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

PALLOMA MARIA JACINTO DE MELO

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCOMPÓSITO PROMISSOR USANDO EXTRATO DE *Basella alba* EM ASSOCIAÇÃO COM BIOSSURFACTANTE E QUITOSANA

Recife, 2026

PALLOMA MARIA JACINTO DE MELO

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCOMPÓSITO PROMISSOR USANDO EXTRATO DE *Basella alba* EM ASSOCIAÇÃO COM BIOSSURFACTANTE E QUITOSANA

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

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki

Co-orientador: Dr. Josimar Gurgel Fernandes

Recife, 2026

M528p Melo, Palloma Maria Jacinto de.
Produção e caracterização de biocompósito promissor usando extrato de *Basella alba* em associação com biossurfactante e quitosana / Palloma Maria Jacinto de Melo, 2026.
76 f. : il.

Orientador(a): Galba Maria de Campos Takaki.
Coorientador: Josimar Gurgel Fernandes.
Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2026.

1. Biotecnologia. 2. Biossurfactantes. 3. Quitosana. 4. Materiais compostos. 5. Cicatrização de ferimentos. I. Título.

CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB-4/1338

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCOMPÓSITO PROMISSOR USANDO EXTRATO DE *Basella alba* EM ASSOCIAÇÃO COM BIOSSURFACTANTE E QUITOSANA

PALLOMA MARIA JACINTO DE MELO

Examinadores:

Documento assinado digitalmente
gov.br
GALBA MARIA DE CAMPOS TAKAKI
Data: 06/04/2026 15:30:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Documento assinado digitalmente
gov.br
ROSILEIDE FONTENELE DA SILVA ANDRADE
Data: 18/03/2026 14:16:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profa. Dra. Rosileide da Silva Andrade
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Documento assinado digitalmente
gov.br
LUCIANA DE OLIVEIRA FRANCO
Data: 19/03/2026 18:15:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profa. Dra. Luciana de Oliveira Franco
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Defendida em:

Coordenador: Profa. Dra. Juliana de Moura Luna

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pois me guiou e me sustentou até aqui, dedico também aos meus pais que me apoiaram e minha irmã que me incentivou e me ajudou em todos os momentos e a Profa. Dra. Galba Maria de Campos-Takaki, pela mentoria ao longo desses anos.

“Ele é o Deus que me reveste de força e torna perfeito o meu caminho.” (Salmos 18:32)

“Provem e vejam como o Senhor é bom. Como é feliz o homem que nele se refugia!” (Salmos 34:8)

“Dando sempre graças por tudo a nosso Deus e Pai, em nome de nosso Senhor Jesus Cristo.” (Efésios 5:20)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me sustentar até aqui, me dando sabedoria, inspiração e derramando sua infinita graça sobre minha vida.

Agradeço aos meus pais, Cosmo e Flávia por sempre me apoiarem e cuidarem de mim, a minha irmã Pamella por me incentivar durante minha trajetória.

Agradeço a Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki, pelo carinho, confiança, me apoiando e ensinando ao longo desses anos, sendo minha mentora desde o Pibic até o mestrado, só tenho a agradecer tamanha honra desses 5 anos ao seu lado.

Ao Dr. Josimar Gurgel Fernandes, meu coorientador, pelo grande apoio, ensinamentos e compreensão em todos os momentos.

Agradeço aos amigos MSc. Marcella Estanislau e o MSc. Salatiel Lima, pela dedicação, cumplicidade, oração e carinho, me impulsionando e dando força aos longos desses 2 anos, que Deus lhes abençoe e recompense.

Agradeço a todos os amigos e profissionais do Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e Superfícies de materiais (CEMACBIOS), em especial a Dra. Adriana Souza, técnico André Felipe de Lima e Cristiano, pelo carinho e apoio.

A todos Docentes e Discentes do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais (PPGDPA), pelos ensinamentos e apoio em todos os momentos.

Ao apoio da bolsa concedida pela FACEPE, contribuindo para meu crescimento científico e tecnológico.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **V**
SUMÁRIO ..... **VI**
LISTA DE FIGURAS ..... **VIII**
LISTA DE TABELAS ..... **IX**
RESUMO ..... **X**
ABSTRACT ..... **XI**

CAPÍTULO I **12**
1 INTRODUÇÃO **13**
2 OBJETIVOS **15**
2.1 Objetivo Geral 15
2.2Objetivos Específicos 15
3 REVISÃO DA LITERATURA **16**
3.1 Biocompósitos 16
3.1.1 Conceito e vantagens 16
3.1.2 Biocompósitos a base de *Basella alba* 16
3.1.3 Biocompósitos a base de biossurfactantes 17
3.1.4 Biocompósitos a base de quitosana 17
3.1.5 Casos de biocompósitos com fitoterápicos e biopolímeros 18
3.2 *Basella alba*: características e aplicações 19
3.2.1 Classificação botânica e distribuição geográfica 19
3.2.2 Compostos fitoquímicos 20
3.2.3 Atividades farmacológicas relevantes 23
3.2.3.1 Atividades antioxidantes e anti-inflamatórias 23
3.2.3.2 Atividades anticancerígenas e citotóxicas 24
3.2.3.3 Atividades antimicrobianas 24
3.2.4 Possíveis aplicações da *Basella alba* 25
3.3 Biossurfactante: Conceito e aplicações 24
3.3.1 Tipos de biossurfactante 25

3.3.2 Propriedades emulsificantes 29
3.3.3 Aplicações biomédicas e em curativos inteligentes..... 29
3.4 Quitosana como biopolímero ativo 30
3.4.1 Origem e estrutura química 30
3.4.2 Propriedades físico-químicas e biológicas 31
3.4.3 Aplicações em curativos e cicatrização de feridas 32
3.5 Cicatrização de feridas: Aspectos gerais..... 33
3.5.1 Fases do processo de cicatrização 34
3.5.2 Fatores que influenciam o processo de cicatrização 34
3.6 Avanços em biomateriais para cicatrização de feridas na pele 35
3.6.1 Biomateriais naturais e sintéticos 35
3.6.2 Hidrogéis, Filmes e Nanofibras: Aplicações Clínicas..... 36
REFERÊNCIAS..... 38

CAPÍTULO II 48
Artigo 1 - Biossurfactante produzido por *Mucor circinelloides* UCP 0017 isolado de manguezal e estabilidade em condições extremas 49

CAPÍTULO III..... 68
PATENTE: **..... 69**

CAPÍTULO IV..... 73
CONSIDERAÇÕES FINAIS 74

ANEXOS 75
ANEXOS I 76
Artigo Publicado - Biosurfactant produced by Mucor circinelloides UCP 0017 isolated from mangrove and stability under extreme conditions 77

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I 12

FIGURA 1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA *BASELLA ALBA* 20

CAPÍTULO II 48

FIGURA 1. CURVA DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE BIOSSURFACTANTE POR *MUCOR CIRCINELLOIDES* UCP 0017, MOSTRANDO A VARIAÇÃO NA BIOMASSA, CONCENTRAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE ISOLADO, PH E TENSÃO SUPERFICIAL DURANTE 192 HORAS DE CULTIVO 55

FIGURA 2. EFEITO DO PH (A), DA CONCENTRAÇÃO DE NACL (B) E DA TEMPERATURA (C) NA TENSÃO SUPERFICIAL DO BIOSSURFACTANTE PRODUZIDO POR *M. CIRCINELLOIDES* UCP 0017. 57

FIGURA 3. VARIAÇÃO DA TENSÃO SUPERFICIAL DO BIOSSURFACTANTE EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO: (A) DILUIÇÃO MICELAR CRÍTICA (CMD) DO LÍQUIDO METABÓLICO LIVRE DE CÉLULAS (%) E (B) CONCENTRAÇÃO MICELAR CRÍTICA (CMC) DO BIOSSURFACTANTE ISOLADO 58

FIGURA 4. ESPECTROS FTIR DO BIOSSURFACTANTE PRODUZIDO POR M. CIRCINELLOIDES, OBTIDOS USANDO DIFERENTES PROPORÇÕES DE EXTRAÇÃO: 2:1 (A) E 1:2 (B) 61

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I 12

TABELA 1. CLASSIFICAÇÃO DOS COMPOSTOS FITOQUÍMICOS EM DIFERENTES PARTES DA *B. ALBA* E SUAS PRINCIPAIS ATIVIDADES 21

TABELA 2. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA BASELLA ALBA 25

TABELA 3. PRINCIPAIS PRODUTORES DE BIOSSURFACTANTE E SEUS TIPOS 27

TABELA 4. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CICATRIZAÇÃO. 35

CAPÍTULO II 47

TABELA 1. RENDIMENTO E EFICIÊNCIA DE EXTRAÇÃO DO BIOSSURFACTANTE UTILIZANDO PRECIPITAÇÃO COM ETANOL A 70% EM DIFERENTES PROPORÇÕES. 60

RESUMO

O presente estudo propôs o desenvolvimento de um biocompósito inovador com potencial aplicação na cicatrização de feridas, combinando extratos da planta *Basella alba*, um biossurfactante e bioemulsificante produzido pelo fungo *Mucor circinelloides* UCP0017 e quitosana (BR 10 2026 006208 1) isolada do cefalotórax de crustáceos, com grau de desacetilação acima de 90%, destinada ao componente principal do biocompósito, como alternativa sustentável e eficiente aos tratamentos de lesões cutâneas. Os resultados obtidos da produção e caracterização do biossurfactante pelo *Mucor circinelloides* UCP0017, isolado de manguezal pernambucano, utilizando milhocina e óleo residual de fritura como substratos de baixo custo, demonstraram uma ótima capacidade tensoativa, com redução da tensão superficial de 41,8 para 31,0 mN/m em 96 horas de cultivo. O biossurfactante exibiu notável estabilidade em amplas condições físico-químicas pH entre 3 e 9, concentrações salinas de 5% a 25% de NaCl, e temperaturas extremas de 4 °C a 120 °C. A obtenção do biossurfactante foi por precipitação eficiente foi com etanol 70% na condição 1:1 (v/v), com rendimento de 10,33 g/L. O biossurfactante apresentou composição glicolipídica (74,22% em lipídeos e 18,38% em carboidratos), perfil aniônico e potencial zeta de -23,13 mV. *Basella alba* apresentou extratos rico em biomoléculas ativas e mucilagens. A quitosana apresentou excelente atividade antimicrobiana contra bactérias Gram-positivas, negativas e levedura. O produto, o biocompósito desenvolvido com a associação dos componentes naturais quitosana, extratos e mucilagens de *Basella alba* e biossurfactante, formulado para ação cicatrizante como um curativo oclusivo com perfil seguro para aplicações farmacêuticas corresponde a Patente (Número do Processo: BR 10 2026 006208 1).

Palavras chaves: *Basella alba*; biossurfactante; quitosana; biocompósitos; cicatrização de feridas.

ABSTRACT

This study proposed the development of an innovative biocomposite with potential application in wound healing, combining extracts from the plant *Basella alba*, a biosurfactant and bioemulsifier produced by the fungus *Mucor circinelloides* UCP0017, and chitosan (BR 10 2026 006208 1) isolated from the cephalothorax of crustaceans, with a degree of deacetylation above 90%, intended as the main component of the biocomposite, as a sustainable and efficient alternative for the treatment of skin lesions. The results obtained from the production and characterization of the biosurfactant by *Mucor circinelloides* UCP0017, isolated from a mangrove swamp in Pernambuco, using corn starch and residual frying oil as low-cost substrates, demonstrated excellent surfactant capacity, with a reduction in surface tension from 41.8 to 31.0 mN/m in 96 hours of cultivation. The biosurfactant exhibited remarkable stability under a wide range of physicochemical conditions: pH between 3 and 9, saline concentrations from 5% to 25% NaCl, and extreme temperatures from 4 °C to 120 °C. The biosurfactant was obtained by efficient precipitation using 70% ethanol at a 1:1 (v/v) ratio, yielding 10.33 g/L. The biosurfactant presented a glycolipid composition (74.22% lipids and 18.38% carbohydrates), an anionic profile, and a zeta potential of -23.13 mV. *Basella alba* yielded extracts rich in active biomolecules and mucilage. Chitosan showed excellent antimicrobial activity against Gram-positive and Gram-negative bacteria and yeast. The product, a biocomposite developed with the combination of the natural components chitosan, extracts and mucilage of *Basella alba* and biosurfactant, formulated for healing action as an occlusive dressing with a safe profile for pharmaceutical applications, corresponds to Patent (Process Number: BR 10 2026 006208 1).

Keywords: *Basella alba*; biosurfactant; chitosan; biocomposites; wound healing.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis a partir de biomoléculas ativas promissoras vêm impulsionando as pesquisas dirigidas para o desenvolvimento de bioprodutos ecoeficientes. Nesse cenário, os biocompósitos surgem como uma solução tecnológica promissora, sendo definidos como materiais formados pela associação de dois ou mais produtos de fontes naturais como polímeros ou biopolímeros (Shanmugam et al., 2021; Ahmad, Mccormack, Byrne, 2025).

Dentre as matérias-primas vegetais com potencial biotecnológico, a *Basella alba*, conhecida popularmente como “espinafre-malabar”, destaca-se pelo rico perfil fitoquímico pela presença de flavonoides, compostos fenólicos e saponinas, os quais apresentam propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas (D´Souza *et al* 2023; Linsaenkart *et al.,* 2024). A integração de extratos vegetais em biomateriais avançados pode formar hidrogéis e curativos bioativos, representando uma estratégia inovadora e multifuncional, considerando a ação antimicrobiana e a capacidade de promover cicatrização e redução da inflamação, acelerando a regeneração tecidual (Kumar *et al.,* 2022; D´Souza *et al.,* 2023; Sharma *et al.,* 2025; Gaur et al., 2026).

Nesse contexto, os biossurfactantes emergem como metabólitos secundários de origem microbiológica, produzidos por bactérias, leveduras e fungos filamentosos, têm sido incorporados em sistemas complexos devido à capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial, além de possuir ação espumante, antiespumante e emulsificante (Eras-Muñoz *et al.,* 2022; Simões *et al.*, 2024; Silva et al., 2026). Diferentemente dos surfactantes sintéticos, os biossurfactantes apresentam vantagens significativas, como biodegradabilidade, baixa toxicidade ambiental e humana, e propriedades antibacterianas, antivirais, antifúngicas, antioxidantes e antitumorais. Além disso, demonstram notável estabilidade em diversas condições de pH, temperatura e salinidade (Kashif *et al.,* 2022; Carolin *et al.,* 2023; Berberov et al., 2026).

Outro componente fundamental é a quitosana, um polímero derivado da quitina encontrada em crustáceos e fungos, com grande relevância biotecnológica devido a biocompatibilidade, biodegradabilidade e atividade antimicrobiana (Cassano et al., 2024; Yu et al., 2025). A quitosana é amplamente explorada na fabricação de scaffolds e curativos, permitindo a liberação

controlada de compostos terapêuticos, como também no desenvolvimento de hidrogéis, biofilmes e nanofibras, com aplicações em engenharia de tecidos e cicatrização de feridas (Russo *et al.,* 2022; Salehi *et al.,* 2025).

Portanto, a proposta de integração de *Basella alba*, biossurfactante e quitosana representa uma fronteira promissora e inovadora. A literatura indica que a combinação desses elementos pode resultar em um desempenho superior, unindo as propriedades antioxidantes do extrato vegetal, atividade emulsificante do biossurfactante e a atividade antimicrobiana da quitosana (Vinodhini et al., 2022; Dini et al., 2024; Silva et al., 2026).

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Propor a criação de um biocompósito a partir de extratos ativos da *Basella alba*, associados a quitosana solubilizada em bioemulsificante produzido pelo *Mucor circinelloides* UCP0017.

2.2Objetivos Específicos

- Preparar extratos a partir de diferentes partes jovens e maduras do caule da *Basella alba*, com assistência de micro-ondas;
- Avaliar a composição fitoquímica de extratos de diferentes partes de *B. alba;*
- Identificar os componentes ativos importantes isolados dos extratos da *Basella alba*;
- Realizar a produção e caracterização do biossurfactante isolado por *M. circinelloides UCP0017*;
- Avaliar a atividade antimicrobiana da quitosana isolada de cefalotórax de camarão;
- Propor a criação de um biocompósito a partir de extratos ativos da *B. alba*, associados a quitosana solubilizada em bioemulsificante.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Biocompósitos

3.1.1 Conceito e vantagens

A crescente demanda de pesquisas envolvendo a reutilização de resíduos e a substituição de compostos sintéticos por biológicos como uma alternativa mais sustentável ao meio ambiente, vem se tornando uma opção significativa ao longo dos anos, com isso, a substituição de compósitos por biocompósitos se tornou uma possibilidade de mercado mais ecológica, pois os biocompósitos são compostos por dois ou mais produtos de fontes naturais em associação com polímeros ou biopolímeros para a criação de um novo bioproduto a base dos bioprodutos individuais, com possibilidade de uma ampla aplicação (Shanmugam, *et al.,* 2021; Ahmad, Mccormack, Byrne, 2025).

Os biocompósitos possuem vastos benefícios pois são biodegradáveis, tem baixa toxicidade, e possuem um bom custo-benefício, se tornando uma alternativa promissora para atuar como substituto dos compósitos sintéticos. Sua formulação pode ser tanto de origem animal, microbiológica quanto vegetal, como os biopolimeros oriundos de resíduos de moluscos que contêm quitina e quitosana, bioprodutos formados por microrganismos juntamente com resíduos agroindústrias por exemplo os biossurfactantes e fibras e extratos de plantas são alguns exemplos de produtos de fontes naturais que podem ser utilizados para a formulação de biocompósitos (Andrew; Dhakal, *et al.* 2022; Mahmud, 2023).

3.1.2 Biocompósitos a base de *Basella alba*

A *Basella alba*, popularmente conhecida como espinafre-malabar, tem se destacado nas pesquisas como uma fonte promissora de biopolímeros e extratos funcionais para o desenvolvimento de biocompósitos. De acordo com D'souza *et al.*, (2023), suas folhas e caules contêm quantidades significativas de mucilagem, um polissacarídeo complexo com propriedades espessantes e de formação de filme, além de compostos bioativos como flavonoides e polifenóis

com propriedades antioxidantes e antimicrobianas (Sheik *et al.,* 2023; Shende *et al.,* 2024).

