sp. WYAT7 and evaluation of its antibacterial and antibiofilm potentials. **Journal of Biotechnology**, v. 313, p. 1–10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.03.005>

ASLAM, R. *et al.* Biosurfactants production utilizing microbial resources. *In: Industrial Applications of Biosurfactants and Microorganisms*. Elsevier, 2024, p. 39–58. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-13288-9.00024-3>

AZEVEDO, M. A. *et al.* Potential brewer's spent grain as a carbon source alternative for biosurfactant production by *Rhodotorula mucilaginosa* (LBP4). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 1, 111594, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111594>

BALAKRISHNAN, S. *et al.* Biosurfactants: An Antiviral Perspective. *In: Multifunctional Microbial Biosurfactants*. Springer Nature Switzerland, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-31230-4_20

BALAKRISHNAN, S. *et al.* Molecular characterization of biosurfactant producing marine bacterium isolated from hydrocarbon-contaminated soil using 16S rRNA gene sequencing. **Journal of King Saud University - Science**, v. 34, n. 3, 101871, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101871>

BANAT, I. M. *et al.* Biosurfactants: The green generation of speciality chemicals and potential production using Solid-State fermentation (SSF) technology. **Bioresource Technology**, v. 320, 124222, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124222>

BARROS, V. P. O. *et al.* Biosurfactants production by marine yeasts isolated from zoanthids and characterization of an emulsifier produced by *Yarrowia lipolytica* LMS 24B. **Chemosphere**, v. 355, 141807, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141807>

BEZERRA, K. G. O. *et al.* Saponins and microbial biosurfactants: Potential raw materials for the formulation of cosmetics. **Biotechnology Progress**, v. 34, n. 6, p. 1482–1493, 2018. <https://doi.org/10.1002/btpr.2682>

BOGNÁR, B.; SPOHN, R.; LÁZÁR, V. Drug combinations targeting antibiotic resistance. **npj Antimicrobials and Resistance**, v. 2, n. 1, p. 1–8, 2024. <https://doi.org/10.1038/s44259-024-00047-2>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Manual de hortaliças não-convencionais. Brasília: Mapa/ACS, 2010. 92 p.

CAIONI, G. *et al.* Biochemistry and Future Perspectives of Antibiotic Resistance: An Eye on Active Natural Products. **Antibiotics**, v. 13, n. 11, 2024. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13111071>

CÂMARA, J. S. *et al.* Plant-derived terpenoids: A plethora of bioactive compounds with several health functions and industrial applications—A comprehensive overview. **Molecules**, v. 29, n. 16, 2024.

CANLI, K. *et al.* Biochemical, antioxidant properties and antimicrobial activity of steno-endemic *Origanum onites*. **Microorganisms**, v. 8, n. 11, 2023.

CHABHADIYA, S. *et al.* Unlocking the potential of biosurfactants: Innovations in metabolic and genetic engineering for sustainable industrial and environmental solutions. **Biotechnology Notes**, v. 5, p. 111–119, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.07.001>

CHAUHAN, V. *et al.* Synthesis and characterization of silver nanoparticles developed using a novel lipopeptide(s) biosurfactant and evaluating its antimicrobial and cytotoxic efficacy. **Process Biochemistry**, v. 124, p. 51–62, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.11.002>

CHAUHAN, V.; DHIMAN, V. K.; KANWAR, S. S. Purification and characterization of a novel bacterial Lipopeptide(s) biosurfactant and determining its antimicrobial and cytotoxic properties. **Process Biochemistry**, v. 120, p. 114–125, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.06.005>

CHEN, W-C. *et al.* Characterization and production of serrawettin, a lipopeptide biosurfactant, from *Serratia marcescens* SMΔR. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 160, 105232, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105232>

CHERNYSHOVA, I.; SLABOV, V.; KOTA, H. R. Emerging application of biosurfactants in metal extraction. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 68, 101763, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2023.101763>

CIURKO, D. *et al.* Production and characterization of lipopeptide biosurfactant from a new strain of *Pseudomonas antarctica* 28E using crude glycerol as a carbon source. **RSC Advances**, v. 13, n. 34, p. 24129–24139, 2023. <https://doi.org/10.1039/D3RA03408A>

COENYE, T. *et al.* Global challenges and microbial biofilms: Identification of priority questions in biofilm research, innovation and policy. **Biofilm**, v. 8, 100210, 2024. [10.1016/j.bioflm.2024.100210](https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2024.100210)

COLLIVIGNARELLI, M. C. *et al.* Removal of non-ionic and anionic surfactants from real laundry wastewater by means of a full-scale treatment system. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 132, p. 105–115, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.022>

DARBY, E. M. *et al.* Molecular mechanisms of antibiotic resistance revisited. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 5, p. 280–295, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00820-y>

DAS, R. P. *et al.* 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129848>

DATTA, D. *et al.* Microbial biosurfactants: Multifarious applications in sustainable agriculture. **Microbiological Research**, v. 279, 127551, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127551>

DRAKONTIS, C. E.; AMIN, S. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 48, p. 77–90, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.03.013>

DU, Y. *et al.* Efficient production of biosurfactant surfactin by a newly isolated *Bacillus subtilis* (sp.) 50499 strain from oil-contaminated soil. **Food and Bioproducts Processing**, v. 142, p. 40–49, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.09.002>

DURVAL, I. J. B. *et al.* Production, characterization, evaluation and toxicity assessment of a *Bacillus cereus* UCP 1615 biosurfactant for marine oil spills bioremediation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 157, 111357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111357>

EKPRASERT, J.; KANAKAI, S.; YOSPRASONG, S. Improved Biosurfactant Production by *Enterobacter cloacae* B14, Stability Studies, and its Antimicrobial Activity. **Polish Journal of Microbiology**, v. 69, n. 3, p. 273–282, 2020. 10.33073/pjm-2020-030

ENGLEROVÁ, K. *et al.* *Bacillus amyloliquefaciens*—Derived Lipopeptide Biosurfactants Inhibit Biofilm Formation and Expression of Biofilm-Related Genes of *Staphylococcus aureus*. **Antibiotics**, v. 10, n. 10, 1252, 2021. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10101252>

FACCIOLI, Y. E. S. *et al.* Application of a biosurfactant from *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 in bioremediation and metallic corrosion inhibition processes. **Journal of Biotechnology**, v. 351, p. 109–121, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.04.009>

FARIAS, C. B. B. *et al.* Production of green surfactants: Market prospects. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 51, p. 28–39, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.02.002>

FENIBO, E. O. *et al.* Microbial Surfactants: The Next Generation Multifunctional Biomolecules for Applications in the Petroleum Industry and Its Associated Environmental Remediation. **Microorganisms**, v. 7, n. 11, 581, 2019. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7110581>

FERDINAND, A. S. *et al.* Tackling antimicrobial resistance by integrating One Health and the Sustainable Development Goals. **BMC Global and Public Health**, v. 1, n. 1, p. 1–3, 2023. <https://doi.org/10.1186/s44263-023-00003-8>

FERNANDES, N. A. T. *et al.* Eco-friendly biosurfactant from *Wickerhamomyces anomalus* CCMA 0358 as larvicidal and antimicrobial. **Microbiological Research**, v. 241, 126571, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126571>

FERNANDES, N. A. T. *et al.* Eco-friendly biosurfactant from *Wickerhamomyces anomalus* CCMA 0358 as larvicidal and antimicrobial. **Microbiological Research**, v. 241, 126571, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126571>

GAUR, V. K. *et al.* Biosynthesis and characterization of sophorolipid biosurfactant by *Candida* spp.: Application as food emulsifier and antibacterial agent. **Bioresource Technology**, v. 285, 121314, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121314>

GAUTAM, K. *et al.* Oily waste to biosurfactant: A path towards carbon neutrality and environmental sustainability. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, 103095, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103095>

GEETHA S. J.; BANAT, I. M.; JOSHI, S. J. Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 14, p. 23–32, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.01.010>

Global AMR R&D Hub. Incentivising the Development of New Antibacterial Treatments: 2023 Progress Report By The Global AMR R&D Hub and WHO. **Global AMR R&D Hub**. Disponível em: <https://globalamrhub.org/publications/incentivising-the-development-of-new-antibacterial-treatments-2023/>. Acesso em: 15 de jun de 2024

GOMES, F. P. *et al.* Comparison of powdered and fresh jambu (*Acmella oleracea*). **Heliyon**, v. 6, n. 11, e05349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05349>

GOSWAMI, M.; DEKA, S. Biosurfactant production by a rhizosphere bacteria *Bacillus altitudinis* MS16 and its promising emulsification and antifungal activity. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 178, p. 285–296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.03.003>

GUPTA, B. *et al.* Enhanced pyrene degradation by a biosurfactant producing *Acinetobacter baumannii* BJ5: Growth kinetics, toxicity and substrate inhibition studies. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, 100804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100804>

HAIDAR, C. N. *et al.* Potential applications of biosurfactants produced by different *Pseudomonas syringae*: A comparative study on interfacial activity, antimicrobial efficacy, and cytotoxicity. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 58, 103166, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103166>

IGARASHI, M. New natural products to meet the antibiotic crisis: a personal journey. **The Journal of Antibiotics**, v. 72, n. 12, p. 890–898, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41429-019-0224-6>

JAHAN, R. *et al.* Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 275, 102061, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102061>

JENA, G.; DUTTA, K.; DAVEREY, A. Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. **Chemosphere**, v. 341, 140082, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140082>

JERÔNIMO, L. B. *et al.* *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen essential oils: Chemical composition, antioxidant, and cytotoxic activities. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 112, 104775, 2024.

JIMOH, A. A.; LIN, J.. Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 184, 109607, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109607>

JOHNSON, P. *et al.* Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 288, 102340, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102340>

KADIRI, F. *et al.* Characterization and valorization of a biosurfactant produced by *Aeromonas salmonicida* isolated from the marchika lagoon of Nador. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 45, 102523, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102523>

KALAM, S. *et al.* A review on surfactant retention on rocks: mechanisms, measurements, and influencing factors. **Fuel**, v. 293, 120459, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120459>

KAVALLIERATOS, N. G. *et al.* *Acmella oleracea* extracts as green pesticides against eight arthropods attacking stored products. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 94904–94927, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28577-8>

KRAUSS, I. E. *et al.* From composite molecular structures to a multiplicity of supramolecular aggregates: The role of intermolecular interactions in biosurfactant self-assembly. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 70, 101792, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101792>

KUMAR, M. *et al.* Glycolipopeptide biosurfactant produced by *Klebsiella pneumoniae* ssp. ozaenae BK34: Virtue in germination and growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.) HC-1 crop. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 61, 103353, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103353>

LAVANYA, M.; MACHADO, A. A. Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: A comprehensive review. **Science of The Total Environment**, v. 908, 168407, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>

LIMA, B. G. A. *et al.* Sustainable Production of Biosurfactant Grown in Medium with Industrial Waste and Use for Removal of Oil from Soil and Seawater. **Surfaces**, v. 7, n. 3, p. 537–549, 2024. <https://doi.org/10.3390/surfaces7030036>

LIU, H. Y.; PRENTICE, E. L.; WEBBER, M. A. Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. **npj Antimicrobials and Resistance**, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2024. <https://doi.org/10.1038/s44259-024-00046-3>

LIU, K. *et al.* Rational design, properties, and applications of biosurfactants: a short review of recent advances. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 45, p. 57–67, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2019.12.005>

LOURENÇO, M.; DUARTE, N.; RIBEIRO, I. A. C. Exploring Biosurfactants as Antimicrobial Approaches. **Pharmaceuticals**, v. 17, n. 9, 1239, 2024. <https://doi.org/10.3390/ph17091239>

MACNAIR, C. R.; RUTHERFORD, S. T.; TAN, M-W. Alternative therapeutic strategies to treat antibiotic-resistant pathogens. **Nature Reviews Microbiology**, v. 22, n. 5, p. 262–275, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00993-0>

MAHANTY, R. *et al.* Biosurfactant-based silver nanoparticles: Recent advances and their applications in antimicrobial drug resistance. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 92, 105382, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105382>

MALAKAR, C. *et al.* Antibiofilm and wound healing efficacy of rhamnolipid biosurfactant against pathogenic bacterium *Staphylococcus aureus*. **Microbial Pathogenesis**, v. 195, 106855, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106855>

MARKAM, S. S. *et al.* Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, 100266, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100266>

MAXIM, C. *et al.* Natural antioxidants from *Acmella oleracea* extract as dermatocosmetic actives. **Scientia Pharmaceutica**, v. 92, n. 3, 2024. <https://doi.org/10.3390/scipharm92030052>

MENESES, D. P. *et al.* The yeast-like fungus *Aureobasidium thailandense* LB01 produces a new biosurfactant using olive oil mill wastewater as an inducer. **Microbiological Research**, v. 204, p. 40–47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.07.004>

MISHRA, S. *et al.* Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, 126253, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126253>

MOURA, J. S. *et al.* Bioactive Compounds of Jambu (*Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen) as Potential Components of Biodegradable Food Packing: A Review. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15231, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115231>

MOUREU, S. *et al.* Antifungal activity of hop leaf extracts and xanthohumol on two strains of *Venturia inaequalis* with different sensitivities to triazoles. **Microorganisms**, v. 11, n. 6, 2023.

MOUSA, A. M. *et al.* Protective effects of microbial biosurfactants produced by *Bacillus halotolerans* and *Candida parapsilosis* on bleomycin-induced pulmonary fibrosis in mice: Impact of antioxidant, anti-inflammatory and anti-fibrotic properties via TGF- β 1/Smad-3 pathway and miRNA-326. **Toxicology and Applied Pharmacology**, v. 486, 116939, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2024.116939>

NAGHAVI, M. *et al.* Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. **The Lancet**, v. 404, 10459, p. 1199–1226, 2024.

NALINI, S. *et al.* Optimization of biosurfactant production by marine *Streptomyces youssoufiensis* SNSAA03: A comparative study of RSM and ANN approach. **Results in Chemistry**, v. 3, 100223, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100223>

NASHIDA, J. *et al.* Systematic and Stereoselective Total Synthesis of Mannosylerythritol Lipids and Evaluation of Their Antibacterial Activity. **The Journal of Organic Chemistry**, v. 83, n. 13, p. 7281–7289, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.8b00032>

NASIM, N.; SANDEEP, I. S.; MOHANTY, S. Plant-derived natural products for drug discovery: Current approaches and prospects. *The Nucleus*, v. 65, p. 399–411, 2022.

NAYAK, N. S. *et al.* Biosurfactant production and engine oil degradation by marine halotolerant *Bacillus licheniformis* LRK1. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 29, 101808, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101808>

O'NEILL, J. Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations/the Review on Antimicrobial Resistance chaired by Jim O'Neill. **Wellcome Collection**. Disponível em: <https://wellcomecollection.org/works/thvwsba>. Acesso em: 21 Nov. 2024.