A aplicação da mucilagem de *Basella alba* como matriz ou aditivo em biocompósitos tem demonstrado benefícios notáveis. Em estudos recentes, a incorporação de extratos de *Basella alba* em filmes de álcool polivinílico (PVA) resultou em materiais com propriedades físicas e mecânicas aprimoradas Khubiev *et al.,* 2023; Kamonwannasit *et al.,* 2025).

3.1.3 Biocompósitos a base de biossurfactantes

Os biossurfactantes são moléculas anfifílicas produzidas por microrganismos que possuem a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial entre fases imiscíveis, o uso de biossurfactantes em biocompósitos avançou significativamente, indo além de simples aditivos para se tornarem componentes fundamentais na estabilização de sistemas complexos, como os ramnolipídios, soforolipídios e surfactina que oferecem vantagens críticas sobre os surfactantes químicos, incluindo menor toxicidade, maior biodegradabilidade e atividade em condições extremas de temperatura e pH (Phulpoto *et al.,* 2022; Bartal *et al.,* 2023; Hsu *et al.,* 2025).

A incorporação de biossurfactantes em biocompósitos tem sido explorada principalmente em três frentes: como agentes de acoplamento, estabilizadores de nanopartículas e agentes antimicrobianos intrínsecos, como também para desenvolvimento de compósitos lignocelulósicos, atuando como pontes moleculares, melhorando a molhabilidade das fibras naturais pela matriz polimérica hidrofóbica, o que resulta em propriedades mecânicas superiores e maior durabilidade (Li *et al.,* 2022; Abhyankar *et al.,* 2024; Soares *et al.,* 2024; Luong; Moorthy; Luong, 2026).

3.1.4 Biocompósitos a base de quitosana

A quitosana, um polissacarídeo derivado da desacetilação da quitina encontrada no exoesqueleto de crustáceos e na parede celular de fungos, é um dos biopolímeros mais estudados para a fabricação de biocompósitos, o foco das pesquisas em quitosana mudou para o desenvolvimento de nanocompósitos

e materiais funcionais avançados, oferecendo uma combinação única de propriedades, como biocompatibilidade, biodegradabilidade, baixa toxicidade e, crucialmente, atividade antimicrobiana intrínseca devido à presença de grupos amino carregados positivamente (Cassano *et al.,* 2024; Gonciarz *et al.,* 2025; Yu *et al.,* 2025).

As propriedades de formação de filme da quitosana permitem sua utilização em uma vasta gama de biocompósitos, desde embalagens de alimentos até curativos médicos. Recentemente, a adição de reforços nanométricos, como nanocristais de celulose, nanotubos de carbono ou argilas, tem sido amplamente explorada para mitigar as limitações da quitosana pura, como sua alta sensibilidade à umidade e baixa resistência mecânica (Ilyas *et al.,* 2022; Lamm *et al.,* 2022). Tertyshnaya; Olkhov (2025) relata que a incorporação de nanopartículas pode aumentar a barreira ao oxigênio e ao vapor de água, além de melhorar significativamente a estabilidade térmica dos biocompósitos resultantes.

3.1.5 Casos de biocompósitos com fitoterápicos e biopolímeros

A junção de fitoterápicos em biocompósitos poliméricos como a quitosana tem emergido como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de scaffolds com propriedades terapêuticas, pois os extratos vegetais são ricos em compostos bioativos com atividades anti-inflamatória, antioxidante, antimicrobiana que podem acelerar o processo de regeneração tecidual. A combinação desses extratos com quitosana permitem a criação de scaffolds que além de fornecerem o suporte estrutural para o crescimento celular, eles também liberam localmente os compostos bioativos de forma controlada, trazendo uma melhor eficácia no processo de cicatrização (Russo *et al.,* 2022; Khubiev *et al.,* 2023).

O desenvolvimento de um estudo investigando um filme biocompósito à base de poli(álcool vinílico) (PVA), quitosana e extrato do caule de *Basella alba* para aplicação em curativos de feridas, demonstraram uma boa atividade antibacteriana contra *S. aureus* e *E. coli*, como também proporcionou uma ação anti-inflamatória se tornando uma potencial fonte tratamento de feridas

auxiliando na aceleração do processo de cicatrização (D'Souza *et al.,* 2023; Khubiev *et al.,* 2023).

3.2 *Basella alba*: características e aplicações

3.2.1 Classificação botânica e distribuição geográfica

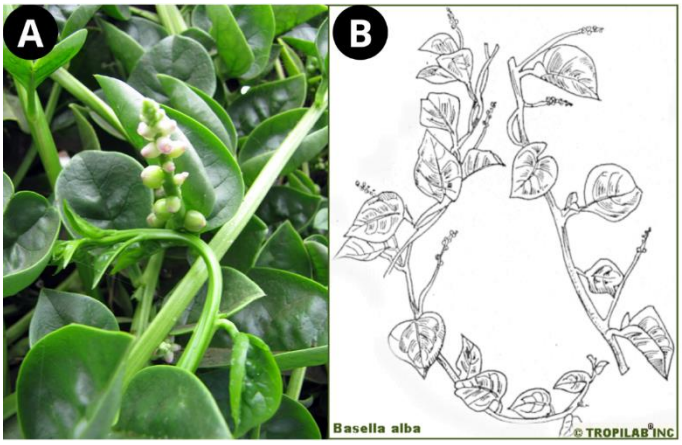
Basella alba, conhecida popularmente por espinafre Malabar, espinafre indiano, Basileia ou bertalha, é uma planta originária da Ásia tropical e comumente encontrada na índia e china, por ser uma planta trepadeira herbácea perene, ela pode ser cultivada em regiões tropicais e subtropicais podendo ser utilizada para uso alimentício, medicinal e ornamental (Jagarwal et al., 2021; Sharma et al., 2022; Reddy et al., 2023). De acordo com Chaurasiya et al., (2021) o clima adequado para o seu cultivo é lugares com luz solar direta e com umidade relativa, chegando a uma temperada de até 32 °C para o seu crescimento.

O solo mais apropriado para o seu cultivo são os solos que possuem um alto teor de matéria orgânica e de pH levemente ácido, frequentemente encontrado em florestas tropicais, se tornando assim mais fértil por possuir variedades de nutrientes como Ferro (Fe) e Magnésio (Mg) que auxilia na formação da clorofila, manganês (Mn) e Potássio (K) que ajuda no metabolismo e absorção da planta, Zinco (Zn) e Fósforo (P) que colabora para o crescimento e reprodução, além de possuir uma capacidade de retenção de água no solo trazendo mais umidade e capacidade de absorção da planta de forma mais eficiente tornando seu crescimento rápido (Chaurasiya et al., 2021; Bose et al., 2023; Khan et al., 2024)

A *Basella alba* pertence à família Basellaceae da ordem Caryophyllales, é um vegetal de folhas verdes e grossas distribuídas em espiral, o pecíolo foliar é curto e a folha é oblonga, pois o comprimento da folha é maior que sua largura, sua coloração se caracteriza por um tom verde escuro lustroso, medindo entre 5 a 12 cm de comprimento. O seu caule se distingui por ser viçoso e suculento com ramificações laterais, onde se encontram mais robustos na base e afiladas nos ramos superiores, permitindo assim que ela se entrelace em superfícies, trazendo sua especificidade de trepadeira, o seu comprimento pode chegar

cerca de 8 a 10 m. As suas flores são pequenas e sésseis, ou seja, estão ligadas diretamente ao caule, não possuindo pedicelo, geralmente suas flores são brancas, com tons rosados e seus frutos são de um roxo intenso, com uma tonalidade mais preta quando maduro, são pequenos, arredondados e carnosos conforme demonstrados na imagem a seguir (Deshmukh et al., 2014; Jayswal et al., 2021; Kumar *et a*l., 2022).

Figura 1. Características gerais da *Basella alba*.



Características gerais da *B. alba*, identificando o caule, folha e flor (Imagem A). Representação esquemática da estrutura da planta (Imagem B). **Fonte:** Herbariohuni (2020) (A); Tropilab (2019) (B)

3.2.2 Compostos fitoquímicos

A *B. alba* possui um rico perfil fitoquímico e nutricional, sendo uma ótima produtora tanto de metabólitos primários como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos e vitaminas, quanto de metabólitos secundários, como flavonoides, compostos fenólicos, saponinas e taninos, servindo não apenas como alimento, mas também para diversas aplicações farmacológicas, dependendo da sua parte utilizada, do seu estágio de maturação e das suas condições de cultivo, onde cada fator irá contribuir com os níveis dos metabolitos formados, até mesmo a ausência deles em determinadas áreas da planta (Akinniyi *et al.,* 2019; Arya *et al.*, 2021; Magno *et al.,* 2025).

O método de secagem é um fator crucial que pode alterar completamente os níveis dos compostos bioativos presentes na *B. alba*, de acordo com um estudo de Kumar et al., (2023), onde foi realizada a secagem da folha em diferentes condições, os resultados demonstraram que os métodos mais

eficazes na preservação dos compostos bioativos são os de secagem que contenham temperaturas mais baixas por períodos longos, ou métodos mais rápidos como a secagem por micro-ondas, indicando que a metodologia por micro-ondas pode ser uma ferramenta eficiente tanto para secagem quanto para a extração, por preservar a integridade funcional da planta de forma mais rápida e fácil (Shende *et al*., 2024; Dahanayaka *et al.,* 2025).

Sua composição nutricional é extremamente rica em vitaminas, minerais e fibras dietéticas, trazendo um grande valor funcional como alimento. Estudos revelam que sua folha possui um baixo teor calórico e lipídico, como também uma alta retenção de água, cerca de 90% em suas folhas frescas, já com as suas folhas secas, elas proporcionam um alto teor de proteínas, carboidratos e minerais (Adenegan-alakinde *et al.,* 2019; Łukasz kozioł *et al*., 2024; Dahanayaka *et al.,* 2025)

Suas folhas possuem betacaroteno, que são convertidos em vitamina A durante a absorção no organismo, como também as vitaminas C e B9 em abundância e em menores quantidades as vitaminas B2 e B3 e as vitaminas E e K. Suas folhas também contém a presença dos minerais cálcio, potássio, magnésio e ferro, assim como um alto teor de fibras dietéticas, contribuindo assim para um bom funcionamento da saúde digestiva (Okouango *et al.*, 2019; Nur *et al*., 2023; Usawakesmanee *et al.,* 2025).

Os compostos fitoquímicos encontrados na *B. alba* são os principais responsáveis pelas atividades farmacológicas exercidas da planta. A tabela a seguir demonstra as classes mais importantes dos compostos bioativos encontrados em diferentes partes da *B. alba* (Zhang *et al.,* 2024; Magno *et al*., 2025).

Tabela 1. Classificação dos compostos fitoquímicos em diferentes partes da *B. alba* e suas principais atividades

Classe do Composto	Principais Atividades	Partes da Planta	Referências
Flavonóides	Antioxidante, Antinflamatória e Anticancerígena	Caule, Folha e Flor	Sheik et al.,2023; Halaial et al., 2025.
Ácidos Fenólicos	Antioxidante e Antimicrobiana	Caule, Folha, Flor e Fruto	Shende et al., 2024; Dahanayka et al., 2025.
Betalaínas	Antioxidante, Antinflamatória e Corante natural	Fruto	Sagar et al, 2022; Sutor-Swiezy et al.,2024.

Saponinas	Antinflamatória e Citotóxica	Folha	Harikrishnan et al.,2024; Shende et al., 2024;
Carotenóides	Antioxidante	Folha	Halaial et al., 2025; Dahanayka et al., 2025.
Terpenóides	Antinflamatória e Hipocolesterolêmica	Caule e Folha	Kumar et al., 2013.
Alcalóides	Antimicrobiana e Citotóxica	Caule e Folha	Adenagan-Alakinde et al., 2019; Harikrishnan et al.,2024.

Fonte: Elaborado pela autora.

Geralmente a parte mais estudada e consumida são as folhas, estudos mostram que a principal fonte dos compostos bioativos é encontrada nas folhas da *Basella alba*, onde altas concentrações de carotenoides, saponinas, terpenoides, alcaloides, flavonoides e compostos fenólicos são identificadas em comparação com caules, flores e frutos, contribuindo significativamente para atividade antioxidante, anti-inflamatória, anticancerígena, antimicrobiana e citotóxica. (Kumar et al., 2013; Sheik et al., 2023; Shende et al., 2024). De acordo com Halaval et al., (2025), a quercetina é considerada como um dos flavonoides chave, pois análises feitas através da técnica de docking molecular, se pode observar uma alta afinidade por alvos proteicos, relacionado a processos inflamatórios e metastáticos.

Os caules possuem uma quantidade menor de compostos bioativos referentes as folhas, contudo, os seus extratos são bastantes utilizados em estudos para investigar as atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, anticancerígenas, antimicrobianas e citotóxicas, principalmente em estudos de cicatrização devido a sua alta concentração de mucilagem, se destacando das folhas nesse quesito (Adenegan-alakinde et al., 2019; D'Souza et al., 2023).

As flores e frutos são as menos estudadas em termos fitoquímicos, mesmo que contenham os mesmos compostos, embora em concentrações menores, o que traz a notoriedade do seu fruto é a presença de betalaínas, um ótimo corante natural para a indústria alimentícia, devido a sua estabilidade e atividade antioxidante (Sagar et al., 2022; Łukasz kozioł et al., 2024; Rusak et al., 2024). De acordo com Sutor-Swiezv et al., (2024) frações purificadas do seu pigmento, inibem seletivamente a liberação de mediadores inflamatórios em macrófagos, o que possibilita uma ação anti-inflamatória por parte do fruto da B. alba.

3.2.3 Atividades farmacológicas relevantes

Através da ampla variedade de compostos fitoquímicos presentes da *B. alba* se é possível obter-se uma série de atividades farmacológicas relevantes para aplicações terapêuticas, medicinais, alimentícias e no âmbito industrial e tecnológico, como as atividades antioxidantes e anti-inflamatórias, sua capacidade antimicrobiana, anticancerígena e citotóxica, como de tantas outras possibilidades (Omotoso et al., 2024; Rusak et al., 2024).

3.2.3.1 Atividades antioxidantes e anti-inflamatórias

A atividade antioxidante é a mais presente em estudos com a *B. alba*, servindo de base para atividades anti-inflamatórias e anticancerígenas, ela atua como uma potente agente antioxidante através de múltiplos mecanismos, como o sequestro dos radicais livres, 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH) e o ácido 2,2-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico) (ABTS), atribuídas através do seu alto teor de compostos fenólicos e flavonoides presentes nos extratos de suas folhas e caules (Adewale et al., 2022; Sheik et al., 2023).

Outro mecanismo atuante é o poder redutor que ela possui, sendo capaz de neutralizar radicais através da doação de elétrons, reduzindo íons férricos (Fe3+) a íons ferrosos (Fe2+), que podem ser observadas através do ensaio de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power). Além de atuar diretamente sobre os radicais através da elevação enzimática, onde Bamidele et al., (2025) relatou que o tratamento com extrato da B. alba eleva significativamente os níveis das enzimas antioxidantes (SOD) superóxido dismutase e a (GPx) glutationa peroxidase, responsáveis por prevenir danos celulares, atuando como potencial terapêutico contra o câncer e doenças inflamatórias (Jayswal et al., 2021; Dahanayaka et al., 2025).

A atividade anti-inflamatória está ligada intrinsecamente a atividade antioxidante, onde a *B. alba* intervém no processo inflamatório no corpo através de algumas formas, podendo inibir a enzima ciclooxigenase-2 (COX-2), uma enzima chave na síntese de prostaglandinas que promove a inflamação, redução de citocinas pró-inflamatórias e a inibição da mieloperoxidase (MPO), uma

enzima encontrada em neutrófilos, confirmando o efeito anti-inflamatório dos extratos da planta (Nur et al., 2023; Rusak et al., 2024; Sutor-świeży et al., 2024).

3.2.3.2 Atividades anticancerígenas e citotóxicas

Estudos recentes apontam a *B. alba* como um potencial agente anticancerígeno em diferentes linhagens celulares tumorais (Omotoso et al., 2024; Chowdhury et al., 2024; Halayal et al., 2025). De acordo com Sheik et al., (2023) o extrato da planta apresentou atividade antiproliferativa contra as células de câncer colorretal (CRC), induzindo a parada do ciclo celular em duas linhagens, indicando que os compostos fitoquímicos presentes na *B. alba* podem interferir na proliferação de células cancerígenas, induzindo apoptose ou a parada do seu crescimento.

Também foi observada a atividade citotóxica dos seus extratos, apresentando efeitos contra linhagem celular do câncer de mama (MCF-7), o que pode caracterizar esse efeito citotóxico contra esse tipo de célula é a presença de saponinas nos seus extratos, pois elas ajudam a desencadear a apoptose celular levando a inibição, além de serem compostos anfifílicos, o que irá proporcionar a interferência das membranas celulares, levando a ruptura das células do câncer de mama (Islam et al., 2021; Hogale et al., 2024; Linsaenkart et al., 2024).

3.2.3.3 Atividades antimicrobianas

O uso da *B. alba* para tratamento de infecções constata sua atividade contra uma variedade de microrganismos patogênicos, diferentes partes de seus extratos possuem atividade antibacteriana contra bactérias gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* e *Lactobacillus*, e contra bactérias gram-negativas, como *Escherichia coli* e *Pseudomonas aeruginosa*, como também alguns estudos demonstram a capacidade dos extratos proporcionarem atividade antifúngica contra fungos filamentosos como o *Aspergillus fumigatus* e contra a levedura *Candida albicans* (Nguyen et al., 2022; Vinodhini et al., 2022; Annaraj et al., 2024).

Acredita-se que esta capacidade antibacteriana da *B. alba* se encontra por meio dos compostos fenólicos, flavonoides e alcaloides, pesquisas recentes apontam os extratos da *B. alba* como agentes redutores e estabilizadores para a síntese de nanopartículas metálicas, onde essas nanopartículas apresentam uma atividade antimicrobiana potencializada, possibilitando novas vias para o desenvolvimento de agentes terapêuticos e farmacológicos (Harikrishnan et al., 2024; Lingeshwaran et al., 2024; Mani et al., 2024).

3.2.4 Possíveis aplicações da *Basella alba*

Devido a sua vasta composição fitoquímica, a *B. alba* possui diversas aplicações principalmente na área da saúde, alimentícia e tecnologia. A tabela a seguir apresenta as principais aplicações obtidas a partir dos extratos da B. alba (Sagar et al., 2022; Mani et al., 2024).

Tabela 2. Principais aplicações da *Basella alba.*

Áreas de Atuação	Aplicações específicas	Referências
Medicina e Fisioterapia	Cicatrização de feridas cutâneas	Chowdhury et al., 2024; Harikrishnan et al.,2024;
	Tratamentos de inflamações	Sutor-Swiezy et al.,2024; Halaial et al., 2025
	Proteção cardíaca e hepática	Kumar et al., 2013; Bamidele et al.,2025
	Controle da glicemia (Antidiabética)	Arokoyo et al. 2018; Kumari et al. 2021.
	Atividade antimicrobiana	Nguyen et al. 2022; Vinodhini et al.2022.
Indústria alimentícia	Corantes naturais	Sagar et al., 2022; Łukasz Kozioł et al., 2024.
	Ingrediente funcional para alimentos	Okouango et al.,2019; Usawakesmanee et al.,2025.
Tecnologia	Desenvolvimento de Biomateriais	D*Souza et al., 2023.
	Nanotecnologia verde	Annaraj et al., 2024; Mani et al., 2024.

Fonte: Elaborado pela autora.

No âmbito da saúde e fitoterapia, a aplicação mais utilizada por ela é a cicatrização de feridas cutâneas, pesquisas mostram que os seus extratos em junção com géis e pomadas aceleram consideravelmente a contração de feridas e o seu processo de epitelização, que se trata do estágio final da cicatrização (Chowdhury et al., 2024; Harikrishnan et al., 2024)

A sua capacidade antioxidante possibilita diversas aplicações farmacológicas, como por exemplo o seu uso na mitigação cardíaca induzida por isquemia-reperfusão, possibilitando a redução de marcadores inflamatórios trazendo um efeito cardioprotetor, como também pode ser observado no campo da endocrinologia, onde ela irá atuar tanto na inibição de enzimas que que digerem carboidratos, quanto na redução dos níveis de glicose, tornando-se um excelente antidiabético (Arokoyo et al., 2018; Kumari et al., 2021; Bamidele et al., 2025).

A sua relevância estende-se a indústria e tecnologia, onde os seus frutos oferecem uma pigmentação de roxo intenso como uma alternativa de substituição dos corantes sintéticos por seu corante natural de forma mais positiva por ser estável e seguro para a indústria alimentícia. No âmbito tecnológico observamos o desenvolvimento de biomateriais avançados na área de engenharia de tecidos com a utilização de biocompósitos a base do seu extrato em junção com a quitosana para a criação de curativos ativos que auxiliam da cicatrização de feridas (Sagar et al., 2022; D'Souza et al., 2023; Nur et al., 2023).

Outra aplicação que vem sendo estudada no cunho tecnológico é a inovação em nanotecnologia verde com o uso dos extratos aquosos como agente redutor e estabilizador que possuem uma capacidade antimicrobiana elevada, possibilitando o desenvolvimento de novos agentes terapêuticos e farmacológicos (Annaraj et al., 2024; Mani et al., 2024).

3.3 Biossurfactante: Conceito e aplicações

Os biossurfactantes conhecidos como metabólitos secundários são surfactantes de origem microbiológica, produzidos por bactérias, leveduras e fungos filamentosos. Sua estrutura molecular é anfipática, ou seja, ela possui uma cabeça polar (hidrofílica) sendo solúvel em água com sua cauda apolar (hidrofóbica) insolúvel a água, oferecendo assim uma gama de funcionalidades como a capacidade tensoativa de reduzir a tensão superficial e interfacial, possui ação espumante, antiespumante e emulsificante, como também sua molécula possui uma tendência de formar umectantes e dispersantes (Silva *et al.,* 2021; Eras-Muñoz *et al.,* 2022).

A estrutura e função molecular dos biossurfactantes são iguais aos surfactantes sintéticos, contudo, os biossurfactantes possuem a vantagem de serem biodegradáveis, fazendo com que não haja a geração de resíduos poluentes, além de possuírem baixa toxicidade tanto para o ambiente quanto para a saúde humana. Alguns biossurfactantes possuem propriedades antibacterianas, antivirais, antifúngicas antioxidantes e antitumorais, também possuem uma grande estabilidade frente ao pH, temperatura e salinidade, podendo chegar ao extremo (Kashif *et al.,* 2022; Carolin *et al.,* 2023).

Além disso, a sua produção pode ser feita com resíduos que contenham fontes de nitrogênio e carboidratos gerados pelas indústrias, como por exemplo, milhocina, óleo de soja residual, óleo de palma dentre outros óleos residuais, melaço, soro de leite, casca de batata, farinha de mandioca, cascas e resíduos de frutas e tantos outros resíduos gerados, podendo assim reduzir tanto o impacto que esses resíduos causam ao meio ambiente, como também a redução de custo na sua produção (Gunjal, 2022; Sankhyan *et al.,* 2024).

3.3.1 Tipos de biossurfactante

Esta ampla gama de vantagens e propriedades que os biossurfactantes possuem resultam por conta da sua classificação estrutural e bioquímica, como também a composição do substrato a qual ele será produzido, podendo assim ser classificados como biossurfactantes de baixo peso molecular e alto peso molecular, como também por sua carga elétrica podendo ser aniônico ou catiônico, de acordo com essas estruturas são denominados de glicolipídios, fosfolipídios e lipopeptídeos, ácidos graxos e surfactantes poliméricos, demonstrados na tabela a seguir (Simões *et al.,* 2024; Hsu *et al.,* 2025).

Tabela 3. Principais produtores de biossurfactante e seus tipos

Biossurfactante	Microrganismo	Referências
Glicolipídios	*Pseudomonas aeruginosa*	Eras-Muñoz *et al.,* 2022
	Cunninghamella echinulata	Andrade *et al.,* 2018
	Fusarium sp.	Sanches *et al.,* 2021
Ramnolipídeos	*Pseudomonas sp.*	Phulpoto *et al.,* 2022
Lipopeptídeos	*Bacillus cereus*	Ali *et al.,* 2022

Surfactina	*Bacillus subitillis*	Bartal *et al.,* 2023
Poliméricos	*Candida sp.*	Kashif *et al.,* 2022
Soforolipídeos	*Candida bombicola*	Carolin *et al.,* 2023

Fonte: Elaborado pela autora.

Os glicolipídios são compostos por duas partes sendo elas hidrofílicas formados por açúcares, sacarídeos, aminoácidos e a parte hidrofóbica sendo a porção lipídica formada por ácidos graxos, carotenoides, polipeptídios, dentre outras, tendo assim, uma capacidade anfifílica, servindo melhor para formulações emulsionantes, possuindo uma baixa toxicidade e um melhor desempenho na CMC, sendo mais aplicados para a biorremediação, área agrícola, alimentícia, cosmética e afins (Sanches, 2021 Lakatos *et al.,* 2022).

Os ramnolipídeos são compostos por uma parte hidrofílica formada por moléculas monas ou dissacarídeos de ramnose e outra parte hidrofóbica composta por uma ou duas cadeias de ácidos graxos com comprimento variado. Geralmente são utilizados na recuperação e biorremediação de derramamento de petróleo, como também no controle e melhoramento do solo e plantas no setor agrícola (Shi *et al.,* 2021; Phulpoto *et al.,* 2022).

Os lipopeptídeos são constituídos por biomoléculas de peptídeos de cadeia fechada ligadas a grupos de carboxila e hidroxila de uma cadeia de ácido graxo com comprimentos variados. São considerados estáveis em condições diferentes de pH, temperatura e salinidade, resultando em diversas aplicabilidades desde a biorremediação do solo por metais pesados, até a área farmacêutica com atividades antibacterianas, antivirais, antifúngicas, antioxidante, anticancerígenas, dentre diversas aplicações (Silva *et al.,* 2021; Ali *et al.,* 2022).

As surfactinas são compostas por aminoácidos em sete formatos de anéis ligados a uma cadeia fechada de ácido graxo, dependendo da estrutura composta pela surfactina, ela pode obter em seu anel estruturas de L-leucina, L-valina e L-isoleucina. Servindo para as áreas farmacêuticas, como produtos antimicrobianos, quelantes e agentes hemolíticos por serem eficazes na redução da tensão superficial e possuírem uma baixa CMC permitindo assim a sua reutilização (Gunjal, 2022; Bartal *et al.,* 2023).

Os biossurfactantes poliméricos possuem uma estrutura heteropolissacarídeo conectada a um ácido graxo por ligação covalente,

contendo propriedades emulsionantes e uma baixa tensão superficial que ajuda na remoção de metais pesados e outros poluentes (Carolin et al., 2023; Kashif et al., 2022).

Os soforolipídeos são derivados dos glicolipídios fúngicos, onde possuem uma combinação entre cadeias de ácidos alifáticos, com uma estrutura molecular pode ser acíclica (cadeia aberta) ou cíclica (cadeia fechada) com uma porção hidrofílica de soforose ligados a uma cadeia hidrofóbica de ácido graxo. Por possuírem um alto rendimento de produção são comumente utilizados na área médica como antibacteriano, antifúngico, anticâncer, anti-inflamatório, como também na área ambiental como biorremediador na descontaminação do solo por metais pesados e para recuperação de áreas contaminadas por petróleo, além de demonstrar um potencial de aplicação industrial e comercial como agente de limpeza, perfumes e cosméticos (maquiagens e similares) e para a produção de celulose (Cho *et al.,* 2022; Adu *et al.,* 2023)

3.3.2 Propriedades emulsificantes

Os biossurfactantes também possuem propriedades emulsificantes, onde esses mecanismos são interrelacionados a redução da tensão superficial, que ao se acumularem na interface entre duas fases imiscíveis, diminuindo a tensão superficial, facilitando a dispersão de uma fase na outra, proporcionando a formação de gotículas, que são capazes de formar e estabilizar emulsões (Silva *et al.,* 2021; Dini *et al.,* 2024).

Esse resultado é observado através do índice de emulsificação E^{24} que será responsável por quantificar a atividade emulsificante do biossurfactante. Onde a altura da camada emulsificada formada por 24 horas, será dividida pela altura total da mistura expressa em porcentagem. (Cooper e Goldenberg 1984; Ali *et al.,* 2022).

3.3.3 Aplicações biomédicas e em curativos inteligentes

Através das suas diversas propriedades e atividades biológicas, os biossurfactantes são de suma importância para a área biomédica e farmacêutica por meio de formulações de sistemas de liberações de fármacos por conta da

sua característica anfifílica, atuando como agentes emulsificantes e solubilizantes, ideais para encapsulação e solubilização de fármacos com baixa solubilidade em água, proporcionando uma melhor absorção e eficácia do medicamento, como também podem ser utilizados para formulação e estabilização de nanopartículas em junção com Quitosana para controle patogênicos e agentes terapêuticos (Bjerk *et al.,* 2021; Zhao *et al.,* 2024).

Em relação as propriedades antimicrobianas e capacidade de interação com superfícies, os biossurfactantes são estimados para auxiliar como componente de curativo para feridas subcutâneas, trazendo uma função de controlar a liberação de fármacos e ações antimicrobianas. A sua utilização pode ser feita na forma de incorporação em hidrogéis ou como curativos bioativos (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Ceresa *et al.,* 2023)

A incorporação em hidrogéis pode ser feita em matrizes de hidrogéis como por exemplo a Quitosana, oferecendo um ambiente úmido e ideal para a cicatrização, onde sua presença irá proporcionar uma ação antimicrobiana e antibiofilme prolonganda, sendo crucial para o tratamento de feridas crônicas como como as úlceras em diabéticos (Abhyankar *et al.,* 2024; Afsharipour *et al.,* 2024).

Quanto a formulação de curativos bioativos, os biossurfactantes contribuem diretamente no processo de cicatrização, modulando a resposta imune na ferida, reduzindo a inflamação crônica por meio do seu potencial anti-inflamatório e antioxidante, auxiliando assim em uma regeneração mais eficaz (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Han *et al.,* 2024).

3.4 Quitosana como biopolímero ativo

3.4.1 Origem e estrutura química

A quitosana é um biopolímero derivado da quitina, obtido principalmente de exoesqueletos de crustáceos, que tem ganhado destaque por suas propriedades biocompatíveis, biodegradáveis e antimicrobianas. Avanços recentes possibilitaram o desenvolvimento de nanomateriais baseados nesse polímero, como nanopartículas, hidrogéis e filmes nanocompósitos, voltados

para aplicações em engenharia de tecidos, embalagens sustentáveis e cicatrização de feridas (Dalbanjan *et al.,* 2024; Gonciarz *et al.,* 2025).

A conversão da quitina em quitosana é realizada através da reação de desacetilação, um processo químico que remove os grupos acetila da quitina, transformando as unidades de N-acetil-D-glicosamina em unidades de D-glicosamina. Tradicionalmente, essa reação é conduzida em condições alcalinas severas, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) concentrados e altas temperaturas (Hong *et al.,* 2024; Yu *et al.,* 2025).

As propriedades e a funcionalidade da quitosana são determinadas por dois parâmetros estruturais principais, que são controlados durante o processo de desacetilação, sendo o seu grau de desacetilação (GD) que irá determinar o número de grupos amino livres (NH2), influenciando diretamente a solubilidade em pH ácido e a densidade de carga e o seu peso molecular (PM) que irá afetar a viscosidade da solução, como também a sua biocompatibilidade e a sua atividade biológica (Harugade; Sherje; Pethe, 2023; Tang *et al.,* 2023).

3.4.2 Propriedades físico-químicas e biológicas

Suas propriedades são bastantes relevantes em diversos campos, especialmente na área biomédica, a capacidade físico-química mais perceptível da quitosana é o seu caráter catiônico, permitindo a interação eletrostática com superfícies e moléculas carregadas negativamente, como proteínas, membranas celulares e polímeros aniônicos (Dalbanjan *et al.,* 2024; Yu *et al.,* 2025).

Possibilitando assim, uma solubilidade em soluções ácidas, facilitando seu processamento em biofilmes, fibras, nanopartículas e hidrogéis, demonstrando uma capacidade quelante auxiliando tanto na purificação quanto na estabilização de nanopartículas incorporadas em curativos. Outro ponto bastante observado é a sua biocompatibilidade e biodegradabilidade, sendo biodegradável no organismo por enzimas, o que facilita a sua utilização no mercado na produção de tecidos biológicos e para implantes (Harugade; Sherje; Pethe, 2023; Hong *et al.,* 2024).

Em relação as suas propriedades biológicas que são o ponto central de suas aplicações, onde são mais investigadas as atividades antimicrobianas,

atividades hemostáticas e antioxidantes, como também sua capacidade cicatrizante. A atividade antimicrobiana contra bactérias Gram-negativas, Gram-positivas e fungos é comumente presente na quitosana e sua eficácia dependerá do peso molecular e do grau de desacetilação ao qual ela se encontra, onde o baixo peso molecular e alto grau de desacetilação irá proporcionar uma maior atividade antimicrobiana, pelo fato do baixo peso facilitará penetração nas células microbianas, enquanto o alto grau de desacetilação irá garantir uma maior densidade de carga positiva para a interação, fazendo com que haja um maior efeito na morte celular microbiana (Tang *et al.,* 2023; Gonciarz *et al.,* 2025).

A quitosana também possui uma capacidade hemostática, ajudando na aceleração da coagulação sanguínea, como também possui propriedades antioxidantes como amino e hidroxila, permitindo a neutralização de radicais livres, se tornando um potencial para curativos por proporcionar a redução do estresse oxidativo em processos inflamatórios e de cicatrização (Gheorghita *et al.,* 2023; Cassano *et al.,* 2024).

Os oligossacarídeos de quitosana também demonstraram propriedades importantes na área biomédica, como efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e imunomodulatórios. Devido à alta solubilidade em água e baixa viscosidade, esses compostos se destacam em aplicações cosméticas e no tratamento de feridas, por protegerem células da pele contra danos oxidativos e favorecerem o fechamento de lesões (Lan *et al.,* 2023; Lee *et al.,* 2025).

3.4.3 Aplicações em curativos e cicatrização de feridas

No campo da engenharia de tecidos, hidrogéis funcionais de quitosana têm sido desenvolvidos para o tratamento de feridas diabéticas e formulações com ácido hialurônico e nanopartículas de ouro, assim como aquelas incorporadas com taurina, apresentaram notáveis propriedades antimicrobianas e capacidade de estimular a angiogênese e a deposição de colágeno (Liu *et al.,* 2024; Meng *et al.,* 2024).

Tais avanços evidenciam o grande potencial desses materiais no desenvolvimento de curativos inteligentes e eficientes. A análise geral revela que a quitosana e seus derivados são biomateriais promissores para diversas

aplicações tecnológicas e médicas, reforçando a importância de pesquisas em nanotecnologia e bioengenharia para a melhoria da qualidade de vida e sustentabilidade ambiental (Liu *et al.,* 2024; Aberoumand *et al.,* 2025).

Além disso, essas tecnologias têm se mostrado promissoras para o tratamento de feridas crônicas e infectadas por proporcionarem uma combinação de biocompatibilidade, baixa toxicidade e a capacidade de formar complexos eletrostáticos, podendo ser empregadas em diversas formas de curativos e regeneração tecidual (Che *et al.,* 2024; Naghib *et al.,* 2024).

Uma das formas de utilização da quitosana é a partir da produção de biofilmes e membranas que são utilizados com barreiras semipermeáveis, mantendo a umidade da ferida e a protegendo contra diversas infecções. Esponjas e Scaffolds também podem ser uma opção que ajudará no fornecimento de um arcabouço que irá mimetizar a matriz extracelular, facilitando a migração e proliferação celular. Como também a maneira mais habitual da sua utilização é a formulação de hidrogéis aplicados diretamente na ferida, sendo a forma mais eficaz para gerar biocompósitos com outros componentes que irão potencializar a sua ação cicatrizante (Cojocaru *et al.,* 2022; Alven; Aderibigbe, 2024).