OHADI, M. *et al.* Antimicrobial, anti-biofilm, and anti-proliferative activities of lipopeptide biosurfactant produced by *Acinetobacter junii* B6. **Microbial Pathogenesis**, v. 138, 103806, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103806>

OTHMAN, A. R. *et al.* Potential of indigenous biosurfactant-producing fungi from real crude oil sludge in total petroleum hydrocarbon degradation and its future research prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, 107621, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107621>

PERETTI, P. *et al.* Spilanthol content of *Acmella oleracea* subtypes and their bactericide and antibiofilm activities against *Streptococcus mutans*. *South African Journal of Botany*, v. 143, p. 17–24, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.001>

PURWASENA, I. A. *et al.* Lipopeptide biosurfactant as a potential root canal irrigation agent: Antimicrobial and anti-biofilm evaluation. **Journal of Dentistry**, v. 144, 104961, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104961>

QAMAR, S. A.; PACIFICO, S. Cleaner production of biosurfactants via bio-waste valorization: A comprehensive review of characteristics, challenges, and opportunities in bio-sector applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, 111555, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111555>

RAHMAN, S.; HOLLIS, A. The effect of antibiotic usage on resistance in humans and food-producing animals: a longitudinal, One Health analysis using European data. **Frontiers in Public Health**, v. 11, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1170426>

RAJITHA, K.; NANCHARAI, Y. V.; VENUGOPALAN, V. P. Inhibition of biofilm formation and settlement of barnacle larvae by a biosurfactant produced from a marine biofilm-forming *Exiguobacterium* sp. R58. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 187, 105724, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2023.105724>

RAWAT, G. *et al.* Exploring the potential of novel *Bacillus* sp. G6: Isolation, characterization, and optimization of biosurfactant production from oil-contaminated soil. **Journal of Molecular Liquids**, v. 396, 124013, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124013>

RIBEIRO, B. G. *et al.* Biosurfactant produced by *Candida utilis* UFPEDA1009 with potential application in cookie formulation. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 46, p. 14–21, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.05.001>

SALAMATULLAH, A. M. *et al.* Different drying techniques effect on the bioactive properties of rose petals. *Journal of King Saud University - Science*, v. 36, n. 1, p. 103025, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.103025>

SANKHYAN, S. *et al.* Characterization of biosurfactant produced through co-utilization of substrates by the novel strain *Pseudomonas aeruginosa* NG4. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 55, 102988, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102988>

SANMARTIN, P. N. *et al.* Biosurfactant production by *Rhodococcus* ALDO1 isolated from olive mill wastes. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 57, 103106, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103106>

SANTOS, D. K. F. *et al.* Biosurfactants: Multifunctional Biomolecules of the 21st Century. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 3, 401, 2016. <https://doi.org/10.3390/ijms17030401>

SARUBBO, L. A. *et al.* Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives. **Biochemical Engineering Journal**, v. 181, 108377, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>

SATERIALE, D. *et al.* Towards green strategies of food security: Antibacterial synergy of essential oils from *Thymus vulgaris* and *Syzygium aromaticum* to inhibit

Escherichia coli and *Staphylococcus aureus* pathogenic food isolates. **Microorganisms**, v. 10, n. 12, 2022.

SAŁEK, K.; EUSTON, S. R. Sustainable microbial biosurfactants and bioemulsifiers for commercial exploitation. **Process Biochemistry**, v. 85, p. 143–155, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.06.027>

SCHALCHLI, H. *et al.* Production and characterization of a biosurfactant produced by *Bacillus amyloliquefaciens* C11 for enhancing the solubility of pesticides. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, 111572, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111572>

SHABAN, S. M.; KANG, J.; KIM, D-H. Surfactants: Recent advances and their applications. **Composites Communications**, v. 22, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100537>

SHAJI, A. *et al.* Progress in sustainable remediation: Utilizing biosurfactants for eco-friendly contaminant cleanup. **Bioresource Technology Reports**, v. 27, 101901, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101901>

SHARMA, J.; SUNDAR, D.; SRIVASTAVA, P. Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism. **Frontiers in Molecular Biosciences**, v. 8, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.727070>

SHARMA, R.; ARUMUGAM, N. N-alkylamides of *Spilanthes* (syn: *Acmella*): Structure, purification, characterization, biological activities and applications – a review. **Future Foods**, v. 3, 100022, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100022>

SHIVANANDA, S. *et al.* Assessment of the antibacterial activity of *Spilanthes acmella* against bacteria associated with dental caries and periodontal disease: An in-vitro microbiological study. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 18, n. 1, p. 476-482, 2024. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.1.31>

SHREYA *et al.* Removal of surfactants in greywater using low-cost natural adsorbents: A review. **Surfaces and Interfaces**, v. 27, 101532, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101532>

SILVA, C. R. *et al.* Antimicrobial potential of a biosurfactant gel for the prevention of mixed biofilms formed by fluconazole-resistant *C. albicans* and methicillin-resistant *S. aureus* in catheters. **Biofouling**, v. 40, n. 2, p. 165–176, 2024. <https://doi.org/10.1080/08927014.2024.2324028>

SILVA, I. A. *et al.* Production and Application of a New Biosurfactant for Solubilisation and Mobilisation of Residual Oil from Sand and Seawater. **Processes**, v. 12, n. 8, 1605, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12081605>

SILVA, I. A. *et al.* 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, 332, 2024b. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070332>

SILVA, J. R. M. *et al.* Brazilian mangrove sediments as a source of biosurfactant-producing yeast *Pichia pseudolambica* for bioremediation. **Chemosphere**, v. 365, 143285, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143285>

SIYAL, A. A. *et al.* A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 254, 109797, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109797>

SONDHI, S. Application of biosurfactant as an emulsifying agent. *In: Applications of Next Generation Biosurfactants in the Food Sector*. Elsevier, 2023, p. 43–56. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824283-4.00025-3>.

SULTANA, S. *et al.* An industrially potent rhamnolipid-like biosurfactant produced from a novel oil-degrading bacterium, *Bacillus velezensis* S2. **RSC Advances**, v. 14, n. 34, p. 24516–24533, 2024. <https://doi.org/10.1039/d4ra02572e>

TAOWKRUE, E. *et al.* Enhanced production of yeast biosurfactant sophorolipids using yeast extract or the alternative nitrogen source soybean meal. **Industrial Crops and Products**, v. 210, 118089, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118089>

TURCHI, M.; KARCZ, A. P.; ANDERSSON, M. P. First-principles prediction of critical micellar concentrations for ionic and nonionic surfactants. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 606, p. 618–627, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.044>

TWIGG, M. S. *et al.* Microbial biosurfactant research: time to improve the rigour in the reporting of synthesis, functional characterization and process development. **Microbial biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 147–170, 2021. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13704>

VARNAVA, C. K. *et al.* Characterization, production optimization and ecotoxicity of a lipopeptide biosurfactant by *Pseudomonas citronellolis* using oily wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 205, 109257, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109257>

VUČUROVIĆ, D. *et al.* Biotechnological Utilization of Agro-Industrial Residues and By-Products—Sustainable Production of Biosurfactants. **Foods**, v. 13, n. 5, 711, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>

Which are the major players in biosurfactants market? MarketsandMarkets. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biosurfactant-market-163644922.html>. Acesso em: 29 Sep. 2024.

WHO. Antimicrobial resistance. Genebra: WHO, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>. Acesso em: 21 Nov. 2024.

XU, M. *et al.* Characterization of a biosurfactant-producing bacteria isolated from Marine environment: Surface activity, chemical characterization and biodegradation.

Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 5, 104277, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104277>

YADAV, R.; SHARMA, R.; SAXENA, K. *Spilanthes acmella*: Ethnobotanical and pharmacological activities. **International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research**, v. 78, n. 2, p. 17-24, Jan./Feb. 2023.

YI, Y. *et al.* Antimicrobial cyclic lipopeptides from *Bacillus mojavensis* B1302 against wheat root rot. **Rhizosphere**, v. 32, 100963, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100963>

YULIANI, H. *et al.* Antimicrobial activity of biosurfactant derived from *Bacillus subtilis* C19. **Energy Procedia**, v. 153, p. 274–278, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.043>

YUMNAM, G.; GYANENDRA, Y.; SINGH, C. I. A systematic bibliometric review of the global research dynamics of United Nations Sustainable Development Goals 2030. **Sustainable Futures**, v. 7, 100192, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100192>

ZAMPOLLI, J. *et al.* Identification of a Novel Biosurfactant with Antimicrobial Activity Produced by *Rhodococcus opacus* R7. **Microorganisms**, v. 10, n. 2, 475, 2022.
[10.3390/microorganisms10020475](https://doi.org/10.3390/microorganisms10020475)

ZHAO, A.; SUN, J.; LIU, Y. Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, v. 13, 2023.
[10.3389/fcimb.2023.1137947](https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1137947)

ZHOU, Y. *et al.* Optimization of fermentation conditions for surfactin production by *B. subtilis* YPS-32. **BMC Microbiology**, v. 23, n. 1, 2023.
<https://doi.org/10.1186/s12866-023-02838-5>

CAPÍTULO II

Artigo submetido à revista Brazilian Journal of Environmental Sciences — Fator de Impacto: 0.5

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE PRODUZIDO POR *Candida guilliermondii* UCP 1592 E APLICAÇÃO COMO AGENTE DE LIMPEZA E DESENGORDURANTE

Yali Alves da Silva¹, Hozana de Souza Ferreira², Antônio Pedro da Costa Albuquerque³, Gabriel Halliday de Albuquerque Borba³; Leonie Asfora Sarubbo⁴,
Juliana Moura de Luna³

¹Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

²Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

³Escola de Saúde e Ciências da Vida, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

⁴Escola de Comunicação e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

Resumo

Os biossurfactantes são moléculas tensoativas produzidas por microrganismos, cuja estrutura anfifílica permite reduzir a tensão superficial e estabilizar emulsões. Amplamente aplicados em diversos setores, destacam-se por sua versatilidade, biodegradabilidade e sustentabilidade, sendo uma alternativa ecológica aos surfactantes sintéticos. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a produção de biossurfactantes, caracterizar suas propriedades químicas, analisar sua estabilidade e toxicidade, além de investigar seu potencial na limpeza e remoção de óleo de motor queimado de superfícies de vidro e tecidos de algodão. O biossurfactante foi produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 em meio contendo água destilada com 2,5% de milhocina e 5% de óleo residual de fritura, agitado a 200 rpm por 144 h. O biossurfactante reduziu a tensão superficial da água de 72 para 30 mN/m, com rendimento de 18 g/L. Foi capaz de emulsionar 100% de

óleo de motor, formando uma emulsão estável. Foi considerado atóxico para organismos como *Tenebrio molitor* e *Artemia salina*, com 100% de sobrevivência, e baixa fitotoxicidade, evidenciada por índices de germinação superiores a 50% utilizando sementes de *Solanum lycopersicon* e *Lactuca sativa*. O biossurfactante mostrou elevado potencial de aplicação prática como desengordurante de óleo de motor em superfície de vidro, atingindo remoção de 100% do composto hidrofóbico. Em tecidos de algodão, apresentou percentuais de remoção de 91%, 70% e 57%, nas concentrações de 2 CMC (0,6 g/L), 1 CMC (0,3 g/L) e 1/2 CMC (0,15 g/L), respectivamente. Portanto, esses resultados destacam o biossurfactante como uma alternativa ecológica e promissora para aplicações em limpeza e remoção de óleos.

Palavras-chave: biossurfactantes; óleo pesado; tensão superficial.

1 INTRODUÇÃO

Os biossurfactantes são biomoléculas anfifílicas que atuam como agentes de superfície, melhorando as interações entre superfícies por meio da formação de micelas. Essas moléculas são sintetizadas e secretadas por diversos microrganismos, como fungos filamentosos, bactérias e leveduras, e têm ampla aplicação em diversas indústrias (Chabhadiya *et al.*, 2024).

São classificados de acordo com sua composição química, geralmente apresentando uma porção hidrofílica composta por aminoácidos, peptídeos, mono-, di- ou polissacarídeos, e uma porção hidrofóbica constituída por diferentes comprimentos de cadeias de ácidos graxos (Sharma; Sundar; Srivastava, 2021). Além disso, sua classificação também considera a massa molecular, a qual varia de 500 Da a 1500 Da, sendo classificados como agentes tensoativos de baixo peso molecular (como glicolipídeos, lipopeptídeos e fosfolipídios), os quais são reconhecidos por reduzir a tensão superficial; e tensoativos de alto peso molecular (lipoproteínas, lipopolissacarídeos, heteropolissacarídeos, ácidos graxos e lipídios neutros), os quais demonstram maior eficácia na formação de emulsões estáveis de óleo/água, sendo denominados de bioemulsificantes (Drakontis; Amin, 2020; Balakrishnan *et al.*, 2023).

Essas biomoléculas têm despertado crescente interesse na comunidade científica e industrial devido às suas características notáveis e promissoras. Entre as principais características, estão a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial, bem como biodegradabilidade, biodisponibilidade, diversidade estrutural, baixa toxicidade e compatibilidade ambiental, o que lhes confere ampla aplicabilidade em diferentes setores (Eldin; Hossam, 2023).

Uma das características mais marcantes dos biossurfactantes é sua estabilidade em condições extremas, como variações drásticas de pH, altas temperaturas e elevadas concentrações salinas (Annuar *et al.*, 2023; Singh, 2022). Essa robustez amplia suas aplicações em indústrias como a petrolífera, de alimentos, farmacêutica e agricultura (Markam *et al.*, 2024). Além disso, sua produção a partir de fontes renováveis, como resíduos agroindustriais, torna a produção economicamente mais viável, além de contribuir para uma abordagem mais sustentável, alinhada aos princípios da economia circular (Bezerra *et al.*, 2018; Jahan *et al.*, 2020).

A produção de biossurfactantes é influenciada por diversos fatores, incluindo a natureza do substrato e parâmetros físicos e nutricionais, como fontes de carbono e nitrogênio, relação C/N, pH, temperatura, tempo de incubação e agitação. A otimização desses parâmetros tem sido explorada como uma estratégia para melhorar a produção de biossurfactantes com propriedades específicas (Zhou *et al.*, 2023; Qamar; Pacífico, 2023).

Esses compostos naturais encontram aplicações em setores como agricultura, indústria química, cosmética, farmacêutica, alimentícia, de limpeza, couro, papel e têxteis (Datta *et al.*, 2024; Markam *et al.*, 2024; Sani *et al.*, 2024; Hernández; Pedersen; Otzen, 2023; Abbot *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2020). Além disso, apresentam grande potencial na biorremediação, como remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos (Silva *et al.*, 2024). No setor de limpeza, os biossurfactantes são amplamente empregados em detergentes para roupas e produtos domésticos, graças às suas propriedades de emulsificação, dispersão, formação de espuma e redução da tensão superficial (Farias *et al.*, 2021). Além disso, eles demonstram grande potencial na biorremediação de hidrocarbonetos, além de possuírem atividades antimicrobianas e anti-biofilme, o que os torna eficazes em diversos processos de lavagem. (Lourenço; Duarte; Ribeiro, 2024).

O avanço da biotecnologia e a busca por soluções sustentáveis têm impulsionado o desenvolvimento de biossurfactantes, com foco em alternativas que tornem sua produção competitiva no mercado (Thakur *et al.*, 2024). Prevê-se que o mercado de biossurfactantes apresente um crescimento expressivo, com uma taxa de expansão anual de 11,0%, alcançando US\$2,3 bilhões em 2028, partindo de US\$1,3 bilhões em 2023. Esse avanço é impulsionado, principalmente, pela crescente demanda por produtos naturais e sustentáveis, com destaque para os setores de cuidados pessoais e cosméticos. Embora o crescimento seja observado globalmente, a Europa lidera em pesquisa e produção de surfactantes verdes, seguida pela América do Norte e Ásia, regiões onde grandes empresas consolidadas no mercado global desempenham papel significativo (Market and Markets, 2023).