3.5 Cicatrização de feridas: Aspectos gerais

O corpo humano apresenta um processo de cicatrização de feridas de forma biologicamente natural, envolvendo diversas fases que são consideradas elevadamente complexas, mas essenciais para a restauração da integridade dos tecidos desde o momento da lesão ocasionada até a maturação final da cicatriz (Duan *et al*., 2024; Bogadi *et al.,* 2025)

Contudo, com o avanço de doenças crônicas como a diabetes e o envelhecimento natural ocasionam um aumento significativo de lesões cutâneas de difícil cicatrização, levando assim a busca de novas ferramentas inovadoras que proporcionem um tratamento mais eficaz e econômico (Chen *et al.,* 2024; Huang *et al.,* 2025)

3.5.1 Fases do processo de cicatrização

O processo de cicatrização envolve quatro fases: 1° Hemostasia (coagulação), 2° Inflamatória, 3° Proliferativa e 4° Remodelamento. Onde cada qual tem sua função distinta no processo de cicatrização, porém interligando entre si a cada final de processo (Fu *et al.,* 2024; Kamal et al., 2024).

A primeira fase se inicia de imediato após ocorrer a lesão, onde o principal objetivo da hemostasia é parar o sangramento ocasionado causando uma vasoconstrição e ativação plaquetária resultando na coagulação do sangue, iniciando assim a fase dois que dura normalmente entre 1 a 6 dias, onde o principal objetivo da fase inflamatória é fazer proteção contra infecções através dos neutrófilos e macrófagos levando para a terceira fase (Wang *et al.,* 2021; Kumar *et al.,* 2024)

A fase proliferativa ocorre entre 4 e 25 dias após a lesão e tem por finalidade a reconstrução do tecido lesionado, que acontece através da formação de novos vasos sanguíneos chamada de angiogênese, a formação do tecido de granulação rica em colágeno, fazendo com que haja uma contração da ferida a qual irá fechar a lesão e assim ocorrer a epitelização que irá interligar para a quarta e última fase da cicatrização com a remodelação do tecido através da troca de colágeno, trazendo mais resistência ao tecido. (Subramaniam *et al.,* 2021; Choudhary *et al.,* 2024)

3.5.2 Fatores que influenciam o processo de cicatrização

Nas quais o processo de cicatrização pode ser influenciado por diversos fatores, sendo eles a presença de biofilmes bacterianos, estresse oxidativo e má vascularização podem prejudicar a regeneração eficiente, como também feridas crônicas, como úlceras diabéticas e de pressão, são particularmente difíceis de tratar devido à persistência da inflamação e risco de infecção. A tabela a seguir irá pontuar os principais fatores que influenciam o processo de cicatrização. (Kwiatkowska *et al.,* 2022; Uberoi *et al.,* 2024)

Tabela 4. Principais fatores que influenciam o processo de cicatrização

Fatores que influenciam	Impacto na cicatrização	Referências
Idade	Redução da resposta inflamatória e proliferação	(Bonifant; Holloway, 2019; Wilkinson; Hardman, 2020)
Doenças crônicas	Prejudica a função celular e a perfusão tecidual	(Wilkinson; Hardman, 2020; Kamal et al., 2024)
Nutrição	Deficiência de vitaminas e minerais comprometendo o colágeno e a função imunologica	(Campos et al., 2007; Kwiatkowska et al., 2022)
Medicação	Supreção da resposta inflamatória e proliferação	(Campos et al., 2007)
Infecção/biofilme	Prolonga a fase inflamatória e degradação tecidual	(Kwiatkowska et al., 2022; Uberoi et al., 2024)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.6 Avanços em biomateriais para cicatrização de feridas na pele

Os biomateriais utilizados em curativos são de suma importância para a saúde e o meio ambiente, se tornando a melhor opção para a substituição dos curativos tradicionais por possuírem bioativos que interagem com a ferida, possibilitando uma aceleração na regeneração tecidual, além de serem biodegradáveis ao meio ambiente (Hasan *et al.,* 2022; Tripathi *et al.,* 2022).

Há duas classificações para a formulação dos biomateriais usados para curativos e cicatrização com base em sua origem, podendo ser de origem natural ou sintético, cada qual irá proporcionar uma vantagem em sua utilização, seja ela através da sua eficácia, custo-benefício ou sustentabilidade (Deng; Gould; Ali, 2022; Downer *et al.,* 2023).

3.6.1 Biomateriais naturais e sintéticos

Os biomateriais naturais são derivados de organismos vivos e são considerados vantajosos por serem biodegradáveis e biocompatíveis ao tecido, exercendo uma adesão e proliferação celular devido a sua semelhança estrutural com a matriz extracelular. Os biomateriais naturais podem originar-se de polímeros de carboidratos e de polímeros de proteínas (Holl *et al.,* 2021; Ijaola *et al.,* 2022).

Para a categoria de polímeros a base de carboidratos, como a Quitina e a Quitosana, derivados da carapaça de crustáceos, são comumente utilizados em formulações de hidrogéis e nanofibras por possuírem propriedades antimicrobianas e anti-inflamatórias, possibilitando uma regeneração tecidual mais eficaz. (Liang; He; Guo, 2021; Wei *et al.,* 2021).

Outro polímero a base de carboidrato é o Alginato, um polissacarídeo derivado de algas marinhas, normalmente são utilizados em curativos por sua capacidade de absorção de exsudato que previne infecções e possibilita uma cicatrização mais segura, além da sua capacidade na formação de gel. Como também o ácido hialurônico, utilizado na proliferação celular e migração decidual, sendo um importante componente da matriz extracelular trazendo hidratação e rigidez ao tecido lesionado (Hasan *et al.,* 2022; Downer *et al.,* 2023).

Para polímeros a base de proteínas, os mais utilizados são o colágeno que irá fornecer uma estrutura mais resistente que facilitará a adesão e o crescimento celular, como também a utilização da fibrina em curativos por conta da sua ação coagulante que irá estancar o sangramento e auxiliar na inicialização do processo inflamatório (Holl *et al.,* 2021; Tripathi *et al.,* 2022).

Já os biomateriais sintéticos oferecem a vantagem de possuir propriedades mecânicas e taxas de degradação consideravelmente viáveis, diferentemente dos naturais que são mais instáveis por serem de origem biológica. Com isso abrangemos os polímeros sintéticos com a classe de polímeros poliésteres alifáticos com o poli(ácido lático) e poli(ácido glicólico), conhecidos como (PLA) e (PGA) respectivamente, são comumente utilizados em embalagens, implantes e curativos especialmente em formulações de nanofibras por possuírem uma característica biodegradável e de alta resistência, como o poli (álcool vinílico) (PVA), que é solúvel em água e possui uma biocompatibilidade e estabilidade na sua formulação de hidrogéis, com ótimas propriedades aderentes e formação de biofilme (Deng; Gould; Ali, 2022; Ijaola *et al.,* 2022).

3.6.2 Hidrogéis, Filmes e Nanofibras: Aplicações Clínicas

Os biomateriais irão interagir com a ferida de formas distintas de acordo com o seu modo de apresentação, como por exemplo em aspecto de hidrogel,

biofilmes e nanofibras, cada forma irá conduzir um resultado de forma diferente, podendo liberar agentes terapêuticos, ações antibacterianas e anti-inflamatórias que irão possibilitar uma eficácia na cicatrização de acordo com a necessidade da lesão (Kamal *et al.,* 2024; Bogadi *et al.,* 2025).

Os hidrogéis são compostos poliméricos que tendem a reter grandes quantidades de água, adquirindo um aspecto parecido com a matriz extracelular, proporcionando uma condição ideal para a cicatrização. Pesquisas recentes sobre formas de utilização de hidrogéis para tratamento e cicatrização de feridas cutâneas demostraram possíveis junções de hidrogel nanocomposto de ácido hialurônico para o preenchimento de feridas melhorando a estabilidade do curativo (Downer *et al.,* 2023; Uberoi *et al.,* 2024)

Outra forma adquirida é a formulação de hidrogéis que contenham plasma rico em plaquetas (PRP) permitiendo a liberação controlada dos fatores de crescimento, prolongando assim o seu efeito terapêutico, melhorando por sua vez a regeneração tecidual, da mesma maneira com a formulação de hidrogeis multifuncionais que contenham combinações antimicrobianas para o tratamento de lesões crônicas que sofreram infecções e estresse oxidativo (Duan *et al*., 2024; Huang et al., 2025).

Visto que os biofilmes e as nanofibras também são uma ótima opção para o tratamento de feridas, onde seus curativos são finos e flexíveis se assemelhando a estrutura fibrosa de uma matriz extracelular, as características das nanofibras são amplamente vantajosas por sua infraestrutura alta que facilita a troca gasosa e absorção de exsudato, juntamente com sua estrutura porosa que suporta a infiltração e o crescimento celular. Já os biofilmes são ideais para atuar como barreira protetora por serem mais resistentes e flexíveis. por sua vez. (Wei et al., 2021; Tripathi et al., 2022;)

Nanofibras compostas por polímeros sintéticos (PLA) e (PGA) ou até mesmo naturais como as quitosanas podem ser preenchidos por antibióticos ou extratos vegetais que auxiliam a cicatrização, permitindo a criação de curativos com liberação controlada de vários agentes cicatrizantes. Assim como os curativos esponjosos a base de quitosana e poli(ácido glutâmico) (PGA), com funcionalidade absorvente, permitindo a hemostasia na lesão e o crescimento tecidual (Deng; Gould; Ali, 2022; Kwiatkowska *et al.,* 2022).

REFERÊNCIAS

ABHYANKAR, I. et al. Bridging the gap: An investigation of biosurfactants-polymer systems. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 72, p. 101806, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101806.

ADEWALE, O.O., SAMUEL, E., GBADEGESIN, M., OWUMI, S., ODUNOLA, O. Ethanol extract of *Basella alba* Linn modulates Acrylamide-induced Oxidative stress in Wistar rats. **Journal of microbiology, biotechnology and food sciences**. v. 11, n. 5, p. e183, 2022. DOI: 10.55251/jmbfs.1837.

ADENEGAN-ALAKINDE, T.A., OJO, F.M. Phytochemical and antioxidant properties of forms of *Basella***. International Journal of Vegetable Science**, v. 25, n.6, p. 557-565, 2019. DOI: https://doi-org/10.1080/19315260.2018.1524808.

ADU, S. A. et al. Purified Acidic Sophorolipid Biosurfactants in Skincare Applications: An Assessment of Cytotoxic Effects in Comparison with Synthetic Surfactants Using a 3D In Vitro Human Skin Model. **Fermentation**, v. 9, n. 11, p. 985–985, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation9110985.

AFSHARIPOUR.*et al.* Preparation and Physicochemical Properties of a Thermosensitive Hydrogel-based Lipopeptide Biosurfactant. **Letters in Drug Design & Discovery**, v. 21, 2024. DOI: https://doi.org/10.2174/0115701808296878240419065845.

AHMAD, W; MCCORMACK, S.J; BYRNE, A. Biocomposites for sustainable construction: A review of material properties, applications, research gaps, and contribution to circular economy, **Journal of Building Engineering,** v. 105, p. 112525, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112525. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225007624 >

AKINNIYI, G., ADEWALE, S., ADEWALE, O., ADEYIOLA, I. Qualitative phytochemical screening and antibacterial activities of *Basella alba* and *Basella rubra*. **Journal of Pharmacy & Bioresources**. v. 16, n. 2, p. 133–138, 2019. DOI: 10.4314/jpb.v16i2.6.

ALARA, J. A.; ALARA, O. R.; ABDURAHMAN, N. H. Role of Biosurfactants in Biocidal Activity and Wound Healing. **Advancements in Biosurfactants Research**, p. 399–437, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21682-4_19.

ALI, N. et al. Lipopeptide Biosurfactants from Bacillus spp.: Types, Production, Biological Activities, and Applications in Food. **Journal of Food Quality**, v. 2022, p. e3930112, 2022. DOI: **https://doi.org/10.1155/2022/3930112Digital Object Identifier.**

ALVEN, S.; ADERIBIGBE, B.A. Chitosan-Based Scaffolds Incorporated with Silver Nanoparticles for the Treatment of Infected Wounds. **Pharmaceutics**, v. 16, n. 3, p. 327–327, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16030327.

AMIRINEJAD, N.; SHAHRIARY, P.; HASSANSHAHIAN, M. Investigation of the synergistic effect of glycolipid biosurfactant produced by Shewanella algae with some antibiotics against planktonic and biofilm forms of MRSA and antibiotic resistant Acinetobacter baumannii. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 2, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-022-03492-1.

ANDREW, J. J.; DHAKAL, H. N. Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review. **Composites Part C: Open Access**, v. 7, p. 100220, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220.

ANNARAJ, S., NIZAR, A.M., ANANDAN, J., SHANMUGAM, R., THANGAVELU, L. Eco-Friendly Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles Using Stem Extract of *Basella Alba* and Its Wound Pathogen Control. **Nanotechnology Perceptions,** v. 20, p. 327-334, 2024. DOI: https://doi.org/10.62441/nano-ntp.vi.1135.

AROKOYO, D.S., OYEYIPO, I.P., PLESSIS, S.S.D., ABOUA, Y.G. Antioxidant Activities of Basella alba Aqueous Leave Extract In Blood, Pancreas, and Gonadal Tissues of Diabetic Male Wistar Rats**. Pharmacognosy Research**, v. 10, n. 1, p. 31–36, 2018. DOI: 10.4103/pr.pr_84_17

ARYA, H., MOHAN, C., PANDEY, S., VERAMA, M., KUMAR, V. Phytochemical screening of *Basella alba* leaves extracts and evaluate its efficacy on sun burn. **European Journal of Molecular and Clinical Medicine.** v. 8 n. 1, p. 417-423, 2021. ISSN 2515-8260.

BAMIDELE, O., FASIPEBI, O., TOMOLOJU, E.E., ADEDAYO, L.D., AJAYI, A.F., AFOLABI, A.O. Protective activity of *Basella alba* l. Leaf extract on cardiac injury markers following intestinal ischemia-reperfusion: potential for cardiovascular therapy. **Pharmaceutical Science Advances**, v. 3, p. 100083, 2025. https://doi.org/10.1016/j.pscia.2025.100083.

BARTAL, A. et al. Identifications of Surfactin-Type Biosurfactants Produced by Bacillus Species Isolated from Rhizosphere of Vegetables. **Molecules**, v. 28, n. 3, p. 1172–1172, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28031172.

BOGADI, S. et al. Wound healing in the modern era: Emerging research, biomedical advances, and transformative clinical approaches. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 110, p. 107058, 2025.

BOSE, A., BANERJEE, S., MANDAL, S.K., BOSE, S., MAITY, S. Comprehensive Ethnomedicinal, Pharmacological and Phytochemical Report on *Basella alba L*. (Basellaceae). **Journal of Natural Remedies**, v. 23, n. 4, p. 1307–1326, 2023. DOI: https://doi.org/10.18311/jnr/2023/34287

BJERK, T. R. et al. Biosurfactants: Properties and Applications in Drug Delivery, Biotechnology and Ecotoxicology. **Bioengineering (Basel, Switzerland)**, v. 8, n. 8, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering8080115.

CASSANO, R. et al. Chitosan Hemostatic Dressings: Properties and Surgical Applications. **Polymers**, v. 16, n. 13, p. 1770–1770, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16131770.

CERESA, C. et al. Harnessing the Potential of Biosurfactants for Biomedical and Pharmaceutical Applications. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 8, p. 2156–2156, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15082156.

COJOCARU, E. et al. Electrospun Nanofibrous Membranes Based on Citric Acid-Functionalized Chitosan Containing rGO-TEPA with Potential Application in Wound Dressings. **Polymers**, v. 14, n. 2, p. 294–294, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14020294.

CHAURASIYA, A., PAL, R.K., VERMA, P.K., KATIYAR, A., RAZAUDDIN., KUMAR, N. An updated review on Malabar spinach *(Basella alba* and *Basella rubra*) and their importance. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 10, n. 2, p. 1201–1207, 2021. DOI: 10.22271/phyto.2021.v10.i2p.13974.

CHE, X. et al. Application of Chitosan-Based Hydrogel in Promoting Wound Healing: A Review. **Polymers**, v. 16, n. 3, p. 344–344, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16030344.

CHEN, N. et al. Slow-sculpting graphene oxide/alginate gel loaded with platelet-rich plasma to promote wound healing in rats. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 12, 2024.

CHO, W. Y. et al. Sophorolipids—Bio-Based Antimicrobial Formulating Agents for Applications in Food and Health. **Molecules**, v. 27, n. 17, p. 5556, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27175556.

CHOWDHURY, M., DE, P.K., MAJI, H.S., DAS, D. Safety study of carboxymethylated Basella alba mucilage: a subchronic oral toxicity evaluation in Wistar albino rats. **Journal of Applied Pharmaceutical Research**, v. 12, n. 2, p. 16–26, 2024. DOI: https://doi.org/10.18231/j.joapr.2024.12.2.16.26.

CROVELLA, S. et al. Surfactin Bacterial Antiviral Lipopeptide Blocks In Vitro Replication of SARS-CoV-2. **Applied Microbiology**, v. 2, n. 3, p. 680–687, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2030052.

D'SOUZA, O. J., GASTI, T., HIREMANI, V. D., PINTO, J. P., CONTRACTOR, S. S., SHETTAR, A. K., CHOUGALE, R. B. Basella alba stem extract integrated poly (vinyl alcohol)/chitosan composite films: A promising bio-material for wound healing. International Journal of Biological Macromolecules. v. 225, p. 673-686, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.130.

DAHANAYAKA, L.W., MAPA, M., KADIGAMUWA, C.C et al. Impact of geographical variation on nutritional and antioxidant properties of *Basella alba* L. from Sri Lanka. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, 2025. DOI: https://doi org.ez294.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s12870-025-06143

DALBANJAN, N.P; EELAGER, M.P; KORGAONKAR, K; GONAL, B.N; KADAPURE, A.J; ARAKERA, S.B; KUMAR, S.K.P. Descriptive review on conversion of waste residues into valuable bionanocomposites for a circular bioeconomy. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 39, p. 101265, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101265. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352507X24001768 >.

DESHMUKH, S.A., GAIKWAD, D.K. A review of the taxonomy, ethnobotany, phytochemistry and pharmacology of Basella alba (Basellaceae). **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 4, n. 1, p. 153–165, 2014. DOI: 10.7324/JAPS.2014.40125.

DENG, X.; GOULD, M.; ALI, M. A. A review of current advancements for wound healing: Biomaterial applications and medical devices. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 110, n. 11, 2022. DOI: **https://doi.org/10.1002/jbm.b.35086**.

DINI, S. et al. The Physicochemical and Functional Properties of Biosurfactants: A Review. **Molecules**, v. 29, n. 11, p. 2544, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29112544.

DOWNER, M. et al. Current Biomaterials for Wound Healing. **Bioengineering**, v. 10, n. 12, p. 1378, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering10121378.

DUAN, W. et al. Engineering injectable hyaluronic acid-based adhesive hydrogels with anchored PRP to pattern the micro-environment to accelerate diabetic wound healing. **Carbohydrate Polymers**, v. 337, p. 122146, 2024.

ERAS-MUÑOZ, E; FARRÉ, A; SÁNCHEZ, A; FONT, X; GEA, T. Microbial biosurfactants: a review of recent environmental applications. **BIOENGINEERED - Taylor & Francis**, v.13, n.5, p. 12365-12391, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2074621>

FU, W. et al. Opportunities and challenges of nanomaterials in wound healing: Advances, mechanisms, and perspectives. **Chemical Engineering Journal**, v. 495, p. 153640, 2024.

GHEORGHITA, D. et al. Chitosan-Based Biomaterials for Hemostatic Applications: A Review of Recent Advances. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 13, p. 10540–10540, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms241310540.

GONCIARZ. W. et al. Chitosan-based formulations for therapeutic applications. A recent overview. **Journal of Biomedical Science**, v. 32, n. 1, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s12929-025-01161-7.

GUNJAL, A. Biosurfactants from renewable sources - A review. **Nepal Journal of Environmental Science - Scilit**, v.2, p. 15–23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3126/njes.v10i2.48538>

GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 1–25, out. 2015.

HALAYAL, R.Y., BAGEWADI, Z.K., KHAN, T.M.Y., SHAMSUDEEN, S.M. Investigating compounds from *Basella alba* for their antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer properties through in vitro and network pharmacology, molecular simulation approach. **Green Chemistry Letters and Reviews**, v. 18, n. 1, 2025. DOI: 10.1080/17518253.2025.2481945.

HAN, X. et al. Biosurfactant-mediated transport of tetracycline antibiotics in saturated porous media: Combined effects of the chemical properties of contaminants and solution chemistry conditions. **Science of The Total Environment**, v. 954, p. 176681, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176681.

HARIKRISHNAN, N., KIRANMAYI, V.N.G., RANJITH, S., SHARAN, P., THALAL, M.M.R., THARUNKUMAR, N. Pharmacological Exploration of in Vitro Antibacterial and in Vivo Wound Healing Using *Basella Alba* Ethanolic Stem Extract Ointment On Rats. **Pharmakeftiki**, v. 36, n. 2, p. 1-10, 2024. DOI: https://doi.org/10.60988/p.v36i1.48.

HARUGADE, A.; SHERJE, A. P.; PETHE, A. Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications. **Reactive and Functional**

Polymers, v. 191, p. 105634, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105634.

HASAN, A. et al. Leveraging the advancements in functional biomaterials and scaffold fabrication technologies for chronic wound healing applications. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials.** v. 9, n. 7, p. 1850–1865, 2022. DOI: **https://doi.org/10.1002/jbm.b.35086**.

HOGALE, M.S., KARIYIL, B.J., JOHN, R., KUNNEL, P.M. Malabar spinach potentiates cytotoxic activity through apoptosis in human breast cancer cell lines. **Plant Science Today**. v. 11, n. 3, 2024. DOI: https://doi.org/10.14719/pst.3251.

HOLL, J. et al. Chronic Diabetic Wounds and Their Treatment with Skin Substitutes. **Cells**, v. 10, n. 3, p. 655, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/cells10030655.

HONG, F. et al. Chitosan-based hydrogels: From preparation to applications, a review. **Food Chemistry: X**, v. 21, p. 101095, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101095.

HUANG, S. et al. Recent Research Progress of Wound Healing Biomaterials Containing Platelet-Rich Plasma. **International Journal of Nanomedicine**, v. 20, p. 3961–3976, 2025.

IJAOLA, A. O. et al. Polymeric biomaterials for wound healing applications: a comprehensive review. **Journal of Biomaterials Science -- Polymer Edition**, v. 33, n. 15, p. 1998–2050, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/09205063.2022.2088528.

ILYAS, R. A. et al. Natural-Fiber-Reinforced Chitosan, Chitosan Blends and Their Nanocomposites for Various Advanced Applications. **Polymers**, v. 14, n. 5, p. 874, 1 jan. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14050874

ISLAM, M.S., RAHI, M.S., JAHANGIR, C.A., JERIN, I., HASAN, M.M., HOQUE, K.M.F., REZA, M.A. Deciphering the molecular pathways of apoptosis using purified fractions from leaf extract of Basella alba through studying the regulation of apoptosis related genes. **Mol. Biol. Rep.** v. 48, p. 85–96, 2021. DOI: 10.1007/s11033-021-06136-z.

JAGARWAL, P.; VIJAYVERGIA, R.; KUMAR, D. Isolation, Identification and Characterization of Flavonoids from *Basella alba L*. **European Journal of Medicinal Plants,** p. 28–38, 2021. DOI: 10.9734/ejmp/2021/v32i930416.

JAYSWAL, V.B., PATEL, V.H., DAVE, N.R. Effect of various solvents on the extraction of antioxidants from dried *basella alba* leaves. **Applied Biological Research.** v. 23 n. 2, p. 129–135, 2021. DOI: 10.5958/0974-4517.2021.00018.5.

KAMONWANNASIT, S., PRASITNOK, O., PRASITNOK, K. *et al.* Antibacterial Performance of *Stephania pierrei*-Functionalized Hydroxyapatite Nanoparticles Synthesized Using *Basella alba* Mucilage as a Template. ***J Sol-Gel Sci Technol*** v. 115, p. 1795–1811, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10971-025-06889-0

KASHIF, A; REHMAN, R; FUWAD, A; SHAHID, M.K; DAYARATHNE, H.N.P; JAMAL, A; AFTAB, M.N; MAINALI, B. Current advances in the classification, production, properties and applications of microbial biosurfactants – A critical review. **Advances in Colloid and Interface Science - Elsevier**, 306, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102718

KATARZYNA SUTOR-ŚWIEŻY et al. *Basella alba L.* (Malabar Spinach) as an Abundant Source of Betacyanins: Identification, Stability, and Bioactivity Studies on Natural and Processed Fruit Pigments. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 72, n. 6, p. 2943–2962, 2024. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c06225.

KUMAR, S., PRASAD, A. K., IYER, S. V., VAIDYA, S. K. Systematic pharmacognostical, phytochemical and pharmacological review on an ethno medicinal plant, *Basella alba L.* **Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy**, v. 5 n. 4, p. 53-58, 2013. DOI: 10.5897/JPP12.0256.

KUMAR, P.C., OBEROI, H.S. AZEEZ, S. Basella-an Underutilized Green Leafy Vegetable with a Potential for Functional Food Development. **Food Reviews International**, v. 38 n. 1, p. 456-473, 2022. DOI: 10.1080/87559129.2021.1874410.

KUMAR, G., JISHI, J.T., RAO, P.S., MANCHIKANTI, P. Effect of thin layer drying conditions on the retention of bioactive components in Malabar spinach (*Basella alba)* leaves. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100419, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100419.

KUMARI, R., GOLDAR, W.A., MONDAL, S. et al. Protective effect of *Basella alba* leaf against diabetic nephropathy in rats. **ADV TRADIT MED**. v. 21, p. 111–119, 2021. DOI: https://doi-org/10.1007/s13596-020-00458-2.

KHAN, S., SANGMA, J. A., ACHARYYA, P. Growth and Yield of *Basella alba L*. in Relation to the Propagation Method and the Growth Media. **Environment and Ecology**, v. 42, n. 1, p. 1-6, 2024. DOI: https://doi.org/10.60151/envec/XWCC5774.

KHUBIEV, O. et al. Chitosan-Based Antibacterial Films for Biomedical and Food Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 13, p. 10738–10738, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms241310738.

LAKATOS, E.S; CIOCA, L.I; SZILAGYI, A; VLADU, M.G; STOICA, R.M; MOSCOVICI, M. A Systematic Review on Biosurfactants Contribution to the Transition to a Circular Economy. **Journal Processes - MDPI**, V.10, N.12, p. 2647, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122647>

LAMM, M. E. et al. Exploiting chitosan to improve the interface of nanocellulose reinforced polymer composites. **Cellulose**, v. 29, n. 7, p. 3859–3870, 22 mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-021-04327-2

LAN, J. et al. Antibacterial and antiviral chitosan oligosaccharide modified cellulosic fibers with durability against washing and long-acting activity. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 231, p. 123587, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123587.

LI, H. et al. Biomass, biofuels, biochemicals : biochemicals and materials production from sustainable biomass resources. **Amsterdam: Elsevier**, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824419-7.00009-1

LIANG, Y.; HE, J.; GUO, B. Functional Hydrogels as Wound Dressing to Enhance Wound Healing. **ACS Nano**, v. 15, n. 8, p. 12687–12722, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04206.

LINGESHWARAN, L. et al. Sustainable ultrasonic extraction of antibacterial *Basella alba* fruit dye for cotton, silk, and leather**. Ultrasonics Sonochemistry**, v. 111, p. 107069, dez. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107069.

LINSAENKART, P., RUKSIRIWANICH, W., SRINGARM, K., ARJIN, C., RACHTANAPUN, P., CHITTASUPHO, C., CASTAGNINI, J.M., CHUTOPRAPAT, R., MUELLER, A., Boonpisuttinant, K. Anti-Melanogenic Potential of Malabar Spinach (*Basella alba*) in Human Melanoma Cells with Oxidative Stress Suppression and Anti-Inflammatory Activities. **Foods,** v. 13, n. 18, p. 2943–2943, 2024. DOI: **https://doi.org/10.3390/foods13182943.**

LIU, X. et al. Facile fabrication of chitosan/hyaluronic acid hydrogel-based wound closure material Co-loaded with gold nanoparticles and fibroblast growth factor to improve anti-microbial and healing efficiency in diabetic wound healing and nursing care. **Regenerative Therapy**, v. 26, p. 1018–1029, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.reth.2024.10.003.

ŁUKASZ KOZIOŁ et al. Identification and reactivity of pigments in prominent vegetable leaves of Basella alba L. var. “Rubra” (Malabar spinach**). Food chemistry**, v. 445, p. 138714–138714, 1 jul. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138714.

LUONG, A. D.; MOORTHY, M.; LUONG, J. H. Microbial Biosurfactants: Antimicrobial Agents Against Pathogens. **Macromol**, v. 6, n. 1, p. 6, 14 jan. 2026. DOI: **https://doi.org/10.3390/macromol6010006**

MAGNO, R.J.C., TUYOR, S.M., ENTERO, J.M., DUMAPLIN, E.M., LLANO, J.R.L., MARAPAO, J.M.A., OLAYBAR, B.B., CABARLES, R.J.A., RAMADA, J.M.S. Preliminary Phytochemical Screening of Selected Medicinal Plants Traditionally Used as Anthelmintics by Native Chicken Farmers in Agusan Del Norte, Philippines. **Journal of Animal Health and Production**. v. 13, n. 3, p. 688-694, 2025 DOI: https://dx.doi.org/10.17582/journal.jahp/2025/13.3.688.694.

MAHMUD, MD. Z A. Exploring the versatile applications of biocomposites in the medical field. **Bioprinting**,v.36, e. 00319, 2023, DOI: https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00319 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405886623000623>

MANI, M., PAVITHRA, S., MOHANRAJ, K., KUMARESAN, S., ALOTAIBI, S.S., ERAQI, M.M., GANDHI, A.D., BABUJANARTHANAM, R., MAAZA, M., KAVIYARASU, K. Studies on the spectrometric analysis of metallic silver nanoparticles (Ag NPs) using *Basella alba* leaf for the antibacterial activities. **Environmental Research**, v. 199, p. 111333, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111274.

MENG, H. et al. Hydrogels Containing Chitosan-Modified Gold Nanoparticles Show Significant Efficacy in Healing Diabetic Wounds Infected with Antibiotic-Resistant Bacteria. **International Journal of Nanomedicine**, v. 19, p. 1539–1556, 2024. DOI: https://doi.org/10.2147/IJN.S448282.

MCKENNA, P.P. *et al*. Microbial Biosurfactants: Antimicrobial Activity and Potential Biomedical and Therapeutic Exploits. **Pharmaceuticals**, v. 17, n. 1, p. 138–138, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ph17010138.

NUR, M.A., KHAN, M., SATTER, M.A., RAHMAN, M.M., UDDIN M.J., AMIN M.Z. Assessment of physicochemical properties, nutrient contents and colorant stability of the two varieties of Malabar spinach (*Basella alba L*.) fruits. **Biocatalysis and Agricultural**

Biotechnology. v. 51 n. 102746, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102746.

NUR, M. A., ISLAM, M., BISWAS, S., HASAN, Sr.N., RAHMAN, M.M., UDDIN, Sr.J., SATTER, M.A., AMIN, Sr.Z. Determination of biological activities of malabar spinach (*Basella alba*) fruit extracts and molecular docking against COX-II enzyme. **Heliyon,** v. 9, n. 11, p. e21568, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21568.

NGUYEN, H.T., HERRMAN, F., KONIG, S., GOYCOOLEA, F.M., HENSEL A. Structural characterization of the carbohydrate and protein part of arabinogalactan protein from *Basella alba* stem and antiadhesive activity of polysaccharides from *Basella alba* against Helicobacter pylori. **Fitoterapia Journal.** v. 157 n. 105132, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fitote.2022.105132.

OKOUANGO, Y.S.I., MANANGA, V., ELENGA, M., HISSEINE, A. Avaliação do consumo e da qualidade nutricional de Basella alba L. em Brazzaville. **African Journal of Food Science.** v. 13 n. 7, p. 143–51, 2019. DOI: https://doi.org/10.5897/AJFS2019.1811.

OMOTOSO, D.R., OLUBOWALE, V.O., AINA, F.M., DARAMOLA, O.O. Phytochemical Profiling of *Basella alba* Using Gas chromatography-Mass Spectrometry**. Tropical Journal of Natural Product Research**, v. 8, n. 6, 2024. DOI:https://doi.org/10.26538/tjnpr/v8i6.36.

PÉREZ, L. et al. Cationic Surfactants Based on Arginine-Phenylalanine and Arginine-Tryptophan: Synthesis, Aggregation Behavior, Antimicrobial Activity, and Biodegradation. **Pharmaceutics**, v. 14, n. 12, p. 2602–2602, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122602.

PHIRI, R. et al. Development of sustainable biopolymer-based composites for lightweight applications from agricultural waste biomass: A Review. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 6, n. 4, abr. 2023.

PHULPOTO, I.A. *et al.* Evaluation of di-rhamnolipid biosurfactants production by a novel Pseudomonas sp. S1WB: Optimization, characterization and effect on petroleum-hydrocarbon degradation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 242, p. 113892–113892, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113892.

REDDY, G.J., MADHAVI, T.R., RAO, C.A., NITHYA, S., RAO, P.N. An updated phytochemical and pharmacological review on Malabar Spinach (*Basella alba* or *Basella rubra*). **GSC biological and pharmaceutical sciences**, v. 24, n. 2, p. 161–169, 2023. DOI: 10.30574/gscbps.2023.24.2.0312.

RUSAK, A., MROZOWSKA, M., KOZŁOWSKA, W., WIATRAK, B., DZIĘGIEL, P., WYBRANIEC, S., CAREV, I., JAMA-KMIECIK, A., MATKOWSKI, A., ZIELIŃSKA, S. Anti-Inflammatory Activity of Gomphrenin-Rich Fraction from *Basella alba* L. f. *rubra* Fruits. **Nutrients**, v. 16, n. 24, p. 4393, 2024. **https://doi.org/10.3390/nu16244393**.

RUSSO, C. et al. Bud-Poplar-Extract-Embedded Chitosan Films as Multifunctional Wound Healing Dressing. **Molecules**, v. 27, n. 22, p. 7757–7757, 2022. DOI:

SAGAR, V., PRAGYA., BHARDAWAJ, R., DEVI, J., SINGH, S.K., SINGH, P.M., SINGH J. The inheritance of betalain pigmentation in *Basella alba L*. **Scientia Horticulturae**, v. 145, p. 360-369, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.01.033.

SALEHI, M., MIRHAJ , M., BANITORFI HOVEIZAVI, N., TAVAKOLI , M., & MAHHEIDARI, N. Advancements in Wound Dressings: The Role of Chitin/Chitosan-based Biocomposites. ***Journal of Composites and Compounds***, v.*7*, ed. 23, 2025. https://doi.org/10.61186/jcc.7.2.2

SOARES, A. R. et al. Synthesis of Polymeric Nanoparticles Using Fungal Biosurfactant as Stabilizer. **Processes**, v. 12, n. 12, p. 2739, 3 dez. 2024. DOI: **https://doi.org/10.3390/pr12122739**

SUTOR-ŚWIEŻY, K., GÓRSKA, R., KUMORKIEWICZ-JAMRO, A., DZIEDZIC, E., BIENIASZ, M. *Basella alba L*. (Malabar Spinach) as an Abundant Source of Betacyanins: Identification, Stability, and Bioactivity Studies on Natural and Processed Fruit Pigments. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72 n. 6, p. 2943–2962, 2024. DOI: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10870984/.

SHANMUGAM, V; MENSAH, R.A; FÖRSTH, M; SAS, G; RESTÁS, A; ADDY, C; XU, Q; JIANG, L; NEISIANY, R.E; SINGHA, S; GEORGE, G; E, T.J; BERTO, F; HEDENQVIST, M.S; DAS, O; RAMAKRISHNA, S. Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. **Composites Part C: Open Access**, v. 5, p. 100138, 1 jul. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100138. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682021000335 >

SHARMA, A., BEHERA, B. A review on UPODIKA (*Basella rubra Linn*) - An Ayurvedic Nutraceutical with Enormous Medicinal value. **World Journal of Pharmaceutical Research.** v. 11, n. 9, p. 237-259, 2022. DOI: 10.20959/wjpr20229-2460.