Esse movimento reflete o crescente interesse pelo uso desses compostos, que se destacam pelo seu potencial ambientalmente responsável em diversas aplicações industriais, substituindo de forma eficaz os surfactantes sintéticos. Alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, da Organização das Nações Unidas, essa transição reflete a preocupação global com a redução de impactos ambientais, promovendo equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental (Sarubbo *et al.*, 2022). A adoção de biossurfactantes contribui para diminuir a poluição aquática e os riscos associados à toxicidade dos compostos sintéticos, destacando-se como um passo importante para atender às demandas de sustentabilidade e fomentar uma economia verde (Qamar; Pacifico, 2023; Yumnam; Gyanendra; Singh, 2024).

Estudos recentes têm destacado o potencial de biossurfactantes produzidos por leveduras na limpeza de ambientes contaminados por derivados de petróleo e como detergentes no setor têxtil. Assim, esse trabalho teve por objetivo investigar o potencial do biossurfactante produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 na remoção de óleo em tecidos de algodão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Microrganismo produtor do biossurfactante

Candida guilliermondii UCP 1592 depositada no Banco de Culturas do Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e Superfícies de Materiais (CMACBIOs) da Universidade Católica de Pernambuco (Recife, Brasil) foi utilizada como produtora do biossurfactante. As culturas da cepa foram mantidas a 5°C em tubos de ensaio inclinados contendo Yeast Mold Agar (YMA), composta por extrato de levedura (0,3%), D-glicose (1%), triptona (0,5%) e ágar (2%), dissolvidos em água destilada (100 mL). O microrganismo foi repicado a cada 30 dias para manutenção da viabilidade celular.

2.2 Preparo e crescimento do inóculo

O inóculo da levedura foi padronizado transferindo a cultura para um tubo contendo o meio YMA, a fim de se obter uma cultura jovem. Em seguida, a amostra foi transferida para frascos Erlenmeyers contendo Yeast Mold Broth (mesma composição do YMA, excluindo-se o ágar) solubilizados em água destilada e esterilizados em autoclave por 20 minutos a 121 °C. Posteriormente, foram incubados sob agitação orbital de 150 rpm a 28°C durante 24 horas. O inóculo foi padronizado pela contagem celular em câmara de Neubauer até obtenção de densidade celular de 10^6 células/mL e adicionado ao meio de produção na concentração de 5,0% (v/v).

2.3 Meio de cultivo e condições de fermentação

As fermentações para a produção do biossurfactante foram realizadas em frascos Erlenmeyer de 2 L de capacidade, contendo 1 L do meio formulado com água destilada suplementada com 2,5% de milhocina e 5,0% óleo de soja residual. O meio de produção foi esterilizado em autoclave a 121 °C, durante 20 minutos e, posteriormente, foi incubado com a suspensão celular de 10^6 células/mL, e submetido à agitação orbital de 200 rpm, durante 144 horas, à temperatura de 28°C.

2.4 Cinética de crescimento e produção do biossurfactante

Foram coletadas alíquotas nos intervalos de 2, 4, 6, 8, 12, 24, 30, 36, 48, 60, 72, 96, 120 e 144 horas durante a fermentação. Essas amostras foram

centrifugadas (4500 rpm, 9 °C por 15 minutos, Megafuge 16R centrifuge, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) e filtradas com filtros Whatman No. 1 para se obter líquidos metabólicos livres de células, que foram utilizados para medir a tensão superficial e o pH. Para determinar a biomassa por peso seco, 100 mL da cultura foi centrifugada a 4500 rpm por 15 minutos, com o sobrenadante sendo descartado. Após a centrifugação, a biomassa foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas e, em seguida, pesada. Para determinar o rendimento de produção, 100 mL da amostra foi submetido à extração utilizando o líquido metabólico contendo células, utilizando o solvente orgânico acetato de etila (Lima *et al.*, 2024).

2.5 Isolamento do biossurfactante

A extração do biossurfactante presente no meio foi realizada utilizando o solvente orgânico acetato de etila. O líquido metabólico, sem centrifugação prévia, foi misturado ao solvente na proporção de 1:4 (v/v). Esse processo foi repetido duas vezes. Em seguida, o solvente foi submetido à centrifugação a 4500 rpm durante 15 minutos. A fase orgânica resultante foi então transferida para um funil de separação, descartando-se a possível fase aquosa. Essa separação foi facilitada pela adição de uma solução saturada de cloreto de sódio (NaCl). Para retirada de qualquer resíduo de água, foi utilizado sulfato de sódio e o material posteriormente filtrado. Finalmente, a fase orgânica foi aquecida em uma chapa para a evaporação do solvente, resultando no biossurfactante isolado.

2.6 Composição química do biossurfactante

Para elucidação da composição química do biossurfactante, os métodos de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTR) e de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) foram empregados.

O biossurfactante purificado foi dissolvido em clorofórmio deuterado (CDCl₃) e analisado em um espectrômetro de 500/300 MHz (Agilent, Santa Clara, CA, EUA) operando a 300,13 MHz para determinar desvios químicos (δ) nos espectros de RMN de ¹H e RMN de ¹³C no escala ppm em relação ao tetrametilsilano.

A análise em espectroscopia de infravermelho foi realizada em um espectrômetro FT-IR (Spectrum 400, Perkin Elmer, Shelton, CT, USA) na faixa

espectral de 4.000 a 400 cm^{-1} . A precisão foi mantida na faixa do número de onda de -0,1 a +0,1 cm^{-1} .

2.7 Determinação da Tensão Superficial e Concentração Micelar Crítica

A tensão superficial do biossurfactante foi medida no líquido metabólico livre de células após centrifugação. À temperatura ambiente, o método do anel du Noüy foi empregado usando um Tensiômetro Sigma 700 (KSV Instruments Ltd., Helsinki, Finlândia). Para determinar a Concentração Micelar Crítica (CMC), 0,1 g do biossurfactante isolado foi pesado e diluído em uma concentração inicial de 5 g/L. A partir dessa solução, foram realizadas diluições sucessivas com água destilada. As tensões superficiais das diluições foram então quantificadas utilizando o método do anel du Noüy.

2.8 Determinação da atividade emulsificante

A atividade emulsificante do biossurfactante formulado foi determinada utilizando o método descrito por Cooper e Goldenberg (1987). Dois mL de óleo de motor queimado foram adicionados a 2,0 mL do líquido metabólico livre de células em um tubo de ensaio e a mistura foi agitada em vórtex (K45-2820, KASVI, São José dos Pinhais, Brazil) por 2 min. As emulsões foram deixadas em repouso por 24 horas a 27 °C, e o Índice de Emulsificação (IE_{24}) foi calculado como uma porcentagem usando a seguinte fórmula:

$$IE_{24} (\%) = \frac{he}{ht} \times 100 \quad (1)$$

(1) onde he é a altura de emulsificação e ht é a altura total da mistura, ambos expressos em cm.

2.9 Dispersão de contaminante hidrofóbico

O biossurfactante bruto (líquido metabólico livre de células) e isolado (1/2, 1 e 2 CMC) foi avaliado em relação à capacidade de dispersão. Uma mancha de óleo

foi simulada em laboratório, contaminando amostras de água com óleo de motor queimado, de acordo com a metodologia de Morikawa *et al.* (2000). O diâmetro da zona clara na superfície do óleo foi medido na área de deslocamento de óleo. Água destilada foi usada como controle negativo, e o surfactante químico dodecil sulfato de sódio (SDS) foi usado como controle positivo.

2.10 Avaliação da estabilidade do biossurfactante (pH, temperatura e salinidade)

A estabilidade do biossurfactante foi avaliada considerando capacidade tensoativa e emulsificante, em três diferentes condições: pH, temperatura e salinidade. Para isso, foram testados os efeitos de diferentes temperaturas (5°C, 70°C, 100°C), concentrações de NaCl (2,0%, 4,0%, 6,0%, 8,0%, 10,0% e 12%) e pHs (2,0, 4,0, 6,0, 8,0, 10,0 e 12,0), aplicados separadamente ao biossurfactante. Assim, o biossurfactante foi analisado quanto à tensão superficial e à atividade de emulsificação. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

2.11 Toxicidade do biossurfactante para *Tenebrio molitor*

Larvas de *Tenebrio molitor*, cada uma com aproximadamente 100 mg, foram distribuídas aleatoriamente em grupos de 5 indivíduos. Um volume de 10 µL de biossurfactante foram injetadas na membrana ventral entre o segundo e o terceiro segmentos abdominais (cauda à cabeça), nas concentrações de ½ CMC (0,15 g/L), 1xCMC (0,3 g/L) e 2xCMC (0,6 g/L). A viabilidade larval foi avaliada ao longo de 24, 48, 72, 96 e 120 horas, onde avaliou-se a ausência de movimento após estímulo mecânico. Larvas inoculadas com PBS serviram como controles negativos. Os resultados foram plotados como curvas de sobrevivência ao longo do tempo (Silva *et al.*, 2020).

2.12 Toxicidade frente à *Artemia salina*

A toxicidade para microcrustáceos foi testada com *Artemia salina*, que é um bioindicador marinho comumente usado. Para o teste foi utilizado um litro de solução salina composta por 33 g de sal marinho dissolvido. Após a incubação, 10

microcrustáceos foram colocados em soluções do biossurfactante nas concentrações de $\frac{1}{2}$ CMC (0,15 g/L), CMC (0,3 g/L) e $2 \times$ CMC (0,6 g/L) em água destilada.

2.13 Aplicação do biossurfactante como agente de limpeza e desengordurante

2.13.1 Limpeza de superfície de vidro contaminada com óleo

O biossurfactante obtido de *Candida guilliermondii* UCP 1592 foi utilizado para limpeza e desengorduramento de óleo de motor queimado presente em superfície lisa (lâmina de vidro), de acordo com metodologia de Farias *et al.* (2021). Parte da superfície de uma lâmina de vidro de massa conhecida foi uniformemente contaminada com 100 μ L de óleo pesado. As lâminas foram submersas em soluções contendo $\frac{1}{2}$ CMC, 1 CMC e 2 CMC. Parte da superfície de uma lâmina de vidro de massa conhecida foi uniformemente contaminada com 100 μ L de óleo pesado. O controle negativo foi realizado com água destilada. A taxa de remoção foi calculada da seguinte forma:

$$I = 100 \times ([W_c - W_w]) / ([W_c - W_i])$$

Onde W_c é o peso da amostra de teste contaminado, W_w é o peso da amostra de teste após a lavagem e W_i é o peso inicial da amostra de teste.

2.13.2 Limpeza e desengorduramento de óleo em tecido de algodão

O biossurfactante obtido de *Candida guilliermondii* UCP 1592 foi utilizado para limpeza e desengorduramento de óleo de motor queimado impregnado em tecido de algodão usando uma metodologia adaptada de Andrade *et al.* (2018). Tecidos de algodão branco limpos cortados em pedaços medindo 2×2 cm foram impregnados com óleo de motor queimado. A amostra de tecido de algodão foi impregnada com uma gota de óleo de motor queimado e, após o tecido absorvê-lo, a amostra foi imersa em soluções aquosas de biossurfactante nas concentrações de $\frac{1}{2}$, 1 e 2 CMC. A lavagem do tecido de algodão ocorreu a uma velocidade de

agitação de 150 rpm durante períodos de tempo de 1, 2, 4, 6, 8 e 12 h em um agitador orbital. O controle positivo foi SDS e o controle negativo foi água destilada. O tecido foi enxaguado com 100 mL de água destilada por 1 h de agitação, seguido de secagem natural. A estrutura das fibras do tecido de algodão antes e depois da limpeza e desengorduramento do óleo foi examinada por microscopia óptica. A porcentagem de óleo de motor queimado removido do tecido de algodão pela ação do biossurfactante e outras condições testadas foi determinada de acordo com a equação:

$$W = (m_{total} - m_i / m_{total}) \times 100$$

Em que m_{total} = massa total de óleo aplicado; m_i = óleo residual no tecido após o tratamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de crescimento e produção

Apesar das aplicações promissoras, a produção de biossurfactantes é limitada devido aos altos custos, principalmente em função dos meios de cultivo caros. Para tornar o processo economicamente viável, subprodutos e resíduos agroindustriais são usados como substratos alternativos, reduzindo custos e promovendo uma abordagem sustentável (Begum; Saha; Mandal, 2023). Além disso, a otimização dos processos fermentativos é essencial para maximizar a produtividade. Isso inclui o controle rigoroso de variáveis como tempo de fermentação, temperatura e seleção de substratos, que impactam diretamente a eficiência e o rendimento da produção. Esses fatores determinam o ambiente ideal para o crescimento microbiano e a síntese de biossurfactantes, tornando o processo mais rentável e competitivo (Ambechada; Umrana, 2024).

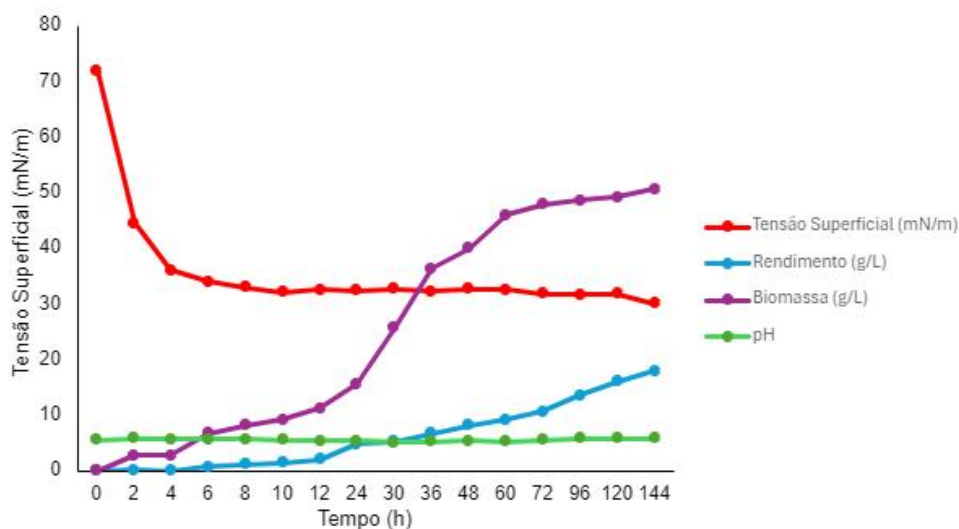
No presente estudo, foi avaliado o crescimento e produção de biossurfactante produzido pela levedura *Candida guilliermondii* UCP 1592 em meio contendo 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual por 144 h, a uma temperatura de 28 °C, a 200 rpm.

No início da cinética (Figura 1), a tensão superficial do meio era de 72 mN/m e foi reduzida para 30 mN/m ao chegar em 144 h. A produção de biomassa começou a ocorrer após 2h de fermentação, atingindo seu ápice em 144 h com produção máxima de biossurfactante de 18 g/L. Além disso, o pH se manteve estável durante toda a produção, na faixa de 5, com variação entre 5.1 a 5.9, durante os tempos de 30 h e 144 h de cultivo, respectivamente.

Os resultados obtidos por meio da cinética de produção apresentam valores semelhantes aos observados em diversos estudos que utilizaram leveduras do gênero *Candida* para a produção de biossurfactantes. Dentre esses estudos, destaca-se a produção de biossurfactante por *C. lipolytica*, conduzida por Lima *et al.* (2024). Neste estudo, a levedura foi cultivada em um meio contendo 2,5% de óleo de soja residual de fritura, 2,5% de milhocina e 4,0% de melaço durante um período de 6 dias, resultando em uma tensão superficial de 28 mN/m ao final do experimento e um rendimento de 12 g/L. Pinto *et al.* (2022) utilizaram *C. bombicola* em um meio suplementado com 5% de melaço, 5% de resíduo de óleo de fritura e 5% de milhocina, obtendo um rendimento de 12,5 g/L em produção realizada em frascos, já quando o processo foi realizado em um biorreator com capacidade de 50 L, a produção aumentou aproximadamente 17 vezes.