SHEIK, A., KIM, E., ADEPELLY, U., ALHAMMADI, M., HUH, Y.S. Antioxidant and antiproliferative activity of *Basella alba* against colorectal cancer. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 30, n. 4, p. 103609, 1 abr. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103609.

SHENDE., A.S., JAYASREE, J. T., SRINIVASA, P.R. Process optimization of microwave-assisted aqueous extraction of tannins and saponins from Malabar Spinach (*Basella alba*) leaves using ANN-GA and RSM methodology. **Measurement Food,** v. 13, p. 100117–100117, 2024. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2023.100117**.**

SHI, J. et al. Rhamnolipid production from waste cooking oil using newly isolated halotolerant Pseudomonas aeruginosa M4. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123879, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123879.

TALABI, S.I; ISMAIL, S.O; AKPAN, E.I; HASSEN, A.A. Quest for environmentally sustainable materials: A case for animal-based fillers and fibers in polymeric biocomposites. **Composites Part A**, v. 183, p. 108216, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108216 Disponível em: < https://www-sciencedirect-com.ez294.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1359835X24002136#b0480 >

TANG, W. et al. Review: Application of chitosan and its derivatives in medical materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 240, p. 124398, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124398.

TERTYSHNAYA, YU. V.; OLKHOV, A. A. Chitosan and composites with chitosan: production, properties and applications. **Russian Chemical Bulletin**, v. 74, n. 8, p. 2282–2291, ago. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11172-025-4712-5

TRIPATHI, M. et al. Biomaterials-Based Regenerative Strategies for Skin Tissue Wound Healing. **ACS applied bio materials**, v. 5, n. 5, p. 2069–2106, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00035.

USAWAKESMANEE, W.; SIRIPONGVUTIKORN, S.; ANANKARNKIT, R. Nutritional values, bioactive compounds, and biological activities of some edible indigenous plants from Thailand: A review**. Italian Journal of Food Science**, v. 37, n. 2, p. 164–187, 2025. DOI: https://doi.org/10.15586/ijfs.v37i2.2669.

VINODHINI, S., VITHIYA, M., ARUL, A. Green synthesis of silver nanoparticles by employing the Allium fistulosum, Tabernaemontana divaricate and Basella alba leaf extracts for antimicrobial applications**. Journal of King Saud University - Science**, v. 34, n. 4, p. 101939–101939, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101939.

WEI, W. et al. Advanced hydrogels for the repair of cartilage defects and regeneration. **Bioactive Materials**, v. 6, n. 4, p. 998–1011, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.030.

WILKINSON, H. N.; HARDMAN, M. J. Wound healing: Cellular Mechanisms and Pathological Outcomes. **Open Biology**, v. 10, n. 9, 2020. DOI: https://doi.org/10.1098/rsob.200223.

YU, Y. et al. Recent advances in modifications, biotechnology, and biomedical applications of chitosan-based materials: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 289, p. 138772–138772, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138772.

ZHAO, W. et al. Effect of biosurfactants on the self-assembly behavior and drug encapsulation for branched block copolymers. **Journal of Molecular Liquids**, v. 414, p. 126279, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126279.

ZHANG, Y. et al. Variation in Nutritional Components and Antioxidant Capacity of Different Cultivars and Organs of *Basella alba*. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 892, 2024. https://doi.org/10.3390/plants13060892.

CAPÍTULO II

Biossurfactante produzido por *Mucor circinelloides* UCP 0017 isolado de manguezal e estabilidade em condições extremas.

Biosurfactant produced by *Mucor circinelloides* UCP 0017 isolated from mangroves and stable under extreme conditions.

Biosurfactante producido por *Mucor circinelloides* UCP 0017 aislado de manglares y estabilidad en condiciones extremas.

Submitted on: 3.5.2026| Accepted on: 3.5.2026
DOI: 10.54899/rpd.v17n1-2585

Palloma Maria Jacinto de Melo
Mestranda em Biotecnologia e Meio ambiente- UNICAP,
E-mail: Palloma.jmelo@gmail.com

Rafael de Souza Mendonça
Estudante de doutorado em Biotecnologia,
E-mail: rafa.13souza@hotmail.com

Salatiel Henrique Pereira de Lima
Estudante de doutorado em Biotecnologia,
E-mail: salatielhenrique@hotmail.com

Dayana Montero Rodríguez
Pós-doutorado em Biotecnologia,
E-mail: dayanamontero87@gmail.com

Galba Maria de Campos-Takaki
Pós-doutorado em Microbiologia e Biotecnologia,
E-mail: galba.takaki@unicap.br

RESUMO

O presente estudo investigou a produção e caracterização físico-química de um biossurfactante sintetizado por Mucor circinelloides UCP 0017, isolado de sedimento de manguezal pernambucano, utilizando milhocina e óleo residual de fritura como substratos alternativos. O microrganismo apresentou elevada capacidade tensoativa, promovendo a redução da tensão superficial de 41,8 para 31,0 mN/m em 96 h de cultivo. O biossurfactante manteve estabilidade em ampla faixa de pH (3–9), altas concentrações salinas (5–25% NaCl) e temperaturas extremas (4–120 °C), demonstrando robustez estrutural. O líquido metabólico livre de células apresentou uma diluição micelar crítica (DMC) de 40% com tensão superficial de 31 mN/m, enquanto o biossurfactante isolado apresentou uma concentração micelar crítica (CMC) de 900 mg/L. A extração

por precipitação com etanol 70% na proporção 1:1 (v/v) apresentou o maior rendimento (10,33 g/L). A caracterização bioquímica indicou um glicolipídeo com 74,22% de lipídios, 18,38% de carboidratos e 7,40% de proteínas e perfil aniônico (potencial Zeta de –23,13 mV). A análise por FTIR indicou a presença de radicais amídicos e de funções sacarídicas, sugerindo natureza glicolipídica. O biossurfactante apresenta potencial biotecnológico para aplicações biomédicas, farmacêuticas e industriais.

Palavras-chave: Tensoativo; Mucorales; Glicolipídio; Termoestável.

ABSTRACT

This study investigated the production and physicochemical characterization of a biosurfactant synthesized by Mucor circinelloides UCP 0017, isolated from mangrove sediment in Pernambuco, using corn steep liquor and waste frying soybean oil as alternative substrates. The microorganism exhibited high surfactant capacity, reducing surface tension from 41.8 to 31.0 mN/m over 96 h of cultivation. The biosurfactant maintained stability across a wide pH range (39), high saline concentrations (5–25% NaCl), and extreme temperatures (4–120 °C), demonstrating structural robustness. The cell-free metabolic liquid presented a critical micelle dilution (CMD) of 40% with a surface tension of 31 mN/m, while the isolated biosurfactant showed a Critical Micelle Concentration (CMC) of 900 mg/L. Extraction by precipitation with 70% ethanol in a 1:1 (v/v) ratio showed the highest yield (10.33 g/L). Biochemical characterization indicated a glycolipid with 74.22% lipids, 18.38% carbohydrates, and 7.40% proteins, with an anionic profile (Zeta potential of –23.13 mV). FTIR analysis indicated the presence of amide groups and saccharide functions, suggesting a glycolipid nature. The results demonstrate the biotechnological potential of the biosurfactant for biomedical, pharmaceutical, and industrial applications.

Keywords: Surfactant; Mucorales; Glycolipid; Thermostable.

RESUMEN

Este estudio investigó la producción y caracterización fisicoquímica de un biosurfactante sintetizado por Mucor circinelloides UCP 0017, aislado de sedimento de manglares en Pernambuco, utilizando licor de maceración de maíz y aceite de fritura residual como sustratos alternativos. El microorganismo mostró una alta capacidad tensoactiva, promoviendo una reducción en la tensión superficial de 41,8 a 31,0 mN/m en 96 h de cultivo. El biosurfactante mantuvo su estabilidad en un amplio rango de pH (3–9), altas concentraciones salinas (525% NaCl) y temperaturas extremas (4–120 °C), demostrando robustez estructural. El líquido metabólico libre de células presentó una dilución micelar crítica (DMC) del 40% con una tensión superficial de 31 mN/m, mientras que el biosurfactante aislado presentó una concentración micelar crítica (CMC) de 900 mg/L. El método de extracción por precipitación con etanol al 70% en una relación 1:1 (v/v) mostró el mayor rendimiento (10,33 g/L). La caracterización bioquímica reveló una composición predominantemente lipídica (74,22%), con fracciones de carbohidratos (18,38%) y proteínas (7,40%), además de un perfil aniónico (potencial zeta de -23,13 mV). El análisis FTIR indicó la presencia de grupos

amida y funciones sacarídicas, lo que sugiere una naturaleza glicolipídica. Los resultados demuestran el potencial biotecnológico del biosurfactante para aplicaciones biomédicas, farmacéuticas e industriales.

Palabras clave: Surfactante; Mucorales; Glicolípido; Termoestable.

INTRODUÇÃO

Os surfactantes químicos são derivados do petróleo, contendo compostos que agridem facilmente o meio ambiente, dificultando sua remoção nos recursos hídricos (Andrade et al., 2018; Helmy et al., 2020; Miao et al., 2024; Silva et al., 2026). Sendo assim, estudos utilizando biossurfactantes de origem microbiológica vem crescendo nos últimos anos para diversas aplicabilidades por serem biodegradáveis e de baixa toxicidade, não agredindo o meio ambiente e nem a saúde humana (Melo et al., 2023; Purwasena et al., 2024; Sharma et al., 2025; Berberov et al., 2026).

A produção do biossurfactante pode ocorrer através das bactérias, leveduras ou dos fungos filamentosos. Segundo Geethanjali et al., (2020) e Marques et al., (2020) a espécie *Mucor circinelloides*, do filo Mucoromycota, ordem Mucorales, apresenta um elevado potencial biotecnológico na produção de biomoléculas de interesse industrial, como os biossurfactantes (Carolin et al., 2024; Datta et al., 2024; Mendonça et al., 2026).

Através das suas diversas propriedades e atividades biológicas, os biossurfactantes são de suma importância para a área biomédica e farmacêutica por meio de formulações de sistemas de liberações de fármacos por conta da sua característica anfifílica, atuando como agentes emulsificantes e solubilizantes, ideais para encapsulação e solubilização de fármacos com baixa solubilidade em água, proporcionando uma melhor absorção e eficácia do medicamento, como também é de grande valia para a formulação de curativos bioativos, contribuindo diretamente no processo de cicatrização, modulando a resposta imune na ferida, auxiliando assim em uma regeneração mais eficaz na cicatrização (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Han *et al.,* 2024; Gaur et al., 2026).

O presente estudo teve como objetivo principal investigar a capacidade de *Mucor circinelloides* UCP 0017 em produzir biossurfactantes utilizando milhocina e óleo de soja residual de fritura como substratos alternativos. Além

disso, buscou-se caracterizar as propriedades físico-químicas e biológicas do biossurfactante produzido, avaliando sua estabilidade em diferentes condições ambientais. A compreensão aprofundada dessas características é fundamental para determinar a viabilidade de aplicação do biossurfactante em processos industriais, biomédicas e farmacêuticas, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais verdes e eficientes, como a formulação de curativos bioativos para a cicatrização de feridas (Shi *et al.,* 2021; Phulpoto *et al.,* 2022; Silva et al., 2026).

METODOLOGIA

Microrganismo

Mucor Circinelloides UCP 0017, fungo filamentoso utilizado no presente estudo, foi isolado de sedimento de mangue do município de Rio Formoso, Pernambuco – PE e mantido no Banco de Culturas do Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e Superfície de Materiais (CEMACBIOS) da Universidade Católica de Pernambuco.

Substratos alternativos

Os substratos selecionados para a produção do biossurfactante foram milhocina, gentilmente cedida pela Corn Products Brasil Ingredientes (Cabo – PE), indústria de beneficiamento do milho, e o óleo de soja residual de fritura proveniente do comércio informal.

Produção do Biossurfactante

Uma alíquota de 5 mL de uma suspensão de esporos contendo 10^7 esporangiósporos/mL de M. circinelloides UCP 0017 foi inoculada em um meio composto por 6% de milhocina e 6% de óleo residual de fritura. As concentrações dos substratos foram definidas de acordo com estudos anteriores (Melo et al., 2023). A cultura submersa foi incubada em duplicata a 28 °C e pH 6,5, sob agitação orbital (150 rpm) por diferentes períodos de tempo para obtenção da curva de crescimento e avaliação da produção de biossurfactante.

Curva de crescimento e Produção do Biossurfactante

Os ensaios foram coletados em duplicatas nos intervalos de 24, 48, 72, 96, 168, 192 horas, sendo filtradas e centrifugadas a 4500 rpm á 9 °C por 15 min, em seguida, os líquidos metabólicos livres de células foram usados para a determinação da tensão superficial, pH, bioemulsificação e rendimento. Para determinação da biomassa por peso seco, após a sua separação do líquido por filtração e centrifugação a 4500 rpm á 9 °C por 15 min, a biomassa foi liofilizada e pesada (Lima *et al.,* 2024).

Tensão Superficial

Após o cultivo, o líquido metabólico livre de células a tensão superficial da amostra foi medida utilizando um tensiômetro Sigma 700 (KSV Instruments LTD-Finlândia) baseado no método do anel DU NÖUY Kuyukina et al., (2001).

Estabilidade do Biossurfactante

A estabilidade do biossurfactante foi avaliada pela medição da tensão superficial utilizando 20 mL do líquido metabólico livre de células, o qual foi submetido a tratamento térmico a 4, 20, 60, 90 e 120 °C por 20 min e, em seguida, resfriado à temperatura ambiente. Para avaliar a influência do pH, o líquido metabólico foi ajustado para pH 3, 5, 7, 9 e 11. Adicionalmente, a estabilidade do biossurfactante foi investigada sob diferentes concentrações de NaCl (5, 10, 15, 20 e 25%) (Marques et al., 2020).

Diluição Micelar Crítica (D.M.C) e Concentração Micelar Crítica (C.M.C)

A tensão superficial da amostra foi medida utilizando um tensiômetro Sigma 700 (KSV Instruments LTD-Finlândia) baseado no método do anel DU NÖUY Kuyukina et al., (2001) tanto para a obtenção da D.M.C, quanto para a C.M.C.

Extração do Biossurfactante

O biossurfactante foi extraído do líquido metabólico livre de células por precipitação com etanol a 70% (1:2, 2:1 e 1:1 v/v), seguindo o método de Bueno et al. (2010), com modificações. O precipitado foi mantido a 4 °C por 24 h e, em seguida, centrifugado a 5000 rpm por 10 min. O etanol foi posteriormente removido por evaporação. O biossurfactante isolado foi então liofilizado e seu rendimento foi determinado gravimetricamente e expresso em g/L.

Caracterização Bioquímica

O teor total de açúcares e proteínas do biossurfactante isolado foi determinado utilizando kits comerciais da Labtest Diagnóstica S.A. (Brasil). Os lipídios totais foram quantificados utilizando clorofórmio e metanol em diferentes proporções (2:1, 1:1 e 1:2, v/v). O extrato orgânico foi evaporado em evaporador rotativo e o teor lipídico foi determinado gravimetricamente (Manocha et al., 1980).

Determinação da Carga Iônica da Molécula

A carga iônica do biossurfactante foi determinada pela medição do potencial zeta por meio da mobilidade eletroforética usando um sistema Zeta-Meter 3.0 (ZetaMeter, Inc., EUA) a 100 volts, escala 1/4 e 22 °C (Bione et al., 2022).

Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

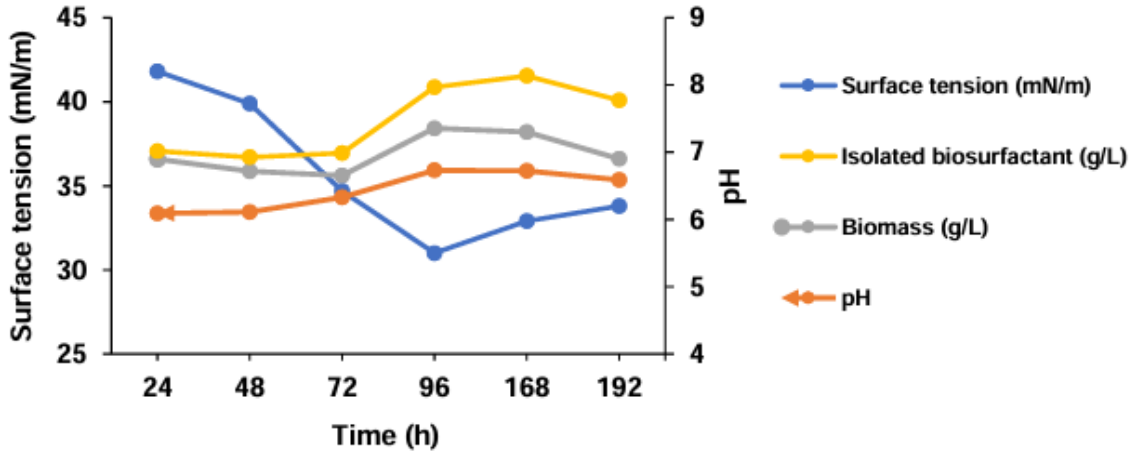
A análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada para identificar os principais grupos funcionais do biossurfactante, utilizando um acessório de reflectância total atenuada (ATR) com um cristal misto de diamante/ZnSe. Os espectros foram registrados utilizando um instrumento Shimadzu IRTracer-100 na faixa de comprimento de onda de 500–4000 cm^{-1} (Maia et al., 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Curva de Crescimento e Produção do Biossurfactante

Os resultados apresentados na Figura 1 demonstram a dinâmica de crescimento de *Mucor circinelloides* UCP 0017 ao longo de 24 a 196 horas de cultivo, bem como sua relação com a produção de biossurfactante. Observou-se que a biomassa, a concentração de biossurfactante e a redução da tensão superficial variaram ao longo do tempo, indicando uma influência direta do estágio fisiológico do microrganismo na síntese do composto. Em relação à correlação entre a concentração de biossurfactante isolado e a tensão superficial, os dados mostram que, à medida que o rendimento aumentou de 0,1162 g/L para 0,6075 g/L, a tensão superficial diminuiu de 41,8 mN/m para 31,0 mN/m, indicando uma redução significativa no sistema. Esse desempenho destaca o alto potencial surfactante do biossurfactante produzido.