Compreender o processo de produção de biossurfactantes e os processos de otimização é fundamental para determinar o rendimento total, uma vez que esses processos aprimoram a eficiência do crescimento microbiano, a utilização do substrato e a síntese de biossurfactantes. O ajuste de parâmetros como a concentração de nutrientes, o tempo de incubação, a temperatura, o pH e outros fatores ambientais permite melhorar o processo de produção, resultando em maiores rendimentos. Essa abordagem assegura que os microrganismos envolvidos operem em condições ideais, potencializando sua atividade metabólica e aumentando a capacidade de produção de biossurfactantes (Gaur *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023).

Figura 1 — Curva de produção de biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivada em água destilada suplementada com 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual, a 28 °C, 200 rpm, 144 h



3.2 Determinação da Tensão Superficial e Concentração Micelar Crítica

A tensão superficial é a força de atração entre as moléculas de um líquido e os surfactantes atuam reduzindo essa atração, diminuindo a tensão superficial do sistema ao romper as interações entre as moléculas (Santos *et al.*, 2021). O biossurfactante produzido a partir da levedura *C. guilliermondii* UCP 1592 em meio formulado contendo 2,5% de melaço e 5% de óleo de soja residual, exibiu uma expressiva capacidade de redução da tensão superficial da água de 72 mN/m para 30 mN/m. Esse biossurfactante alcançou um rendimento de 18 g/L, o que demonstra seu potencial produtivo.

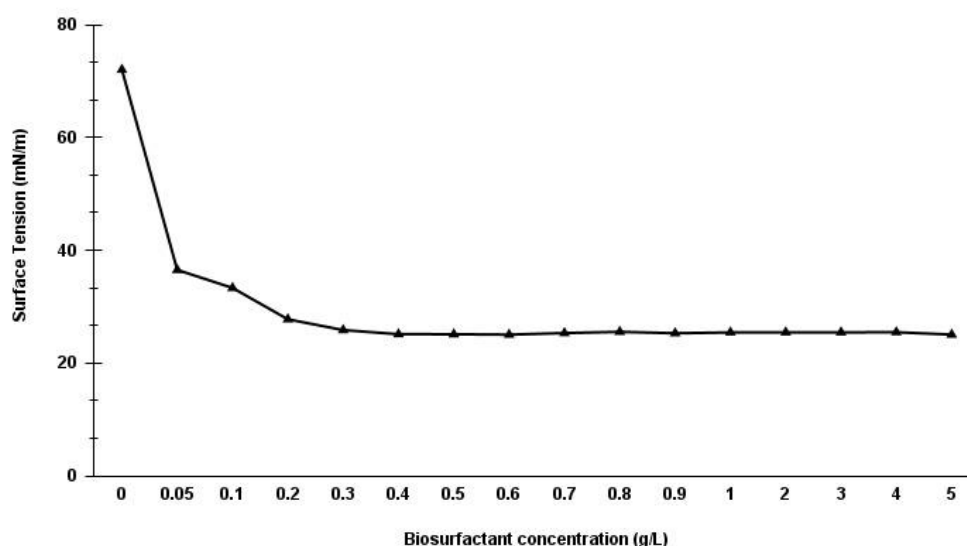
A análise do comportamento da tensão superficial em função da concentração do biossurfactante mostrou que a concentração micelar crítica (CMC) foi alcançada com 0,3 g/L, resultando em uma tensão superficial de 25,83 mN/m (Figura 2).

Comparativamente, estudos de Souza *et al.* (2023) registraram uma tensão superficial de 32,18 mN/m e uma CMC de 0,72 g/L ao utilizarem *C. guilliermondii* em meio suplementado com óleo de algodão bruto e sacarose. Lima *et al.* (2024), por sua vez, observaram uma CMC de 0,5 g/L e uma tensão superficial de 25 mN/m em

biossurfactante produzido por *Candida lipolytica*. Utilizando *Candida bombicola*, Silva *et al.* (2023) obtiveram redução da tensão superficial para 29 mN/m, com uma CMC de 0,5%.

Estudos adicionais demonstram a versatilidade de biossurfactantes produzidos por diversas espécies de *Candida* em diferentes condições de cultivo, reforçando o potencial desses microrganismos na produção de biossurfactantes com propriedades significativas. Por exemplo, estudos de Rocha Junior *et al.* (2018) indicaram que *Candida tropicalis* UCP0996 em meio suplementado com óleo de canola e glicerol resultou em uma CMC de 0,5% e uma tensão superficial de 28 mN/m. Posteriormente, utilizando a mesma cepa, Almeida *et al.* (2021) reportou uma CMC de 0,06% e redução da tensão superficial de 70,0 para 25,6 mN/m para o biossurfactante produzido em meio formulado com milhocina, melaço e óleo de fritura residual.

Figura 2 — Determinação da Concentração Crítica Micelar do biossurfactante produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 cultivada em meio suplementado com 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual, por 144 h a 200 rpm, com inóculo de 5% a 28 °C



Os resultados indicam que as características do meio de cultivo desempenham um papel crucial na eficiência da redução da tensão superficial. A obtenção consistente de baixas CMCs e valores reduzidos de tensão superficial em

diferentes espécies de *Candida* reforça o potencial desses biossurfactantes para aplicações industriais, onde a baixa concentração e a alta eficiência são essenciais. A Concentração Micelar Crítica (CMC) representa a mínima quantidade de biossurfactante necessária para alcançar a redução máxima da tensão superficial e iniciar a formação de micelas, sendo um parâmetro vital para comparar o desempenho de diferentes surfactantes (Johnson *et al.*, 2020; Turchi; Karcz; Andersson, 2022).

3.3 Capacidade emulsificante

O biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 apresentou capacidade de emulsificação de 100% em relação ao óleo de motor após 24 horas. Este resultado é comparável ao estudo de Silva *et al.* (2024) que obteve o mesmo resultado com o biossurfactante produzido pela *C. glabrata* UCP 1002 e Selva Filho *et al.* (2024), que obteve 95,43% de emulsificação para óleo de motor de escape com o biossurfactante produzido pela levedura *Starmerella bombicola* ATCC 22214, respectivamente.

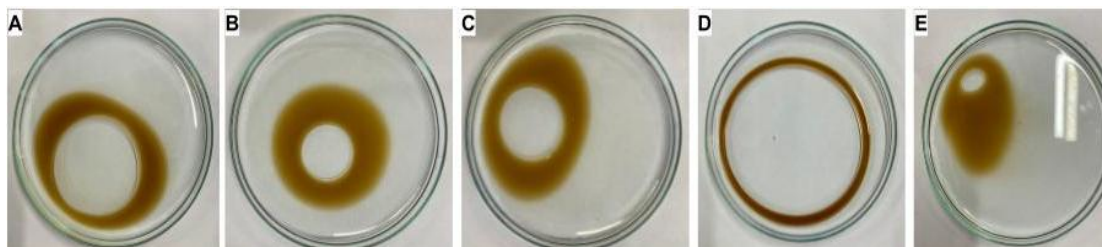
3.4 Dispersão de óleo

Foi investigada a capacidade do biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 no meio contendo milhocina (2,5%) e óleo residual de fritura (5%) após 144h de fermentação, quanto ao potencial dispersante. A Figura 3 ilustra a dispersão de óleo de motor queimado pelo biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 bruto (líquido metabólico livre de células) e nas concentrações de $\frac{1}{2}$ CMC, 1 CMC e 2 CMC, e sua contraparte sintética, o SDS.

Os resultados obtidos indicam que o biossurfactante apresenta elevado potencial como agente dispersante de óleo de motor queimado, evidenciado por sua capacidade de gerar uma área de deslocamento eficiente do óleo. Observou-se que o biossurfactante foi eficaz em concentrações correspondentes a $\frac{1}{2}$ CMC e 1 CMC, apresentando desempenho ainda mais significativo em 2 CMC. O líquido metabólico livre de células mostrou-se igualmente eficaz na dispersão do óleo, sugerindo a possibilidade de sua aplicação direta em processos de biorremediação, sem a necessidade de etapas de purificação. Comparativamente, todos os testes

realizados com o biossurfactante demonstraram resultados consideravelmente superiores aos obtidos com o SDS, reforçando seu potencial para uso em aplicações práticas e industriais.

Figura 3 — Dispersão de óleo de motor queimado pelo biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 e por SDS: (A) Líquido metabólico livre de células; (B) $\frac{1}{2}$ CMC; (C) 1 CMC; (D) 2 CMC; (E) SDS



3.5 Estabilidade do biossurfactante sob diferentes condições ambientais (pH, salinidade e temperatura)

O líquido metabólico livre de células produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 após 144 h de cultivo foi analisado sob diversas condições ambientais, simulando variações em pH, temperatura e salinidade. Os parâmetros utilizados para a avaliação incluíram a capacidade de emulsificação e a tensão superficial, visando identificar o desempenho e a estabilidade do biossurfactante em diferentes cenários.

Os resultados mostraram pequenas variações na tensão superficial conforme alterações no pH. Em condições de pH ácido (entre 2 e 4), a tensão superficial foi maior do que nos valores sem ajustes de pH, apresentando níveis superiores a 30 mN/m. Com o aumento do pH para níveis alcalinos, a tensão superficial diminuiu, mantendo-se abaixo de 30 mN/m. Além disso, observaram-se variações na tensão superficial relacionadas à temperatura e à adição de NaCl. No caso da temperatura, apesar de a tensão superficial ter permanecido estável, houve um aumento para 33 mN/m. Já com a adição de NaCl, a tensão superficial diminuiu para 28 mN/m, mantendo-se constante independentemente da concentração de sal utilizada (Tabela 1).

Esses resultados obtidos indicam que a tensão superficial do biossurfactante é influenciada por variações no pH, na temperatura e pela presença de NaCl, com implicações importantes para seu desempenho em diferentes condições ambientais, sugerindo que, para aplicações práticas, o controle e ajuste das variáveis ambientais podem ser ferramentas estratégicas para maximizar o desempenho e a estabilidade do biossurfactante em diferentes contextos.

Tabela 1 — Estabilidade da tensão superficial do biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivado em água destilada suplementada com milhocina (2,5%) e óleo de fritura residual (5%) com variações de quantidade de NaCl, temperatura e pH

pH	Tensão Superficial (mN/m)	Temperatura (°C)	Tensão Superficial (mN/m)	NaCl (%)	Tensão Superficial (mN/m)
2	32 ± 1.41	0	33 ± 1.5	2	28 ± 1.8
4	32 ± 1.9	5	33 ± 1.7	4	28 ± 1.4
6	30 ± 1.6	28	33 ± 1.2	6	28 ± 1.5
8	26 ± 1.31	70	33 ± 1.6	8	28 ± 1.6
10	28 ± 1.5	-	-	10	28 ± 1.2
12	28 ± 1.2	-	-	12	28 ± 1.6

A capacidade emulsificante de biossurfactantes desempenha um papel essencial ao permitir a estabilização de misturas água-óleo, o que amplia suas aplicações em diversas áreas, como remediação ambiental, indústria alimentícia, farmacêutica e no desenvolvimento de bioprodutos sustentáveis (Ali *et al.*, 2024).

Os resultados obtidos indicam que o biossurfactante produzido apresenta capacidade emulsificante para óleo de motor, com índices de emulsificação superiores a 50%. Analisando as variações de pH, verificou-se que os melhores resultados ocorreram em condições de pH ácido, com valores variando de 82% a 94%. Mesmo com variações de temperatura, o biossurfactante manteve sua capacidade de emulsificação, apresentando índices entre 70% e 84%. Por outro lado, ao adicionar NaCl, os índices de emulsificação variaram de 50% a 60%, o que demonstra que o biossurfactante ainda possui capacidade de emulsificar sob diferentes condições de salinidade (Tabela 2). Esses dados reforçam a versatilidade e eficácia do biossurfactante em contextos variados.

Tabela 2 — Estabilidade da emulsificação de óleo de motor pelo biossurfactante de *C. guilliermondii* UCP 1592 cultivado em água destilada suplementada com milhocina (2,5%) e óleo de fritura residual (5%) com variações de quantidade de NaCl, temperatura e pH

pH	IE para óleo motor (%)	Temperatura (°C)	IE para óleo motor (%)	NaCl (%)	IE para óleo motor (%)
2	89 ± 1.4	0	70 ± 1.6	2	60 ± 2.1
4	94 ± 1.7	5	80 ± 1.1	4	52 ± 1.4
6	82 ± 1.3	28	80 ± 1.5	6	52 ± 1.8
8	70 ± 1.4	70	82 ± 1.3	8	51 ± 1.5
10	70 ± 1.2	-	-	10	50 ± 1.9
12	61 ± 1.5	-	-	12	51 ± 1.2

3.6 Caracterização estrutural do biossurfactante

O biossurfactante produzido pela levedura *C. guilliermondii* UCP 1592 em meio formulado com 2,5% de milhocina e 5% de óleo de fritura residual foi caracterizado estruturalmente utilizando Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para prever sua possível natureza química. A FTIR foi utilizada para identificar os grupos funcionais de superfície, enquanto o RMN de ^1H e ^{13}C foi utilizado para caracterizar a composição química do biossurfactante.

O espectro de RMN de ^1H sugeriu a presença de hidrogênios em grupos alquil (CH_3 , CH_2 , CH) ligados a carbonos saturados por volta dos picos 1-2 ppm. A presença de múltiplos picos ou sinais acoplados sugere a presença de grupos funcionais próximos uns dos outros, típicos de cadeias hidrocarbonadas que interagem entre si (Figura 4).

O espectro de RMN de ^{13}C revelou picos significativos entre 10-70 ppm (indicativo de carbonos em grupos alquila), em torno de 120-150 ppm (indicando carbonos em anéis aromáticos ou carbonos insaturados em ligações duplas), e um pico intenso em cerca de 180 ppm, o que é indicativo da presença de carbonos carbonílicos ($\text{C}=\text{O}$), o que indica a presença de grupos funcionais como ésteres, ácidos carboxílicos ou cetonas (Figura 5).

Figura 4 — Espectros de ^1H RMN (A) e ^{13}C RMN (B) do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 1592

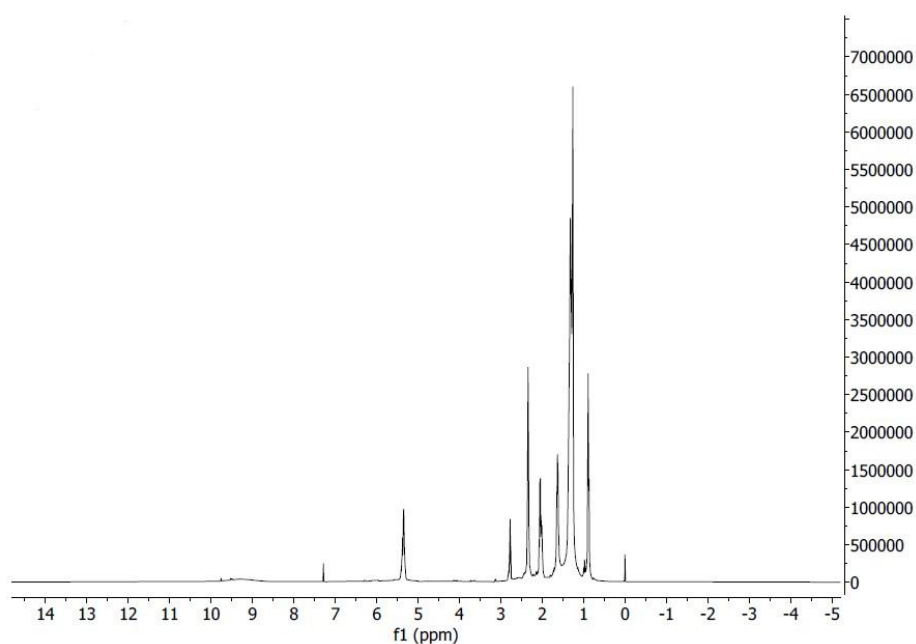
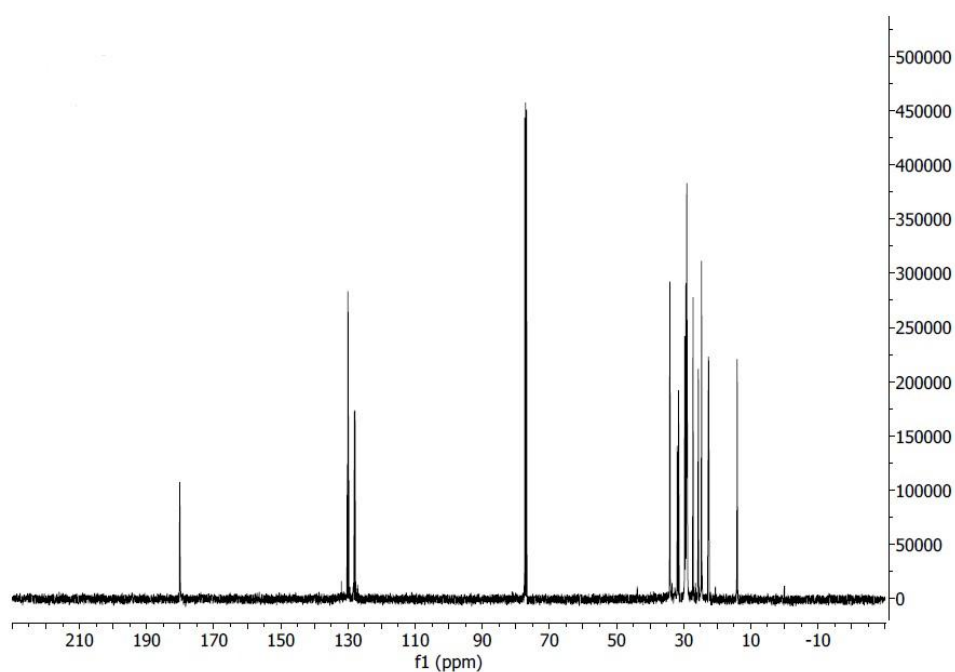


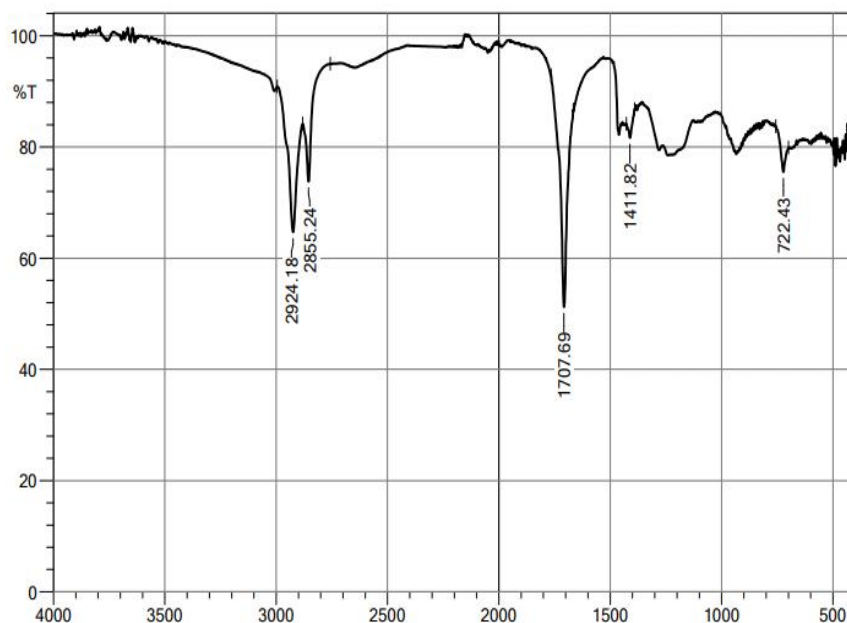
Figura 5 — Espectros de ^{13}C RMN do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 1592



A espectroscopia FTIR (Figura 6) revelou que os picos de 2924 cm^{-1} e 2855 cm^{-1} são atribuídos às vibrações de estiramento C-H em grupos CH_2 e CH_3 , as quais são comuns em longas cadeias alquil. Um pico correspondente ao grupo funcional carbonila ($\text{C}=\text{O}$) foi encontrado em $1710,96\text{ cm}^{-1}$. Já os picos em 1411 cm^{-1} e 722 cm^{-1} podem ser indicativos de deformações de ligação em cadeias alifáticas. Isso sugere que o biossurfactante é um composto anfifílico com uma cabeça polar (grupo éster) e uma cauda apolar (cadeia alifática).

A análise dos espectros sugere que o biossurfactante estudado possui uma estrutura típica de compostos anfifílicos, com uma cauda hidrofóbica constituída por uma longa cadeia alifática e uma cabeça polar, provavelmente contendo um grupo éster. Essa organização estrutural é responsável pela sua capacidade de reduzir a tensão superficial, característica essencial para biossurfactantes.

Figura 6 — Espectro FTIR do biossurfactante purificado de *Candida guilliermondii* UCP 1592



A presença de picos significativos no espectro de ^{13}C próximo a 200 ppm e no espectro de FTIR em 1707 cm^{-1} sugere que a molécula contém um grupo carbonílico ($\text{C}=\text{O}$). A multiplicidade e os deslocamentos químicos no espectro de ^1H

indicam a presença de grupos alifáticos (CH₂, CH₃) que são compatíveis com os sinais em 2924 cm⁻¹ e 2855 cm⁻¹ no FTIR. Portanto, pode-se concluir que o biossurfactante é possivelmente um ácido graxo metabolizado pelo microrganismo, evidenciado pela presença de cadeias alifáticas, grupos carbonila e ligações duplas características.

3.7 Avaliação da toxicidade do biossurfactante

3.7.1 Toxicidade frente ao *Tenebrio molitor*

A larva *Tenebrio molitor*, conhecida como larva da farinha amarela, tem sido utilizada como modelo para avaliar a toxicidade de biossurfactantes devido à sua sensibilidade a mudanças ambientais e estímulos bioquímicos (Lima *et al.* 2024; Silva *et al.*, 2024). O presente estudo analisou a toxicidade do biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592 e obteve uma taxa de sobrevivência de 100% após 120 horas de ensaio, mesmo resultado obtido com o controle negativo (PBS).

Não foram identificadas alterações físicas nas larvas, como mudanças na coloração ou alterações na mobilidade, sendo esses indicadores frequentemente associados a processos de estresse ou exposição tóxica. Esses resultados sugerem que o biossurfactante testado não apresentou efeitos tóxicos sobre as larvas *T. molitor*. Esse resultado é semelhante aos relatados por Lima *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2024), que também avaliaram a toxicidade de biossurfactantes produzidos por *C. lipolytica* e *C. glabrata*, respectivamente.

Larvas de *Tenebrio molitor* tem se tornado um modelo alternativo amplamente utilizado para estudos de toxicidade devido às suas características biológicas, custo reduzido e facilidade de manipulação. As larvas dessa espécie oferecem uma série de vantagens em comparação com modelos tradicionais baseados em vertebrados, como a menor demanda de infraestrutura, a simplicidade no manejo experimental e o menor custo associado (Brai *et al.*, 2023).

3.7.2 *Artemia salina*

A *Artemia salina* é um microcrustáceo amplamente reconhecido como bioindicador em ensaios de toxicidade devido à sua fácil manipulação em condições laboratoriais, baixo custo operacional e curto ciclo de vida, características que tornam sua utilização eficiente e confiável em estudos toxicológicos (Meyer *et al.*, 1982).

No presente experimento, as larvas de *A. salina* foram expostas a soluções contendo diferentes concentrações do biossurfactante, correspondentes a 1/2 CMC (0,15 g/L), 1 CMC (0,3 g/L) e 2 CMC (0,6 g/L), por um período de 24 horas. Os resultados mostraram uma taxa de sobrevivência de 100% em todas as concentrações testadas, evidenciando a completa ausência de toxicidade do composto sob as condições avaliadas.

Esses achados ressaltam o potencial de aplicação do biossurfactante em ambientes aquáticos, indicando sua segurança para organismos não-alvo e sua viabilidade em usos que exijam baixa toxicidade ambiental. Além disso, a alta taxa de sobrevivência das larvas reforça a possibilidade de utilização do biossurfactante em diferentes contextos, como na biorremediação de ambientes aquáticos ou em formulações destinadas ao manejo sustentável desses ecossistemas.

3.8 Aplicação de biossurfactante na limpeza de superfícies contaminadas com composto hidrofóbico

Este estudo investigou o potencial do biossurfactante produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 como um agente desengordurante e de limpeza em superfície lisa, cujo material trata-se de vidro, e de tecidos de algodão impregnados com óleo de motor queimado.

O teste de limpeza em superfície de vidro, realizado com concentrações de 1/2, 1 e 2 CMC, demonstrou a alta eficiência do biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592, capaz de solubilizar 100% do óleo de motor em todas as concentrações testadas. Esse resultado destaca sua eficácia, mesmo em concentrações abaixo da CMC, o que reforça o seu potencial para aplicações práticas. Barata *et al.* (2024) relataram 98,42% de remoção de óleo em superfícies de vidro utilizando biossurfactante de *Bacillus invictae* UCP1617, enquanto Farias *et al.* (2021b) obtiveram 100% de remoção com biossurfactante de *Pseudomonas* spp. cultivado em meio mineral contendo 5,0% de glicerol e 2,0% de glicose. Esses

dados evidenciam que o biossurfactante avaliado no presente estudo apresenta desempenho equivalente aos melhores resultados previamente descritos na literatura.

Os resultados da lavagem dos tecidos de algodão contaminados com óleo de motor queimado com o biossurfactante produzido estão apresentados na Figura 7. Os resultados iniciais mostraram que houve remoção na primeira hora de limpeza, com porcentagens de remoção de 29%, 38% e 47% para concentrações de $\frac{1}{2}$ CMC (0,15 g/L), 1CMC (0,3 g/L) e 2CMC (0,6 g/L), atingindo 57%, 70% e 91% para as mesmas concentrações ao final de 12h, respectivamente.

O teste demonstrou o alto potencial do biossurfactante como agente de remoção de óleo impregnado em tecidos de algodão, destacando-se principalmente na concentração de 2 CMC. Este apresentou remoção de 67%, 78% e 85%, nos tempos de 2h, 4h e 6h, respectivamente. O comportamento de remoção foi consistente até o final do experimento, alcançando a remoção de 91% em 12h. A concentração de 1 CMC também mostrou bons resultados, com remoção acima de 50% a partir de 2h de lavagem, alcançando 70% ao final do experimento.

O SDS teve um desempenho inicial semelhante ao do biossurfactante em 1 CMC, mas sua eficiência caiu após 6 horas, ficando abaixo de 50% ao final do teste. Essa queda sugere limitações no mecanismo de ação do SDS em comparação com os biossurfactantes, que se mostraram mais eficazes e consistentes.

Por fim, a água foi o agente menos eficiente, atingindo apenas cerca de 25% de remoção no pico de desempenho (4h) e apresentando um declínio posterior. Isso confirma que a água, isoladamente, tem baixa capacidade de remover óleo impregnado em tecidos. Após a lavagem, os tecidos de algodão foram avaliados quanto à sua integridade estrutural por meio de observação em microscópio óptico, revelando que as fibras permaneceram sem alterações estruturais (Figura 8).

Figura 7 — Percentual de remoção de óleo de motor queimado de tecidos de algodão usando biossurfactante produzido por *C. guilliermondii* UCP 1592

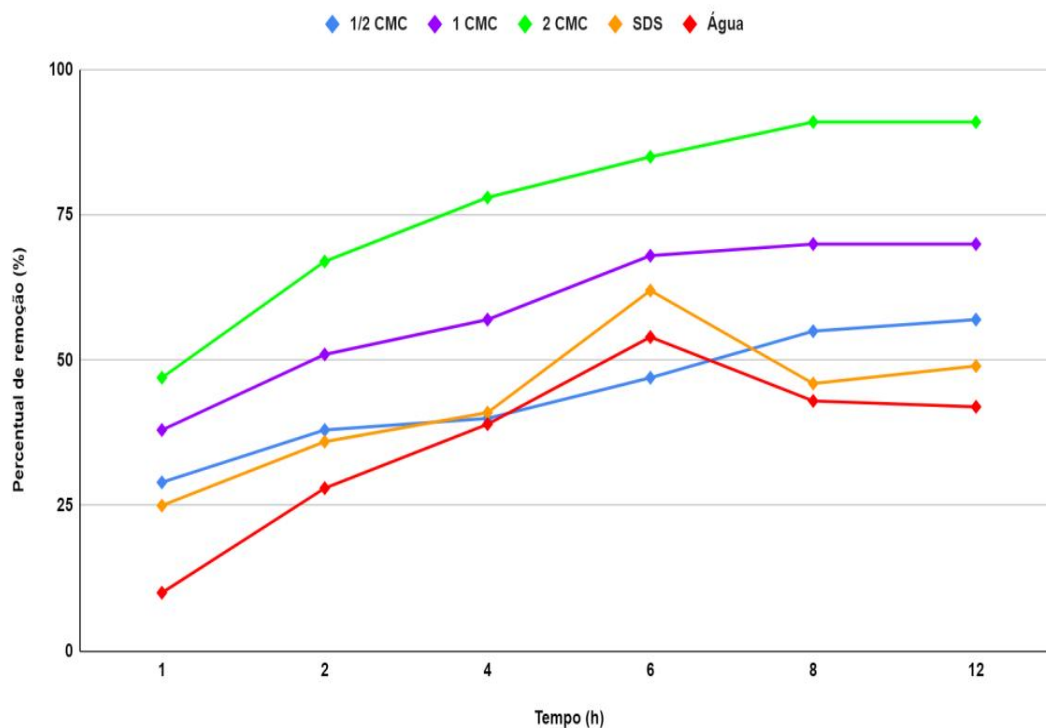
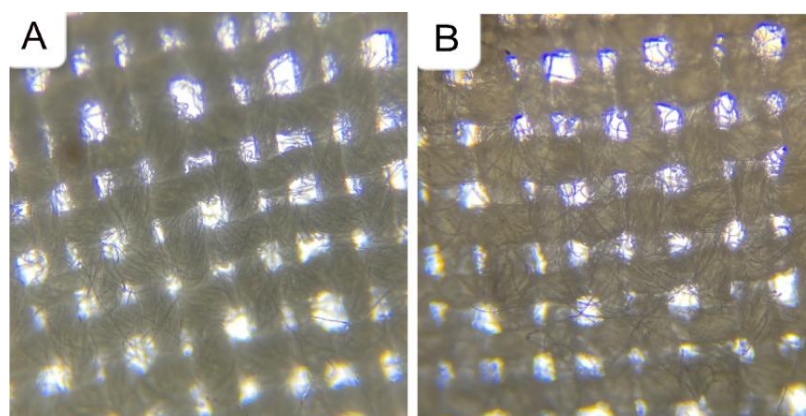