Figura 1. Curva de crescimento e produção de biossurfactante por *Mucor circinelloides* UCP 0017, mostrando a variação na biomassa, concentração de biossurfactante isolado, pH e tensão superficial durante 192 horas de cultivo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Observou-se que o pH do meio permaneceu relativamente estável ao longo do período de cultivo, variando de 6,09 a 6,73, indicando condições favoráveis ao crescimento microbiano e a potencial aplicabilidade do biossurfactante em sistemas que operam em uma faixa ligeiramente ácida a neutra. Essa característica amplia suas perspectivas de uso em formulações

cosméticas, produtos de limpeza biodegradáveis e formulações farmacêuticas, incluindo a produção de agentes emulsificantes e sistemas de liberação de fármacos (Phulpoto et al., 2022; Silva et al., 2026).

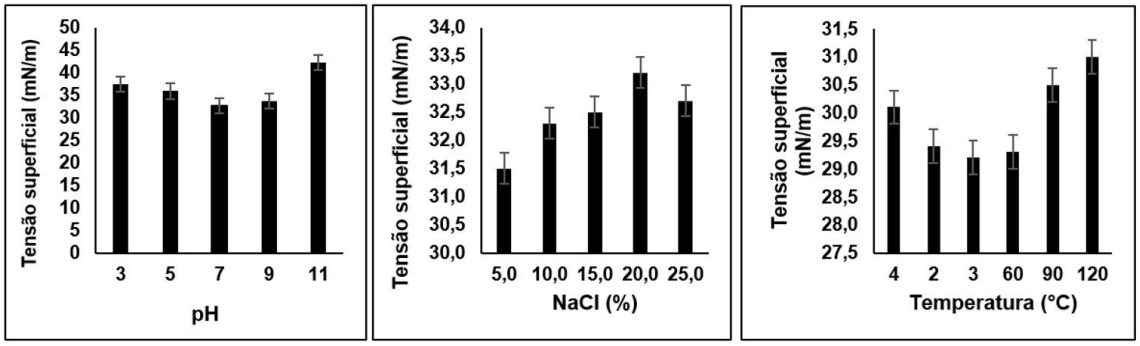
Em contrapartida, a tensão superficial diminuiu progressivamente durante a fermentação, atingindo seu menor valor em 96 h (31,0 mN/m), indicando alta atividade superficial do biossurfactante produzido. De acordo com Shah et al. (2019), espera-se que um microrganismo produtor de biossurfactante reduza a tensão superficial para 40 mN/m ou menos. Portanto, o presente estudo demonstra que *M. circinelloides* UCP 0017 é um produtor eficiente de biossurfactante. Esses resultados são comparáveis aos relatados para outros fungos Mucorales cultivados em resíduos agroindustriais, como *M. hiemalis* (32,0 mN/m) (Ferreira et al., 2020), *M. circinelloides* UCP 0005 (34,0 mN/m) (Santiago et al., 2021) e *Rhizopus arrhizus* UCP 1609 (31,0 mN/m) (Cândido et al., 2022). Após 96 h, observou-se um leve aumento na tensão superficial, possivelmente devido à degradação parcial do biossurfactante ou ao consumo do produto como fonte secundária de carbono durante a fase estacionária do crescimento microbiano.

Por outro lado, a biomassa fúngica atingiu seu valor máximo em 24 h (0,8078 g), seguida por uma diminuição em 48 e 72 h, sugerindo a transição da fase exponencial para a fase estacionária do crescimento microbiano. O biossurfactante isolado, por sua vez, apresentou um aumento contínuo, atingindo seu valor máximo em 192 h (0,8690 g). Esse padrão indica que a produção de biossurfactante não está diretamente associada ao crescimento celular, sugerindo que o composto seja um metabólito secundário, sintetizado predominantemente durante a fase estacionária do metabolismo microbiano.

Atividade tensoativa e estabilidade estrutural do biossurfactante em diferentes condições físico-químicas

A estabilidade da atividade surfactante do biossurfactante, com uma tensão superficial de 31,0 mN/m, foi avaliada sob diferentes condições de pH, salinidade e temperatura para investigar a robustez estrutural do composto, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2. Efeito do pH (A), da concentração de NaCl (B) e da temperatura (C) na tensão superficial do biossurfactante produzido por *M. circinelloides* UCP 0017.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados referentes ao pH mostraram que o biossurfactante manteve atividade eficiente na faixa de 3 a 9, com valores de tensão superficial entre 32,6 e 37,4 mN/m (Figura 2A). Esses achados indicam que a integridade estrutural da molécula é mantida em condições ácidas e próximas da neutralidade. Entretanto, em pH 11, observou-se um aumento significativo na tensão superficial (42,2 mN/m), evidenciando uma perda parcial da atividade surfactante em meios fortemente alcalinos. Esse comportamento pode estar associado à desestabilização dos grupos funcionais ionizáveis da molécula, afetando sua capacidade de organização interfacial.

Consequentemente, a estabilidade entre pH 3 e 9 é particularmente relevante para aplicações biomédicas e farmacêuticas, visto que formulações tópicas, sistemas de liberação de fármacos e curativos bioativos operam em níveis de pH ligeiramente ácidos a neutros. O pH fisiológico da pele (≈4,5–6,0) e o pH de feridas crônicas (geralmente entre 5,5 e 8,0) estão dentro da faixa de estabilidade observada. Isso indica o potencial de uso do biossurfactante como agente emulsificante e modulador de biofilme em curativos avançados (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Gaur et al., 2026).

Em relação à salinidade, os valores de tensão superficial permaneceram quase constantes (31,5–33,2 mN/m) mesmo em altas concentrações de NaCl (5–25%), demonstrando forte tolerância a eletrólitos (Figura 2B). Essa estabilidade indica que a presença de íons não afeta significativamente a estrutura micelar ou a orientação molecular do biossurfactante. Tal característica é muito útil para sistemas com alta força iônica, como formulações de curativos bioativos, sistemas injetáveis e produtos tópicos, visto que fluidos corporais,

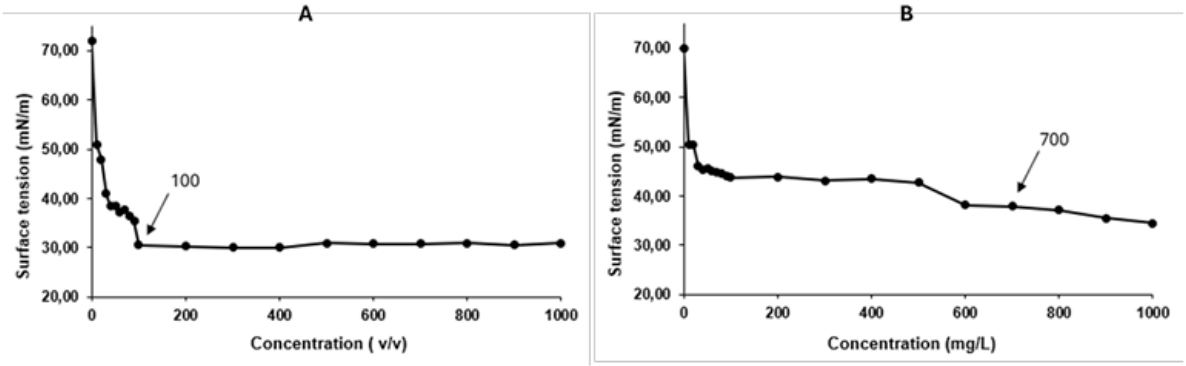
exsudatos de feridas e soluções fisiológicas contêm altos níveis de eletrólitos (Pandit; Meena, 2025; Datta; Bhattacharjee, 2025).

Revista Projeção e Docência v.17 n. 1, e2585, 2026 ISSN 2178-6275 p. 8 A estabilidade térmica foi confirmada pela manutenção da atividade do surfactante em uma ampla faixa de temperatura (4–120 °C), com valores entre 29,2 e 31,0 mN/m (Figura 2C). A preservação da eficiência mesmo sob condições térmicas extremas indica alta resistência estrutural e uma provável natureza molecular robusta. Essa estabilidade térmica é extremamente relevante, pois facilita o armazenamento refrigerado de formulações farmacêuticas e também é favorável para processos industriais, sistemas de limpeza e recuperação avançada de petróleo, onde ocorrem intensas variações térmicas (Datta; Bhattacharjee, 2025; Gaur et al., 2026).

Diluição Micelar Crítica (D.M.C) e Concentração Micelar Crítica (C.M.C)

Os resultados de CMD (A) e CMC (B) (Figura 3) demonstram que o biossurfactante produzido apresenta alta eficiência surfactante, mantendo baixos valores de tensão superficial mesmo após diluições sucessivas e exibindo comportamento micelar característico.

Figura 3. Variação da tensão superficial do biossurfactante em função da concentração: (A) diluição micelar crítica (CMD) do líquido metabólico livre de células (%) e (B) concentração micelar crítica (CMC) do biossurfactante isolado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise CMD (Figura 3A) mostrou que o biossurfactante manteve valores de tensão superficial próximos a 30–31 mN/m até aproximadamente 10%

de diluição, evidenciando uma alta capacidade de manter a atividade surfactante mesmo sob condições de forte diluição. Esse comportamento indica que os compostos tensoativos presentes no líquido metabólico livre de células permanecem ativos mesmo em baixas concentrações, o que é uma característica desejável para aplicações industriais e ambientais onde o produto é frequentemente utilizado em sistemas diluídos. Em diluições abaixo de 9%, observou-se um aumento progressivo na tensão superficial, indicando uma redução gradual na atividade surfactante à medida que o número de moléculas anfipáticas disponíveis na interface diminuía. Contudo, valores abaixo de 40 mN/m foram mantidos até uma diluição de cerca de 4% – um limiar frequentemente associado à presença de biossurfactantes eficientes (Shah et al., 2019) – reforçando o potencial de aplicação do biossurfactante mesmo em baixas concentrações.

A análise da CMC (Figura 3B) mostrou uma redução gradual na tensão superficial com o aumento da concentração do biossurfactante isolado, seguida por uma estabilização em torno de 34 mN/m na concentração de 700 mg/L. Esse comportamento é característico da saturação da interface ar-líquido, onde as moléculas de biossurfactante se organizam preferencialmente na superfície até que o ponto de equilíbrio seja atingido. Após esse ponto, o aumento da concentração não promoveu reduções significativas adicionais na tensão superficial, indicando o estabelecimento da concentração micelar crítica para o sistema estudado, na qual o excesso de moléculas começa a formar micelas no meio líquido em vez de ocupar a interface. Esse padrão confirma o comportamento típico de sistemas contendo biossurfactantes com boa capacidade de redução da tensão superficial.

De modo geral, os resultados indicam alta eficiência do biossurfactante na redução da tensão superficial tanto em condições concentradas quanto diluídas, evidenciando a estabilidade funcional do composto produzido. A capacidade de manter baixos valores de tensão superficial após diluições sucessivas sugere que o biossurfactante exibe propriedades surfactantes consistentes, ampliando seu potencial de aplicação em processos como biorremediação, formulações industriais e sistemas emulsionados. Além disso, a literatura relata que biossurfactantes brutos podem apresentar valores de tensão superficial diferentes daqueles obtidos após purificação, visto que o

método de extração pode influenciar os valores de CMC e a intensidade da redução da tensão superficial (Vieira et al., 2021; Ferreira et al., 2022). Nesse contexto, as diferenças observadas entre os resultados de CMD e CMC podem estar relacionadas à presença de outros metabólitos no líquido metabólico livre de células, que podem atuar sinergicamente com o biossurfactante isolado, contribuindo para a redução observada na tensão superficial.

Extração do Biossurfactante

O biossurfactante foi extraído por precipitação com etanol a 70% em três proporções diferentes de líquido metabólico livre de células para solvente, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Rendimento e eficiência de extração do biossurfactante utilizando precipitação com etanol a 70% em diferentes proporções.

Proporção (Líquido metabólico: Etanol 70%)	**Biossurfactante obtido (g)**	**Rendimento (g/L)**
1:2	3,54	5,90
2:1	5,42	4,52
1:1	9,30	10,33

Fonte: Elaborado pelos autores

.

Como observado, o maior rendimento foi obtido na proporção 1:1 (10,33 g/L), indicando que um equilíbrio ideal entre o volume de solvente e a concentração de biossurfactante aumenta a eficiência da precipitação e a recuperação. Em contrapartida, o excesso de solvente pode aumentar a solubilidade e reduzir a precipitação, enquanto o excesso de líquido metabólico pode limitar a interação efetiva com o solvente, ambos levando a menores taxas de recuperação. Esse comportamento confirma que a precipitação alcoólica é um método eficiente para a recuperação de biossurfactantes e demonstra que o ajuste da proporção solvente/extrato pode aumentar o rendimento do processo.

Caracterização Físico-química do Biossurfactante Isolado

A caracterização bioquímica do biossurfactante produzido por *M. circinelloides* revelou 7,40% de proteínas, 18,38% de carboidratos e 74,22% de

lipídios, indicando que a molécula é predominantemente lipídica. Esse perfil composicional sugere que o biossurfactante pode ser classificado como um composto do tipo glicolipídio, dada a alta fração lipídica associada a um teor relevante de carboidratos.

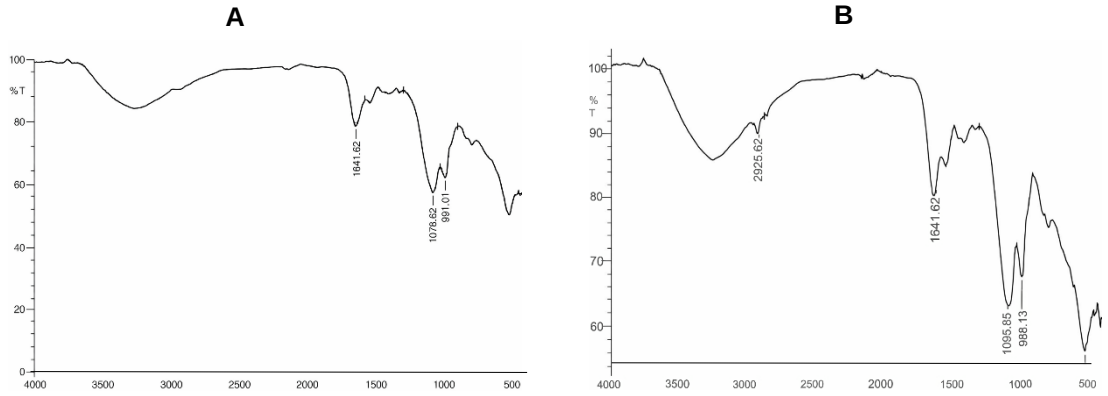
A análise do potencial zeta demonstrou que o biossurfactante apresenta um perfil aniônico, com uma carga superficial média de –23,13 mV (±1,55) a 22 °C. A carga superficial negativa indica boa estabilidade coloidal devido à repulsão eletrostática entre as partículas, uma propriedade desejável para formulações que requerem estabilidade de dispersão (Bione et al., 2022; Chotard et al., 2022).

Essas características ampliam suas aplicações potenciais em formulações biomédicas, especialmente no desenvolvimento de curativos bioativos, sistemas de liberação de fármacos e agentes antimicrobianos, uma vez que a natureza anfifílica e a carga superficial favorecem as interações com membranas biológicas e a estabilidade em sistemas coloidais (Han et al., 2024; Gaur et al., 2026).

Espectroscopia De Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

A Figura 4 apresenta os espectros de FTIR de duas amostras de biossurfactante obtidas utilizando diferentes proporções de extração: 2:1 (A) e 1:2 (B). Esses espectros permitem a identificação dos principais grupos funcionais presentes na biomolécula isolada e possibilitam a comparação das diferenças estruturais decorrentes das condições de extração.

Figura 4. Espectros FTIR do biossurfactante produzido por M. circinelloides, obtidos usando diferentes proporções de extração: 2:1 (A) e 1:2 (B).



Fonte: Elaborado pelos autores.

O espectro FTIR da amostra obtida com a proporção de extração 2:1 (Figura 4A) exibiu uma banda de absorção proeminente em torno de ~2925 cm^{-1}, característica das vibrações de estiramento C–H alifático. Essa banda intensa indica uma maior retenção de cadeias lipídicas, sugerindo um caráter lipofílico mais pronunciado nessa fração do biossurfactante. Tal perfil é consistente com a presença de longas cadeias de hidrocarbonetos tipicamente associadas a estruturas de glicolipídios ou lipopeptídeos.

Em contraste, o espectro da amostra obtida com a proporção de extração 1:2 (Figura 4B) mostrou bandas principais em aproximadamente 1641 cm^{-1}, 1078 cm^{-1} e 991 cm^{-1}. A forte absorção em ~1641 cm^{-1} corresponde às vibrações da amida I. A banda em 12 indica ligações peptídicas e sugere a presença de lipopeptídeos ou material associado a peptídeos. As bandas em 1078 e 991 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramento C–O e C–O–C, típicas de estruturas sacarídicas ou grupos contendo hidroxila, apontando para uma maior contribuição de frações de carboidratos.

A atenuação ou ausência da banda alifática dominante (~2925 cm^{-1}) na amostra B sugere uma composição relativamente mais polar, possivelmente devido ao menor teor de lipídios ou ao enriquecimento seletivo de componentes peptídicos e de carboidratos como resultado das condições de extração. No geral, as diferenças observadas entre os espectros das amostras A e B demonstram que a taxa de extração influencia diretamente o perfil químico do biossurfactante isolado, enfatizando a importância do método de extração na determinação de suas características estruturais e funcionais.

CONCLUSÕES

O fungo Mucor circinelloides UCP 0017 demonstrou alto potencial biotecnológico para a produção de biossurfactantes utilizando substratos alternativos de baixo custo, reforçando a viabilidade de processos sustentáveis. O composto alcançou uma redução significativa na tensão superficial, atingindo

31,0 mN/m, e exibiu estabilidade sob condições extremas de pH, salinidade e temperatura, o que evidencia sua robustez estrutural.