Figura 8 — Avaliação da integridade estrutural de tecidos de algodão (A) tecido limpo e sem óleo; (B) tecido após lavagem



Silva *et al.* (2024b) investigaram a capacidade do biossurfactante produzido por *C. glabrata* em meio suplementado com 2,5% de óleo de fritura residual, 2,5% de melaço e 2,5% milhocina, em atuar como agente desengordurante e de limpeza em tecidos de algodão impregnados com óleo de motor queimado. Os resultados

mostraram que o biossurfactante foi capaz de remover mais de 50% do composto hidrofóbico em todos os períodos de teste realizados, alcançando até 96,6% de remoção após 12 horas de lavagem a uma concentração de 0,6 g/L ($2\times$ CMC). Em estudo anterior, Andrade *et al.* (2018) investigaram a capacidade de um biossurfactante produzido por *C. echinulata* de atuar na limpeza de tecidos de algodão impregnados com óleo de motor nas mesmas condições, alcançando uma taxa de remoção de 86% após 1 hora de lavagem.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que o biossurfactante produzido pela levedura *Candida guilliermondii* UCP 1592 possui potencial, tanto pela eficiência em sua produção quanto pela ampla gama de aplicações. Esse biossurfactante demonstrou capacidade em reduzir a tensão superficial da água, formando micelas mesmo em baixas concentrações, o que comprova sua elevada eficácia como agente surfactante. Além disso, foi capaz de emulsificar óleo de motor queimado, o que ressalta sua viabilidade para aplicações industriais, especialmente em biorremediação e no desenvolvimento de produtos de limpeza sustentáveis. Assim, este biossurfactante representa uma alternativa eficaz, sustentável e alinhada às necessidades de práticas mais responsáveis e ecologicamente corretas no setor industrial e ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABBOT, V. *et al.* A review on the physicochemical and biological applications of biosurfactants in biotechnology and pharmaceuticals. **Heliyon**, v. 8, n. 8, e10149, 2022.
- ALI, A. *et al.* Biosurfactants as an alternative eco-friendly solution for water-in-diesel emulsions-A review paper. **Heliyon**, v. 10, n. 17, 2024.
- ALMEIDA, D. G. *et al.* Production, Characterization and Commercial Formulation of a Biosurfactant from *Candida tropicalis* UCP0996 and Its Application in Decontamination of Petroleum Pollutants. **Processes**, v. 9, n. 5, 2021.
- AMBECHADA, J. K; UMRANIA, V. V. Sustainable biosurfactant production from agro-industry waste and by-products. **Journal of Advances in Microbiology Research**, v. 5, n. 2, p. 42–49, 2024.

ANDRADE, R. F. S. *et al.* Promising Biosurfactant Produced by *Cunninghamella echinulata* UCP 1299 Using Renewable Resources and Its Application in Cotton Fabric Cleaning Process. **Advances in Material Science and Engineering**, 2018.

ANNUAR, N. *et al.* Biosurfactant and bioemulsifier production by hydrocarbonoclastic bacteria isolated from petroleum sludge as potential biodispersant for oil spill remediation. **Desalination and Water Treatment**, v. 313, p. 243–251, 2023.

BALAKRISHNAN, S. *et al.* Biosurfactants: An Antiviral Perspective. *In: Multifunctional Microbial Biosurfactants*. Springer Nature Switzerland, 2023.

BARATA, M. I. C. *et al.* Optimized production and properties of biosurfactant from *Bacillus invictae* UCP1617 and its performance in a detergent formulation for environmental applications. **Journal of Surfactants and Detergents**, v. 28, n. 1, 2024.

BEGUM, W.; SAHA, B.; MANDAL, U.. A comprehensive review on production of biosurfactants by bio-degradation of waste carbohydrate feedstocks: an approach towards sustainable development. **RSC advances**, v. 13, n. 36, p. 25599–25615, 2023.

BEZERRA, K. G. O. *et al.* Saponins and microbial biosurfactants: Potential raw materials for the formulation of cosmetics. **Biotechnology Progress**, v. 34, n. 6, p. 1482–1493, 2018.

BRAI, A. *et al.* Tenebrio molitor as a Simple and Cheap Preclinical Pharmacokinetic and Toxicity Model. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, 2023.

CHABHADIYA, S. *et al.* Unlocking the potential of biosurfactants: Innovations in metabolic and genetic engineering for sustainable industrial and environmental solutions. **Biotechnology Notes**, v. 5, p. 111–119, 2024.

DAS, P.; MUKHERJEE, S.; SEN, R. Biosurfactant of marine origin exhibiting heavy metal remediation properties. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 4887–4890, 2009.

DATTA, D. *et al.* Microbial biosurfactants: Multifarious applications in sustainable agriculture. **Microbiological Research**, v. 279, 127551, 2024.

DRAKONTIS, C. E.; AMIN, S. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 48, p. 77–90, 2020.

FARIAS, C. B. B. *et al.* Evaluation of the Stability of a Non-toxic Biodetergent for the Removal of Petroderivates in Industries. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 583-588, 2021.

FARIAS, C. B. B. *et al.* Removal of heavy oil from contaminated surfaces with a detergent formulation containing biosurfactants produced by *Pseudomonas* spp. **Environmental Science**, v. 9, e12518, 2021b.

GAUR, V. K. *et al.* Valorization of agro-industrial waste for rhamnolipid production, its role in crude oil solubilization and resensitizing bacterial pathogens. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, 102108, 2022.

HELDIN, A. M.; HOSSAN, N. Microbial surfactants: characteristics, production and broader application prospects in environment and industry. **Preparative Biochemistry & Biotechnology**, v. 53, n. 9, p. 1013-1042, 2023.

HERNÁNDEZ, M. L.; PEDERSEN, J. S.; OTZEN, D. E. Proteins and biosurfactants: Structures, functions, and recent applications. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 68, 101746, 2023.

JAHAN, R. *et al.* Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 275, 102061, 2020.

JOHNSON, P. *et al.* Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 288, 102340, 2021.

LIMA, B. G. A. *et al.* Sustainable Production of Biosurfactant Grown in Medium with Industrial Waste and Use for Removal of Oil from Soil and Seawater. **Surfaces**, v. 7, n. 3, p. 537–549, 2024.

LOURENÇO, M.; DUARTE, N.; RIBEIRO, I. A. C. Exploring Biosurfactants as Antimicrobial Approaches. **Pharmaceuticals**, v. 17, n. 9, 1239, 2024.

LUNA, J. M. *et al.* Environmental applications of the biosurfactant produced by *Candida sphaerica* cultivated in low-cost substrates. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 480, p. 413-418, 2015.

MARKAM, S. S. *et al.* Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, 100266, 2024.

MARKETS and MARKETS. Which are the major players in biosurfactants market? Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biosurfactant-market-163644922.html>. Acesso em: 29 Sep. 2024.

MEYER, B. N. *et al.* Brine shrimp: a convenient general bioassay for active plants constituents. **Planta Med**, v. 45, p. 31–34, 1982.

PINTO, M. I. S. *et al.* A Biosurfactant from *Candida bombicola*: Its Synthesis, Characterization, and its Application as a Food Emulsions. **Foods**, v. 11, n. 4, 2022.

QAMAR, S. A.; PACIFICO, S. Cleaner production of biosurfactants via bio-waste valorization: A comprehensive review of characteristics, challenges, and opportunities in bio-sector applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, 111555, 2023.

RIBEIRO, B. G. *et al.* Biosurfactant produced by *Candida utilis* UFPEDA1009 with potential application in cookie formulation. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 46, p. 14–21, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.05.001>

ROCHA JUNIOR, R. B. *et al.* Application of a low-cost biosurfactant in heavy metal remediation processes. **Biodegradation**, v. 30, n. 4, p. 215–233, 2018.

SANI, A. *et al.* Structural diversity and applications of lipopeptide biosurfactants as biocontrol agents against phytopathogens: A review. **Microbiological Research**, v. 278, 127518, 2024.

SANTOS, C. V. M. *et al.* Biosurfactant Production from Pineapple Waste and Application of Experimental Design and Statistical Analysis. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.195, p.386–400, 2023.

SARUBBO, L. A. *et al.* Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives. **Biochemical Engineering Journal**, v. 181, 108377, 2022.

SELVA FILHO, A. A. P. *et al.* Maximization of the Production of a Low-Cost Biosurfactant for Application in the Treatment of Soils Contaminated with Hydrocarbons. **Sustainability**, v. 16, n. 18, 2024.

SHARMA, J.; SUNDAR, D.; SRIVASTAVA, P. Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism. **Frontiers in Molecular Biosciences**, v. 8, 2021.

SILVA, I. A. *et al.* 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, 2024.

SILVA, R. R. *et al.* Microbial Biosurfactant: *Candida bombicola* as a Potential Remediator of Environments Contaminated by Heavy Metals. **Microorganisms**, v. 11, n. 11, 2023.

SILVA, R. R. *et al.* Production, Characterization and Application of Biosurfactant for Cleaning Cotton Fabric and Removing Oil from Contaminated Sand. **Processes**, v. 12, n. 11, 2024b.

SILVA, T. F. *et al.* Products Derived from *Buchenavia tetraphylla* Leaves Have In Vitro Antioxidant Activity and Protect *Tenebrio molitor* Larvae against *Escherichia coli*-Induced Injury. **Pharmaceuticals**, v. 13, n. 3, 2020.

SINGH, V. Biosurfactants for the recovery and remediation of oil and petroleum waste. *In: Microbial Consortium and Biotransformation for Pollution Decontamination*. Elsevier, 2022, p. 299–320.

SOUZA, C. V. M. *et al.* Production of the Biosurfactant *Candida Guilliermondii* and Application in the Formulation of a Natural Detergent. **Chemical Engineering Transactions**, v. 100, 85-90, 2023.

THAKUR, V. *et al.* Recent progress in microbial biosurfactants production strategies: Applications, technological bottlenecks, and future outlook. **Bioresource Technology**, v. 408, 131211, 2024.

TIQUIA, S. M.; TAM, N. F. Y.; HODGKISS, I. J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. **Environmental Pollution**, v.93, p. 249-256, 1996.

TURCHI, M.; KARCZ, A.P.; ANDERSSON, M.P. First-principles prediction of critical micellar concentrations for ionic and nonionic surfactants. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 606, p. 618–627, 2022.

YUMNAM, G.; GYANENDRA, Y.; SINGH, C. I. A systematic bibliometric review of the global research dynamics of United Nations Sustainable Development Goals 2030. **Sustainable Futures**, v. 7, 100192, 2024.

ZHOU, Y. et al. Optimization of fermentation conditions for surfactin production by *B. subtilis* YPS-32. **BMC Microbiology**, v. 23, n. 1, 2023.

CAPÍTULO III

Artigo submetido à revista Natural Product Research — Fator de Impacto: 1.9

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ANTIMICROBIANO DO EXTRATO HEXÂNICO DE *Acmella oleracea*

Yali Alves da Silva¹, Hozana de Souza Ferreira², Adriene Siqueira de Melo³, Kaleen Massari Leite⁴, Hugo Morais Meira^{5,7}, Leonie Asfora Sarubbo^{6,7}, Juliana Moura de Luna³

¹Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

²Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

³Escola de Saúde e Ciências da Vida, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

⁴Mestrado em Bioquímica e Fisiologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

⁵Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

⁶Escola de Comunicação e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

⁷Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Recife, Brasil

Resumo

Diante do aumento crítico da resistência microbiana, a identificação de novos compostos naturais com propriedades antimicrobianas, como os derivados de *Acmella oleracea*, emerge como uma abordagem indispensável para enfrentar os desafios terapêuticos globais. Este estudo investigou o rendimento do extrato de *Acmella oleracea* extraído por solventes de diferentes polaridades (água, etanol e hexano), além do potencial antimicrobiano dos extrato frente a microrganismos Gram-positivos, Gram-negativos e leveduras, evidenciando eficácia de composição bioativa. O extrato hexânico apresentou um rendimento de 2,04% e revelou, por análise de FTIR, uma composição rica em lipídios, compostos fenólicos e espilantol,

conhecidos por suas propriedades antimicrobianas. No ensaio de difusão em disco, *Candida guilliermondii* (32,33 mm) e *Candida albicans* (30,67 mm) apresentaram os maiores halos de inibição, enquanto *Bacillus cereus* (24,67 mm) e *Staphylococcus aureus* (23,67 mm) também demonstraram elevada sensibilidade. Na análise de Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida (CB), *Candida albicans* e *C. guilliermondii* exibiram as menores CIMs (0,156 mg/mL), indicando forte atividade antifúngica. Para as bactérias Gram-positivas, *Staphylococcus aureus* (CIM 1,25 mg/mL) e *Bacillus cereus* (CIM 0,625 mg/mL) destacaram-se como sensíveis, enquanto *Pseudomonas aeruginosa* apresentou maior resistência (CIM 10 mg/mL). Os achados confirmam o potencial do extrato hexânico de *Acmella oleracea* como agente antimicrobiano, particularmente eficaz contra leveduras e Gram-positivas. Esses resultados reforçam a relevância de investigações futuras voltadas para os compostos bioativos do jambu, contribuindo para a busca por alternativas naturais no combate à resistência antimicrobiana.

Palavras-chave: *Acmella oleracea*; antimicrobiano natural; resistência microbiana.

1 INTRODUÇÃO

Descobertos no início do século XX, os antibióticos revolucionaram a medicina, mas a resistência antimicrobiana (RAM) tornou-se uma grave ameaça à saúde global e à pecuária. Em 2019, a RAM causou 1,27 milhão de mortes, superando AIDS e malária. Favorecida pelo uso prolongado de antibióticos, a resistência atinge até medicamentos em teste. Reconhecida pela OMS como uma emergência mundial, prevê-se que a RAM cause 10 milhões de mortes anuais até 2050, superando o câncer (Bognár; Spohn; Lázár, 2024; WHO, 2023; Dadgostar, 2019).

O aumento alarmante de microrganismos multirresistentes a antibióticos representa uma das maiores ameaças à saúde global na atualidade. Infecções causadas por bactérias resistentes, como *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina, *Escherichia coli* produtora de beta-lactamases de espectro estendido e *Klebsiella pneumoniae* resistente a carbapenêmicos, têm aumentado significativamente a morbidade, mortalidade e os custos relacionados à saúde (Ferdinand *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2022; Elmanakhly *et al.*, 2022). A

resistência antimicrobiana compromete a eficácia de tratamentos convencionais, limitando as opções terapêuticas e exigindo intervenções urgentes para o desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos capazes de superar esses desafios (Rabi, 2024; Desai *et al.*, 2022).

Nesse cenário, a prospecção de novos compostos bioativos em fontes naturais tem se mostrado uma abordagem promissora. Biomas megadiversos, como a Amazônia, oferecem um vasto potencial para a descoberta de moléculas com propriedades farmacológicas inéditas. A floresta amazônica, considerada o ecossistema mais rico em biodiversidade do planeta, abriga uma infinidade de espécies vegetais que, em sua maioria, permanecem pouco estudadas (Assumpção; Silva; Mendes, 2022; Batista; Raposo; Silva, 2018).

Entre as plantas de destaque na região amazônica está *Acmella oleracea*, popularmente conhecida como jambu. Trata-se de uma espécie pertencente à família Asteraceae, amplamente cultivada e utilizada na culinária e na medicina tradicional em países tropicais (Savant; Kareppa, 2022). Na cultura amazônica, o jambu é amplamente conhecido por seu efeito anestésico local e suas propriedades anti-inflamatórias. Esses efeitos são atribuídos, em grande parte, ao espilantol, um composto lipofílico majoritário encontrado nos extratos da planta, com reconhecida atividade biológica (Bellumori *et al.*, 2022).

A exploração do potencial antimicrobiano de *A. oleracea*, especialmente frente a patógenos resistentes, é, portanto, uma oportunidade promissora para identificar novos agentes terapêuticos de origem natural (Alencar *et al.*, 2022).

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial antimicrobiano do extrato hexânico de *A. oleracea* frente a diferentes microrganismos, incluindo bactérias resistentes a antibióticos, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre essa espécie e para a busca de novas estratégias no combate à resistência antimicrobiana.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

As flores desidratadas de *Acmella oleracea*, de coloração amarela a marrom, foram adquiridas em um estabelecimento comercial localizado na cidade de São

Paulo, Brasil (Empório Muritiba, Butantã, São Paulo). A matéria-prima foi armazenada em sua embalagem original, envolta em papel laminado para melhor preservação até o momento de sua utilização. Por se tratar de um material proveniente de fornecedor comercial, não foi realizado o registro de espécime voucher.

2.2 Obtenção do extrato vegetal

As flores desidratadas de *Acmella oleracea* foram submetidas a um processo de extração exaustiva utilizando solventes com polaridades distintas (água, etanol e hexano), separadamente, na proporção de 1:10 (vegetal/solvente) e mantida em repouso por 72 horas. Após esse período, as soluções foram filtradas para remoção de partículas grosseiras e os extratos obtidos foram concentrados, separadamente, sob vácuo em rotaevaporador (Te-210, Tecnal, Piracicaba, São Paulo, Brasil), resultando nos extratos aquoso, etanólico e hexânico bruto (Maimulyanti; Prihadi, 2016). O rendimento dos respectivos extratos se deu utilizando a seguinte equação (Bueno, 2019):

$$R\% = \frac{\text{massa do extrato obtida}}{\text{massa de planta utilizada}} \times 100$$

2.3 Caracterização do extrato vegetal por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para elucidação da composição química do extrato hexânico de *Acmella oleracea*, foi empregado o método de Espectroscopia de Infravermelho. A análise em espectroscopia de infravermelho foi realizada em um espectrômetro FT-IR (Spectrum 400, Perkin Elmer, Shelton, CT, USA) na faixa espectral de 4.000 a 400 cm⁻¹. A precisão foi mantida na faixa do número de onda de -0,1 a +0,1 cm⁻¹.

2.4 Avaliação da atividade antimicrobiana dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de *Acmella oleracea*

2.4.1 Teste antimicrobiano preliminar

Para avaliação preliminar da atividade antimicrobiana dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de *Acmella oleracea*, foi empregado o teste em difusão em disco, utilizando cepas de *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* e *Enterobacter* sp. como patógenos alvo. Vinte µL dos respectivos extratos foram depositados em discos de papel estéreis (5 mm de diâmetro de Whatmann N°1) e colocados em uma placa de Petri contendo o patógeno em meio ágar Mueller-Hinton.

2.4.2 Teste de difusão de disco do extrato hexânico

A atividade antimicrobiana do extrato hexânico foi avaliada pelo método de difusão em disco Kirby-Bauer contra três bactérias Gram-positivas (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*), três bactérias Gram-negativas (*Enterobacter faecalis*, *Escherichia coli* e *Pseudomonas aeruginosa*) em meio ágar Mueller-Hinton (SigmaAldrich) e duas leveduras (*Candida albicans* e *Candida guilliermondii*) em meio Sabouraud. Os pré-inóculos dos microrganismos alvo foram padronizados na escala de MacFarland 0,5, correspondendo a $1,5 \times 10^8$ unidades formadoras de colônias UFC/mL. Vinte µL do extrato foi depositado em discos de papel estéreis (5 mm de diâmetro de Whatmann N°1) e colocados em uma placa de Petri contendo o patógeno em meio ágar Mueller-Hinton. O mesmo foi realizado com as leveduras alvo, utilizando placas contendo o meio Sabouraud. As placas contendo as bactérias foram incubadas a 37 °C por 24, enquanto as placas com leveduras foram incubadas a 28 °C, pelo mesmo período. As zonas de inibição foram medidas e espessas em mm (Leyton *et al.*, 2021).

Esse ensaio preliminar teve como objetivo identificar os microrganismos suscetíveis ao extrato, servindo de base para a determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida (CB) do composto.

2.4.3 Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida (CB) do extrato hexânico

O ensaio para determinar a CIM foi realizado em triplicata, onde cada coluna correspondeu a uma repetição. Como controle, foi realizado controle de esterilidade

(apenas o meio de cultura), controle de crescimento do microrganismo (meio de cultura + inóculo padronizado) e controle de toxicidade (diluyente + inóculo padronizado). O extrato vegetal foi diluído em uma solução contendo 50% de etanol, 1% de tween 80 e 49% de água destilada, na concentração de 100 mg/ml do extrato; posteriormente, foi filtrado utilizando seringa estéril e filtro PTFE de 0,22 µl. As microplacas de fundo plano de 96 poços foram preenchidas com um volume final de 100 µL (extrato vegetal + meio de cultura + inóculo padronizado). Suspensões bacterianas de *Staphylococcus aureus*, *Enterobacter*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas aeruginosa* foram obtidas por caldo Mueller Hinton. A suspensão da levedura *Candida albicans* e *Candida guilliermondii* foram obtidas usando caldo dextrose Sabouraud (SDB, Merck). Os pré-inóculos dos microrganismos alvo foram padronizados na escala de MacFarland 0,5, correspondendo a $1,5 \times 10^8$ UFC/mL. As microplacas foram incubadas a 37 °C por 24 h para as bactérias e 30 °C por 24 h para as leveduras. Após o período de incubação, 20 µL de uma solução aquosa a 3% de 2,3,5-trifenil tetrazólio foram adicionados a cada poço para a determinação da viabilidade celular. A microplaca foi então incubada novamente a 37 °C por 1 hora, e a coloração resultante foi analisada. Os poços que apresentaram turvação na cor vermelha foram indicativos de células viáveis e que, portanto, o extrato não teve efeito inibidor. Para determinar a CBM, as alíquotas de 10 µl obtidas do poço correspondente à CIM e das duas concentrações imediatamente acima foram semeadas sobre placas de ágar Mueller-Hinton, para bactérias, e Sabouraud para leveduras. As placas foram posteriormente incubadas a 37 °C, durante 24 h. A menor concentração sem colônias na superfície do ágar foi considerada a CB. O mesmo procedimento foi executado nos grupos controle para validar o protocolo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Seleção do extrato de *Acmella oleracea*

A variedade de solventes utilizados na extração dos extratos de *Acmella oleracea* possibilitou a obtenção de compostos com diferentes polaridades. A Tabela 1 apresenta os rendimentos obtidos em cada extração.

Tabela 1 — Rendimento dos extratos aquoso, etanólico e hexânico de *Acmella oleracea*

Extrato Vegetal	Solvente	Rendimento (%)
<i>Acmella oleracea</i>	Água	32
	Etanol	12,04
	Hexano	2,04

Dentre os solventes utilizados, o maior rendimento foi obtido com água, com 32% de rendimento. Esse resultado pode ser explicado pela alta polaridade da água, que favorece a extração dos compostos polares presentes na *Acmella oleracea*, como polifenóis, que são solúveis em solventes polares. A água, sendo um solvente altamente polar, é eficaz na extração de substâncias hidrossolúveis, o que pode justificar o rendimento superior. O etanol, com um rendimento de 12,04%, apresenta uma polaridade intermediária, o que o torna um bom solvente para compostos que têm tanto características polares quanto apolares. Embora o etanol seja menos polar que a água, ele ainda consegue extrair uma variedade de compostos bioativos presentes na planta, mas de forma menos eficiente do que a água, o que pode explicar o rendimento intermediário. O hexano, com um rendimento de 2,04%, é um solvente apolar, o que indica que ele é mais eficiente na extração de compostos apolares, como lipídios e outros compostos lipofílicos. Esses resultados demonstram como a polaridade do solvente influencia diretamente na eficiência de extração de compostos bioativos.

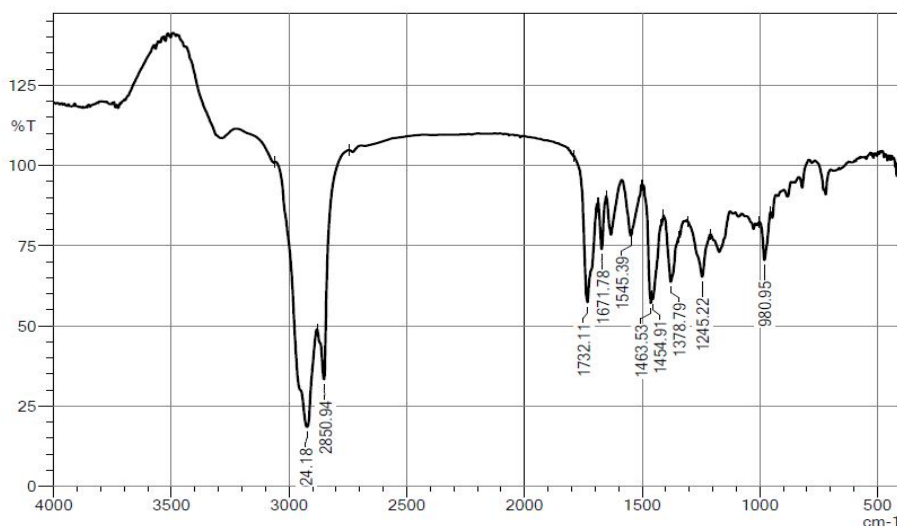
Para a seleção do extrato a ser submetido à caracterização e aos testes antimicrobianos, foi realizado um ensaio de difusão em disco utilizando os extratos aquoso, etanólico e hexânico contra as cepas bacterianas *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* e *Enterobacter* sp. Os resultados indicaram que o extrato aquoso não apresentou atividade antibacteriana contra nenhuma das cepas testadas. Em contrapartida, as cepas bacterianas mostraram-se suscetíveis ao extrato etanólico. O extrato hexânico demonstrou a maior atividade antimicrobiana, apresentando eficácia contra todas as cepas avaliadas. Este desempenho pode ser atribuído à natureza apolar do hexano, que facilita a extração de compostos anfifílicos, como o espilantol, conhecido por sua potente atividade antibacteriana. Assim, o extrato hexânico foi escolhido para dar continuidade aos testes seguintes.

3.2 Caracterização do extrato de *Acmella oleracea* usando Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

A análise do espectro de FT-IR do extrato hexânico de *Acmella oleracea* revela a presença de diversos compostos bioativos, como lipídios, ácidos graxos, compostos aromáticos e fenólicos, ésteres e alcanos. Os principais picos observados fornecem informações sobre os grupos funcionais presentes no extrato (Figura 2).

O pico em 2924,18 cm^{-1} corresponde ao estiramento C-H de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) e metil ($-\text{CH}_3-$) de cadeias longas de hidrocarbonetos, típicos de lipídios e compostos alifáticos, comuns em extratos hexânicos que isolam compostos apolares. O pico em 2850,94 cm^{-1} também está associado ao estiramento simétrico C-H de grupos metileno, reforçando a presença de cadeias alifáticas, típicas de extratos vegetais ricos em compostos lipofílicos.

Figura 1 — Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier do extrato hexânico de *Acmella oleracea*



O pico em 1732,11 cm^{-1} indica o estiramento de $\text{C}=\text{O}$, característico de grupos carbonílicos presentes em ésteres, ácidos graxos e triglicerídeos, comuns em extratos vegetais com lipídios e ceras. A banda em 1645,39 cm^{-1} sugere o estiramento de $\text{C}=\text{C}$ em anéis aromáticos ou de $\text{C}=\text{O}$ em amidas, indicando a presença de compostos fenólicos ou alcaloides, frequentemente encontrados em

Acmella oleracea. O pico em 1453,33 cm^{-1} está relacionado a deformações de C-H de grupos metil e metileno, enquanto o pico em 1378,79 cm^{-1} corresponde a vibrações de deformação simétrica de grupos metil ($-\text{CH}_3$), confirmando a presença de lipídios. O pico em 1244,22 cm^{-1} sugere a presença de ligações C-O-C, típicas de ésteres ou álcoois, e pode estar associado a compostos fenólicos ou ácidos graxos. O pico em 980,95 cm^{-1} sugere ligações C-H.

Os dados do espectro FT-IR do extrato hexânico de *Acmella oleracea* confirmam a presença de lipídios, compostos fenólicos e espilantol, principal composto ativo da planta, caracterizado por sua função amida e cadeia alifática. Essas substâncias estão associadas às propriedades antimicrobianas e anti-inflamatórias da planta, reforçando seu potencial terapêutico.

3.3 Atividade antimicrobiana do extrato de *Acmella oleracea*

3.3.1 Difusão em disco

Considerando o extrato hexânico de *Acmella oleracea* escolhido para os testes antimicrobianos subsequentes, além das cepas já testadas (*E. coli*, *P. aeruginosa* e *Enterobacter* sp.), foram incluídas também as cepas *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Candida albicans* e *Candida guilliermondii*.

O método de difusão em disco é amplamente utilizado para avaliar a sensibilidade de microrganismos frente a compostos antimicrobianos. Nesse teste, discos impregnados com o extrato hexânico de jambu foram utilizados para determinar zonas de inibição (mm) de crescimento microbiano, fornecendo uma avaliação inicial da eficácia antimicrobiana.

O extrato hexânico de *Acmella oleracea* apresentou eficácia contra diversas cepas bacterianas e fúngicas, embora em graus diferentes (Tabela 1). Entre as bactérias testadas, *Bacillus cereus* apresentou o maior halo de inibição, com $24,67 \pm 2,22$ mm, seguido de *Staphylococcus aureus* com $23,67 \pm 1,11$ mm. *Enterobacter* sp. também demonstrou uma boa resposta ao extrato, com um halo de $18,33 \pm 5,56$ mm. *Bacillus subtilis* ($17,00 \pm 1,33$ mm) e *Escherichia coli* ($14,33 \pm 1,78$ mm) apresentaram halos de inibição menores, indicando uma atividade antimicrobiana moderada contra essas cepas. Já *Pseudomonas aeruginosa* teve a menor resposta,

com um halo de apenas $3,67 \pm 0,44$ mm, sugerindo resistência ou uma atividade muito limitada do extrato contra essa bactéria.

As leveduras testadas, *Candida guilliermondii* ($32,33 \pm 1,78$ mm) e *Candida albicans* ($30,67 \pm 4,44$ mm), apresentaram os maiores halos de inibição entre os microrganismos testados. Ambos exibiram halos de inibição superiores aos das bactérias, sugerindo que o extrato hexânico de jambu possui uma potente atividade antifúngica.

Estudos prévios demonstraram diferentes graus de atividade antimicrobiana utilizando extratos de diversas polaridades e fontes vegetais. Uthpala *et al.* (2021) avaliaram como os métodos de secagem e os solventes de extração podem preservar as propriedades antimicrobianas de flores de *Acmella oleracea*. Os resultados obtidos revelaram que o maior rendimento de extração foi obtido com a secagem por resfriamento com desumidificação seguida da extração com água, obtendo halos de inibição de 18,8 mm para *Staphylococcus aureus*, 14,0 mm para *Bacillus subtilis*, 12,0 mm para *Escherichia coli*, 20,2 mm para *Pseudomonas aeruginosa* e 17,3 mm para *Candida albicans*.

Tabela 2 — Atividade antimicrobiana do extrato bruto de *Acmella oleracea*

Microrganismo	Halo de Inibição (mm)
<i>Enterobacter sp.</i>	$18,33 \pm 5,56$
<i>Escherichia coli</i>	$14,33 \pm 1,78$
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	$3,67 \pm 0,44$
<i>Staphylococcus aureus</i>	$23,67 \pm 1,11$
<i>Bacillus cereus</i>	$24,67 \pm 2,22$
<i>Bacillus subtilis</i>	$17,00 \pm 1,33$
<i>Candida albicans</i>	$30,67 \pm 2,44$
<i>Candida guilliermondii</i>	$32,33 \pm 1,78$

Fonte: Autora, 2024

Alencar *et al.* (2020) observaram halos de inibição para *Staphylococcus aureus* NP38 ($6,5 \pm 1,5$ mm), *S. aureus* LB25923 ($8,75 \pm 0,75$ mm), *S. aureus* B24

($8,5 \pm 0,5$ mm) e *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853 (6 mm) com extrato bruto etanólico. Contudo, o mesmo extrato não apresentou atividade contra *Escherichia coli*.

Brito e Silva (2022) avaliaram o extrato hexânico, observando atividade inibitória contra *S. aureus*, com um halo de inibição de 9 mm. Resultado semelhante foi obtido por Andrade *et al.* (2019), que relataram um halo de 9,03 mm para a mesma bactéria.

Afzal *et al.* (2023) apresentaram resultados mais expressivos com um extrato metanólico de *Spilanthes oleracea*, que gerou halos de inibição de $25,33 \pm 0,88$ mm, $27,33 \pm 0,66$ mm e $41,66 \pm 0,88$ mm para *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Escherichia coli*, respectivamente.

De forma mais abrangente, Bueno (2019) obteve 100% de inibição do crescimento bacteriano para as cepas *E. coli* ATCC 35218, *S. aureus* ATCC 29213 e *B. cereus* ATCC 11778 utilizando um extrato hexânico.

Neste estudo, o extrato hexânico apresentou resultados positivos contra todas as cepas microbianas testadas, reforçando seu potencial antimicrobiano. Os resultados obtidos estão alinhados com os de Bueno (2019), que destacou a eficácia do extrato hexânico, e, em alguns casos, foram mais amplos do que os resultados relatados por Brito e Silva (2022) e Andrade *et al.* (2019). Assim, o presente trabalho contribui para a crescente evidência do potencial de extratos hexânicos na inibição de microrganismos, demonstrando eficácia contra uma ampla gama de espécies bacterianas e fúngicas.

3.3.2 Concentração Inibitória Mínima e Concentração Bactericida Mínima

A Tabela 2 apresenta os resultados da determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM) e da Concentração Bactericida Mínima (CB) do extrato hexânico de *Acmella oleracea* para diferentes microrganismos. A CIM é a menor concentração do extrato capaz de inibir o crescimento do microrganismo, enquanto a CB é a menor concentração necessária para causar a morte do microrganismo. Esses parâmetros são essenciais para quantificar a atividade antimicrobiana do extrato e avaliar seu potencial terapêutico.

Os resultados indicaram que o extrato de jambu exibiu atividade antimicrobiana contra uma variedade de microrganismos. *Enterobacter* e

Escherichia coli, ambas bactérias Gram-negativas, apresentaram uma CIM de 2,5 mg/ml, o que indica que o extrato é eficaz em inibir o crescimento dessas cepas, embora a concentração necessária para eliminar completamente as bactérias (CB) seja mais alta (5 mg/ml). A presença de resistência ou uma ação menos potente contra essas bactérias pode ser observada pela diferença significativa entre CIM e CBM.

Por outro lado, *Pseudomonas aeruginosa*, conhecida pela sua resistência a diversos antimicrobianos, apresentou uma CIM de 10 mg/ml, sugerindo que o extrato tem uma ação mais limitada para eliminar essa bactéria, refletindo sua resistência.

Tabela 3 — Concentração Inibitória Mínima e Concentração Bactericida Mínima do extrato de *Acmella oleracea*

Microrganismo	CIM (mg/mL)		CBM (mg/mL)
	Extrato	Diluyente	Extrato
<i>Enterobacter</i>	2,5	-	5
<i>Escherichia coli</i>	2,5	-	5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10	-	-
<i>Staphylococcus aureus</i>	1,25	-	-
<i>Bacillus cereus</i>	0,625	-	5
<i>Bacillus subtilis</i>	0,625	-	5
<i>Candida albicans</i>	0,156	-	0,625
<i>Candida guilliermondii</i>	0,156	-	0,313

Controle negativo (diluyente) = sem atividade

Fonte: Autora, 2024

Em relação às bactérias Gram-positivas, *Staphylococcus aureus* foi sensível ao extrato, com uma CIM de 1,25 mg/ml, embora não tenha apresentado concentração bactericida mínima, indicando que tem uma boa capacidade para inibir o crescimento do microrganismo, mas não para eliminá-lo completamente.

As bactérias do gênero *Bacillus*, incluindo *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*, apresentaram CIMs de 0,625 mg/ml, sugerindo que o extrato de jambu tem boa atividade contra essas cepas. No entanto, as CBMs para essas bactérias foram de 5 mg/ml, refletindo a maior concentração necessária para matar as células.

Quanto às leveduras, *Candida albicans* e *Candida guilliermondii* mostraram uma forte sensibilidade ao extrato. *C. albicans* apresentou uma CIM de 0,156 mg/ml e uma CBM de 0,625 mg/ml, enquanto *C. guilliermondii* teve uma CIM de 0,156 mg/ml, e CBM de 0,313 mg/ml. Esses resultados indicam que o extrato tem uma potente atividade antifúngica, especialmente contra *Candida albicans*, que é uma das principais causadoras de infecções fúngicas.

Dados obtidos por Alencar *et al.* (2020) mostraram uma inibição de 50% para as cepas *Staphylococcus aureus* NP38 e *S. aureus* LB25923, 25% para *S. aureus* B24 e 12,5% para *Pseudomonas aeruginosa*, quando utilizado um extrato bruto etanólico. Por outro lado, não foi observada concentração inibitória mínima para *Escherichia coli* ATCC25922.

Uthpala *et al.* (2021) demonstraram que o extrato etanólico de flores de *Acmella* apresentou atividade antimicrobiana intermediária. A MIC foi de 625 µg/mL para *Pseudomonas aeruginosa* e 1.250 µg/mL para *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* e *Candida albicans*. Esses resultados sugerem que compostos extraídos em etanol possuem moderada eficácia contra as espécies microbianas testadas.

Em estudo anterior, Masoko (2017) observaram que o extrato de hexano apresentou um valor médio de MIC de 2,50 mg/mL para *E. coli*, resultando no mesmo valor para os outros extratos testados no mesmo estudo, como diclorometano, acetona e metanol.

O extrato hexânico de *Acmella oleracea* demonstrou eficácia variável contra os diferentes microrganismos testados, com uma atividade notável contra bactérias Gram-positivas e leveduras. No entanto, a maior resistência foi observada em *Pseudomonas aeruginosa*, sugerindo a necessidade de investigações adicionais para otimizar o uso do extrato contra microrganismos gram-negativos, que frequentemente apresentam resistência a compostos antimicrobianos.

CONCLUSÕES

O presente estudo investigou a atividade antimicrobiana do extrato hexânico obtido a partir das flores de jambu (*Acmella oleracea*), evidenciando seu potencial como um agente antimicrobiano. Os resultados mostraram inibição significativa contra cepas bacterianas relevantes, incluindo *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Pseudomonas aeruginosa*, demonstrando que o extrato possui atividade promissora frente a micro-organismos patogênicos. A prospecção de novos agentes antimicrobianos é uma estratégia crucial diante do aumento da resistência bacteriana e da necessidade de alternativas terapêuticas eficazes. Os achados deste estudo reforçam a importância de aprofundar pesquisas sobre plantas medicinais e seus derivados, especialmente aquelas provenientes de biomas únicos, como forma de descobrir novas ferramentas no combate às infecções microbianas e enfrentar os desafios impostos pela resistência antimicrobiana global.

REFERÊNCIAS

- Afzal, A. *Spilanthes acmella* Extract-Based Natural Oils Loaded Emulgel for Anti-Microbial Action against Dermatitis. **Gels**, v. 9, n. 10, 832, 2023.
- ALENCAR, G. S. *et al.* Estudo do Potencial Antimicrobiano de *Acmella Oleracea* (L.) R. K. Jansen Contra Cepas Padrões de Importância Veterinária e Humana. *In*: SIQUEIRA, S. M. C. (org). **Farmacologia Aplicada à Enfermagem: Aspectos Teóricos e Práticos**. Guarujá: São Paulo, Científica Digital, 2021, cap. 6, p. 87-100.
- ANDRADE, A. P. C. *et al.* Ação dos extratos hidroalcoólicos e aquoso da folha da goiabeira (*Psidium guajava* L.) no controle de *Staphylococcus aureus* ATCC 27922, *Escherichia coli* ATCC 25922 e *Listeria monocytogenes* SCOTTA. **Revista segurança alimentar e nutricional**, v. 26, p. 1-7, 2019.
- ASSUMPÇÃO, I. C. P.; SILVA, B. A. C.; MENDES, M. F. Bioprospecção de plantas medicinais com potencial anticancerígeno no Brasil: caracterização e métodos de extração. **Revista Fitos**, v. 16, n. 2, p. 156-175, 2022.
- Batista, B. N.; Raposo, N. V. M.; Silva, I. R. Isolation and antimicrobial activity evaluation of endophytic fungi of açaizeiro. **Revista Fitos**, v. 12, n. 2, 2018.
- BELLUMORI, M. *et al.* *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen: Alkylamides and phenolic compounds in aerial parts and roots of in vitro seedlings. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 220, 114991, 2022.
- BOGNÁR, B.; SPOHN, R.; LÁZÁR, V. Drug combinations targeting antibiotic resistance. **npj Antimicrobials and Resistance**, v. 2, n. 1, p. 1–8, 2024.

BRITO, A. E. O.; SILVA, C. S. M. Antimicrobial activity of plant extracts of spices from northern Brazil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, e52011226047, 2022.

BUENO, R. S. **Desenvolvimento de filmes funcionais incorporando extrato de *Acmella oleracea* para fins cosméticos e antimicrobiano**. 2019. 66 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2019.

DESAI, A. N.; MOHAREB, A. M.; HAUSER, N.; ABBARA, A. Antimicrobial Resistance and Human Mobility. **Infection and Drug Resistance**, 15, 127–133, 2022.

DOGSTAR, P. Antimicrobial Resistance: Implications and Costs. **Infection and Drug Resistance**, v. 12, 2019.

Elmanakhly, A. R. *et al.* Carbapenem-Resistant *Klebsiella pneumoniae*: Diversity, Virulence, and Antimicrobial Resistance. **Infection and Drug Resistance**, v. 15, 2022.

FERDINAND, A. S. *et al.* Tackling antimicrobial resistance by integrating One Health and the Sustainable Development Goals. *BMC Global and Public Health*, v. 1, n. 1, p. 1–3, 2023.

LEYTON, A. *et al.* *Macrocystis pyrifera* Extract Residual as Nutrient Source for the Production of Sophorolipids Compounds by Marine Yeast *Rhodotorula rubra*. **Molecules**, v. 26, n. 8, 2021.

MAIMULYANTI, A.; PRIHAD; A. R. Chemical composition of essential oil and hexane extract and antioxidant activity of various extracts of *Acmella uliginosa* (Sw.) Cass flowers from Indonesia. **Agriculture and Natural Resources**, v. 50, n. 4, p. 264–269, 2016.

Masoko, P. Phytochemical Analysis, Antioxidant and Antibacterial Properties of *Spilanthes mauritiana* Used Traditionally in Limpopo Province, South Africa. **Journal of Evidence-Based Complementary & Alternative Medicine**, v. 22, n. 4, 2017.

RABI, M. The global (health) governance of antimicrobial resistance. **Globalizations**, v. 21, n. 8, 2024.

RODRIGUES, S. O. *et al.* One Health and a Computational Biology approach. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, e02111437105, 2022.

SAVANT, P. B.; KERAPPA, M. S. A Systemetic and Scientific Review on the *Acmella oleracea* and its Traditional Medical and Pharmacological uses. **Asian Journal of Pharmaceutical Research**, v. 12, n. 1, 2022.

Uthpala, T. G. G. *et al.* Evaluation of antimicrobial potential and phytochemicals in *Acmella* (*A. oleracea*) flower pod extracts subjected to different drying techniques. **Journal of Food Processing and Preservation**, e15570, 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION: WHO. Antimicrobial resistance, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>. Acesso em: 21 Nov. 2024.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos conduzidos nesta pesquisa possibilitam as seguintes conclusões:

- O biossurfactante produzido por *Candida guilliermondii* UCP 1592 apresentou propriedades tensoativas compatíveis com outras descritas na literatura;
- O biossurfactante demonstrou capacidade de emulsionar óleo de motor, demonstrando potencial para uso em ambientes contaminados com óleos pesados;
- O biossurfactante demonstrou estabilidade frente a condições extremas (pH, temperatura e salinidade), indicando a possibilidade de aplicação sob diferentes condições ambientais;
- O biossurfactante apresentou ausência de toxicidade frente à todos os bioindicadores, indicando a possibilidade de uso em ambiente terrestre e aquático;
- O biossurfactante foi eficaz na limpeza e remoção de óleo de superfície de vidro, demonstrando a possibilidade de utilização como agente de limpeza de superfícies;
- O biossurfactante apresentou eficiente remoção de óleo de motor de tecido de algodão, superando sua contraparte química.
- O biossurfactante produzido pela *Candida guilliermondii* UCP 1592 é uma alternativa sustentável, eficaz e não tóxica para aplicações industriais e ambientais, como limpeza e biorremediação.

- O extrato hexânico de *Acmella oleracea* demonstrou atividade antimicrobiana significativa, com maior eficácia contra leveduras e bactérias Gram-positivas;
- A composição rica em compostos lipofílicos, fenólicos e espilantol reforça o papel do jambu como uma fonte promissora de compostos bioativos com propriedades antimicrobianas;
- O estudo ressalta a relevância de explorar plantas medicinais como *Acmella oleracea* para o desenvolvimento de novos agentes terapêuticos naturais, especialmente frente à crescente resistência microbiana global;
- A baixa Concentração Inibitória Mínima observada para *Candida albicans* e *Candida guilliermondii* destaca o potencial do extrato no tratamento de infecções fúngicas;
- Embora eficaz contra *Enterobacter* sp. e *Escherichia coli*, a menor atividade contra *Pseudomonas aeruginosa* evidencia a necessidade de estratégias complementares para otimizar o uso do extrato contra bactérias Gram-negativas resistentes;
- Este trabalho reforça a importância da bioprospecção de plantas da biodiversidade brasileira, como o jambu, para a descoberta de alternativas terapêuticas frente à resistência antimicrobiana;

ANEXOS

[Capítulo publicado no livro Sustentabilidade, Tecnologia e Meio Ambiente: Tópicos Atuais em Pesquisa - Volume 4 \(2024\)](#)