A composição predominantemente lipídica, associada à presença de frações peptídicas e sacarídicas identificadas por FTIR, sugere uma natureza glicolipídica complexa, compatível com seu perfil aniônico e estabilidade coloidal. Essas características expandem significativamente seu potencial de aplicação em formulações biomédicas, sistemas de liberação de fármacos, curativos bioativos e processos industriais que requerem resistência a variações ambientais. Assim, o biossurfactante produzido destaca-se como uma alternativa promissora aos surfactantes sintéticos, combinando desempenho funcional, estabilidade estrutural e sustentabilidade ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FACEPE pela concessão de bolsas de pesquisa a P.M.J.M. (Processo IBPG-1122-3.06/24), S.H.P.L (Processo IBPG-1322-2.00/22) e D.M.R. (Processo BFP-00392.12/23), e à CAPES pela bolsa concedida a R.S.M. (Processo 88887.837208/2023-00). Os autores também agradecem ao CNPq pela concessão de auxílio à pesquisa a G.M.C.T. (Processo nº 312241/2022-4).

REFERÊNCIAS

ANIDU, F.N., UBA, B.O., EZEMBA, C.C., OKOYE, E.L., DOKUBO, C.U. Study on Optimization, Degreasing and Destaining Potentials of Glycophospholipid Biosurfactant Produced by *Bacillus anthracis* S62A. **Dutse Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 9 n. 1, p. 29–43, 2023. DOI: https://doi.org/10.4314/dujopas.v9i1a.4.

ANDRADE, R.F.S., SILVA, T.A.L., RIBEAUX, D.R., et *al*. Promissor Biossurfactante Produzido por *Cunninghamella echinulata* UCP 1299. Utilizando recursos renováveis e sua aplicação no processo de limpeza de tecidos de algodão. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, pág, 1 set. 2, 2018. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/1624573.

BERBEROV, K. et al. Exploring Biosurfactant Production from Halophilic Bacteria, Isolated from Burgas Salterns in Bulgaria. **Marine Drugs**, v. 24, n. 1, p. 53, 22 jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/md24010053

BIONE, A.P., LINS, A.B., RODRÍGUEZ, D.M., SOUZA, A.F., MENDONÇA, R.S., FILHO, H.J.B.L., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Valorization of agro-industrial by-products for

sustainable production of biosurfactant by Syncephalastrum racemosum UCP 1302. **Research, Society and Development**, v. 11 n. 9, e. 58011932372, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32372.

BOUASSIDA, M., FOURATI, N., GHAZALA, I., ELLOUZE-CHAABOUNI, S., GHRIBI, D. Aplicação potencial de biossurfactantes *Bacillus subtilis* SPB1 em formulações de detergente para roupa: Estudo de compatibilidade com ingredientes detergentes e desempenho de lavagem. **Eng. Ciência da Vida**, v. 18, p. 70-77, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/elsc.201700152.

BUENO, S.M., SILVA, A.N., GARCIA-CRUZ, C.H. Study on the production of biosurfactant fermentation broth. **Química Nova.** v. 33, p. 1572-1577, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700026.

CÂNDIDO, T.R.S., MENDONÇA, R.S., LINS, U.M.B.L. et *al*. Produção de biossurfactantes por fungos Mucoralianos isolados de solo do bioma Caatinga utilizando resíduos industriais como substratos renováveis. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, *[S. l.]*, v. 2, pág. e13411225332, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25332.

CAROLIN, F.C,. KAMALESH T. Advances in stabilization of metallic nanoparticle with biosurfactants- a review on current trends. **Heliyon**, v. 10, n. 9, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29773.

COOPER, D.G., GOLDENBERG, B.G. Surface-active agents from two *Bacillus* species. **American Society for Microbiology.** v.52, p. 224-229, 1984. DOI: 10.1128/aem.53.2.224-229.1987.

CHOTARD, M. et al. Biosurfactant-Producing Mucor Strains: Selection, Screening, and Chemical Characterization. **Applied Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 248–259, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010018

DATTA, M., CHATTOPADHYAY, I. Applications of microbial biosurfactants in human health and environmental sustainability: a narrative review**. Discov Med**. v. 1 , n. 160, 2024. DOI: https://doi.org /10.1007/s44337-024-00181-w.

DATTA, D.; BHATTACHARJEE, S. Biosurfactants as novel antibiofilm agents: mechanisms, biomedical applications, and applications in biofilm-associated infections. **Archives of Microbiology**, v. 208, n. 1, p. 6–6, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-025-04555-1

FERREIRA, I.N.S., RODRIGUEZ, D.M., CAMPOS-TAKAKI, G.M., et al. Biosurfactant and bioemulsifier as promising molecules produced by *Mucor hiemalis* isolated from Caatinga soil. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 47, p. 51-58, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.06.006.

FERREIRA, I.N.S; SILVA, P.H, MENDONÇA, R.S; ANDRADE, R.F.S; CAMPOS-TAKAKI, G.M. Production and functional stability of the biourfactant isolated from *Stenotrophomonas maltophilia* UCP 1601. **Research, Society and Development**. v. 11, n. 11, p. e87111132995, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.32995.

GAUR, P. K. et al. Functional Roles of Microbial Biosurfactants in Pharmaceutical Formulation and Targeted Drug Delivery. **Journal of Surfactants and Detergents**, 5

fev. 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/jsde.70030

GEETHANJALI, P.A., GOWTHAM, H.G., JAYASHANKAR, M. Optimization of culture conditions for hyper-production of laccase from an indigenous litter dwelling fungus *Mucor circinelloides* GL1. **Environmental Sustainability**, v.3, p.481–495, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s42398-020-00137-7.

GRBAVČIĆ, S., MARKOVIĆ, D., RAJILIĆ-STOJANOVIĆ, M. *et al.* Development of an Environmentally Acceptable Detergent Formulation for Fatty Soils Based on the Lipase from the Indigenous Extremophile *Pseudomonas aeruginosa* Strain. ***J Surfact Deterg,*** v.18, p.383–395, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s11743-015-1674-x.
HELMY, Q., GUSTIANI, S., MUSTIKAWATI, A.T. Aplicação de biossurfactante ramnolipídico para formulação de biodetergente. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 823 p. 012014, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012014.

KEBBOUCHE-GANA, S., GANA, M.L., KHEMILI, S., FAZOUANE-NAIMI, F., BOUANANE, N.A., PENNINCKX, M., HACENE, H. Isolamento e caracterização de Archaea halofílicos capazes de produzir biossurfactantes. **Journal of Industrial Microbiology and Biotecnologia.** v. 36, p. 727-738. 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s10295-009-0545-8.

KUYUKINA, M. S., IVSHINA, I. B., PHILP, J. C., CHRISTOFI, N., DUNBAR, S. A., RITCHKOVA, M.I. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl tertiary–butyl ether extraction. **Journal Microbiology Methods**, v. 46, p. 149 - 156, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0167-7012(01)00259-7. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167701201002597#preview-section- cited-by.

LAITALA, K., KLEPP, I.G., KETTLEWELL, R., WIEDEMANN,S. Laundry Care Regimes: Do the Practices of Keeping Clothes Clean Have Different Environmental Impacts Based on the Fibre Content? **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7537, 12 set. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12187537.

MAIA, P.C.V.S., RODRÍGUEZ, D.M., SOUZA, A.F., ANDRADE, R.F.S., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Production of biosurfactant by Bacillus subtilis UCP 0999 using cassava wastewater (CWW) and waste frying oil (WFO) as renewable substrates. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e. 17011628805, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28805.

MANOCHA, M. S., SAN-BLAS, G., CENTENO, S. Lipid composition of *Paracoccidioides brasiliensis*: Possible correlation with virulence of different strains. **Microbiology society.** v. 117, 1980. DOI: https://doi.org/10.1099/00221287-117-1-147.

MARQUES, N.S.A.A., SALES DA SILVA, I.G., CAVALCANTI, D.L., et *al*. Eco-Friendly Bioemulsifier Production by *Mucor circinelloides* UCP0001 Isolated from Mangrove Sediments Using Renewable Substrates for Environmental Applications. **Biomolecules**, v.10, n.3, p. 365, 2020. DOI: **https://doi.org/10.3390/biom10030365.**

MELO, P.M.J., MARQUES, N.S.A.A., SOUZA, A.F., ANDRADE, G.R.P., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Estratégia para produção sustentável de biossurfactantes por *mucor circinelloides* UCP0017. **Caderno de ANAIS HOME**, *[S.l.]*, 2023. DOI: https://doi.org/10.56238/sevenIIImulti2023-267.

MENDONÇA, R. DE S. et al. A promising lipopeptide production and application as biostimulant for seeds germinations. **Projeção e docência**, v. 17, n. 1, p. e2544, 28 jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.54899/rpd.v17n1-2544

MIAO, Y., TO, M.H., SIDDIQUI, M.A., WANG, H., LODENS, S., CHOPRA, S.S., KAUR, G., ROELANTS, S.L.K.W., LIN, C.S.K. Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock—recent advances, process optimization and perspectives. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, 2024. DOI: 10.3389/fchem.2024.1327113.

MORIKAWA, M., DAIDO, H., TAKAO, T., MURATA, S., SHIMONISHI, Y., IMANAKA, T. A new lipopeptide biosurfactant produced by *Arthrobacter* sp. strain MIS38. **Journal of Bacteriology.** v. 175, p. 6459-6466, 1993. DOI: https://doi.org/10.1128/jb.175.20.6459-6466.1993.

PANDIT, N. K.; MEENA, S. S. Exploring Sustainable Biosurfactant Production Through Waste Valorization: Emerging Research Trends and Industrial Applications. **Waste and Biomass Valorization**, 20 jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-025-03169-4

PARASKA, O., SYNYUK, O., RADEK, N., ZOLOTENKO, E., MYKHAYLOVSKIY, Y. Usage of biosurfactants as environmental friendly detergents for textile products cleaning. **Fibres and Textiles**, v. 30, n. 5, p. 42–51, 2023. DOI: 10.15240/tul/008/2023-5-005.

PURWASENA, I.A., AMANIYAH, M., ASTUTI, D.I., FIRMANSYAH, Y., SUGAI, Y. Production, characterization, and application of Pseudoxanthomonas taiwanensis biosurfactant: a green chemical for microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Scientific Reports.** v. 14, p. 10270, 2024. DOI: https://doi.org.1038/s41598-024-61096-1

RULLI, M.M., ALVAREZ, A., FUENTES, M.S., COLIN, V.L. Production of a microbial emulsifier with biotechnological potential for environmental applications. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 174, p. 459-466, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.11.052.

SANTIAGO, M.G., LINS, U.M.B.L., CAMPOS-TAKAKI, G.M., FILHO, L.O.C., ANDRADE, R.F.S. Produção de biossurfactante por *Mucor circinelloides* UCP 0005 utilizando novo meio de cultura formulado com casca de jatobá (*Hymenaea courbaril L.*) e milhocina. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v.7, n.5, p.51292-51304, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30166.

SILVA, R.R., CALDAS, M.C.F., LIMA, C.V.A., MEIRA, H.M., SARUBBO, L.A., LUNA, J.M. Production, Characterization and Application of Biosurfactant for Cleaning Cotton Fabric and Removing Oil from Contaminated Sand. **Processes**, v. 12, n. 11, p. 2584, 18 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12112584.

SILVA, R. R. DA et al. Biosurfactants in Food: Advances, Innovative Applications and Functional Perspectives. **Foods**, v. 15, n. 3, p. 508, 1 fev. 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/foods15030508

SOUZA, C.V.M., TORRES JARA, A.M.A., BEZERRA, K.G.O., et *al*. Produção do Biossurfactante *Candida Guilliermondii* e Aplicação na Formulação de Detergente

Natural. **Transações de Engenharia Química.** v. 100, p. 85-90, 2023. DOI: https://doi.org/10.3303/CET23100015.

SHAH, M.U.H., MONIRUZZAMAN, M., SIVAPRAGASAM, M., et al. A binary mixture of a biosurfactant and an ionic liquid surfactant as a green dispersant for oil spill remediation.
Journal of Molecular Liquids. v. 280, p. 111-119, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.049.

SHARMA, N., AHLAWAT, Y.K., SHARMA, A.J., CHAMOLI, N., THAKUR, M., SHARMA, A., MEHMOOD, S., MALIK, A., AHMED, M., PUNIA, H., CHOUBEY, S. A comprehensive review on microbial production and significant applications of multifunctional biomolecules: biosurfactants. **Biodegradation**, v. 36, n. 2, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10532-025-10121-9.

TIQUIA, S.M., TAM, N.F.Y., HODKISS, I.J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. **Environmental Pollution.** v. 93, p. 249-256, 1996. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00052-8.

VIEIRA, I. M. M., SANTOS, B. L. P., RUZENE, D. S., & SILVA, D. P. An overview of current research and developments in biosurfactants**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,*** *v. 100*, p. 1-18, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.017.

CAPÍTULO III

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

870260024333
16/03/2026 16:15
29409162353030803

Pedido nacional de invenção; Pedido nacional de modelo de utilidade; Pedido nacional de certificado de adição de invenção; e Entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2026 006208 1

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica
CPF/CNPJ: 10847721000195
Nacionalidade: Brasileira
Endereço: Rua do Príncipe, 526 - Boa Vista
Cidade: Recife
Estado: PE
CEP: 50050-900
País: Brasil
Telefone: 81 21194088
Fax:
Email: nit@unicap.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO BIOCOMPÓSITO COM AÇÃO CICATRIZANTE A PARTIR DE QUITOSANA, EXTRATO VEGETAL E BIOSSURFACTANTE

Resumo: A presente invenção refere-se ao processo inovador de preparação e obtenção de biocompósito com ação cicatrizante com o uso de produtos naturais, como quitosana(1) com elevado grau de desacetilação (acima de 90%), extratos de Basella alba(2) considerada como PANC (Planta Alimentícia Não Convencional) e biossurfactante (3). A quitosana obtida da Patente BR 10 20 40133196 foi purificada e transformada em quitosana coloidal. Extratos de Basella alba preparados com folhas e caules jovens, liofilizados, pulverizados submetidos a extração aquosa assistida por micro-ondas. A composição fitoquímica de Basella alba indicou compostos fenóis, flavonoides, carotenoides, vitaminas, minerais, aminoácidos e atividade antioxidante. Destaca-se atividade antimicrobiana da quitosana coloidal contra micro-organismos patogênicos. A combinação das soluções quitosana (E1), extratos de Basella alba (E2) ricos em biomoléculas ativas e mucilagem, o biossurfactante de natureza glicolipídica (E3) favorece a formação do biocompósito como agente de superfície melhorando a compatibilidade entre os componentes, na dispersão e estabilização da estrutura final do produto na forma de hidrogel(h), reforçando o perfil seguro e inovador para aplicações farmacêuticas. O biocompósito apresenta potencial de uso como hidrogel(h) na forma de curativo oclusivo ou semi-oclusivo, contra micro-organismos patogênicos, possibilitando a hidratação tecidual estimulando a angiogênese e acelerando o processo de cicatrização.

Figura a publicar: 1

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 4

Nome: GALBA MARIA DE CAMPOS TAKAKI
CPF: 00250155400
Nacionalidade: Brasileira
Qualificação Física: Professor do ensino superior
Endereço: Rua Guerra de Holanda 161, apto.201- Poço
Cidade: Recife
Estado: PE
CEP: 52061-015
País: BRASIL
Telefone: (81) 988 574447
Fax:
Email: galba.takaki@unicap.br

Inventor 2 de 4

Nome: PALLOMA MARIA JACINTO DE MELO
CPF: 12307594418
Nacionalidade: Brasileira
Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação
Endereço: Rua Mozart Siqueira, 75 – UR 02, Ibura
Cidade: Recife
Estado: PE
CEP: 51345-101
País: BRASIL
Telefone: (81) 998 168906
Fax:
Email:

Inventor 3 de 4

Nome: ADRIANA FERREIRA DE SOUZA

CPF: 07038292463

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Biólogo, biomédico e afins

Endereço: Rua Frei Teófilo de Virgolleta, 282- Zumbi

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 50720-660

País: BRASIL

Telefone: (81) 996 818796

Fax:

Email:

Inventor 4 de 4

Nome: JOSIMAR GURGEL FERNANDES

CPF: 04347442475

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Agrônomo e afins

Endereço: Rua Dona Inês Correia de Araújo, 156 AP 907 bl A, Caxangá

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 50800-220

País: BRASIL

Telefone: (81) 996 550505

Fax:

Email:

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho confirma o elevado potencial biotecnológico do *Mucor circinelloides* UCP0017 para a produção sustentável de biossurfactantes, utilizando substratos alternativos de baixo custo. Os resultados experimentais confirmaram a robustez estrutural e o desempenho funcional do biossurfactante, na redução da tensão superficial e por sua capacidade de se manter estável a variáveis de pHs, como também a sua estabilidade em meio a altas concentrações de salinidade e por se manter regular em diferentes temperaturas, facilitando sua produção tanto por seu alto nível de estabilidade, como por possuir uma ótima constância na sua diluição, como também sua natureza glicolipídica/lipopeptídica do biossurfactante, seu perfil aniônico e estabilidade coloidal ampliam suas aplicações em formulações biomédicas e sistemas de liberação de fármacos.

Como perspectiva futura, propõe-se a criação de biocompósito, onde a integração dos extratos do caule de *Basella alba* pode promover um efeito sinérgico, no qual os compostos fenólicos, flavonoides e proteínas presentes nos extratos vegetais atuariam na modulação do processo inflamatório, na redução do estresse oxidativo e no estímulo à regeneração tecidual, com o biossurfactante aniônico produzido pelo *Mucor circinelloides* desempenharia papel emulsificante auxiliando a solubilização da quitosana, que possui uma alta capacidade de ação antimicrobiana reduzindo riscos de infecção e acelerando o reparo tecidual, além de representar uma alternativa sustentável aos produtos sintéticos convencionais, ampliando as possibilidades de forma promissora a aplicação de cicatrizações de feridas.

ANEXOS

ANEXO I

Biosurfactant produced by *Mucor circinelloides* UCP 0017 isolated from mangrove and stability under extreme conditions

Biossurfactante produzido por *Mucor circinelloides* UCP 0017 isolado de manguezal e estabilidade em condições extremas

Biosurfactante producido por *Mucor circinelloides* UCP 0017 aislado de manglares y estabilidad en condiciones extremas

Submitted on: 3.5.2026| Accepted on: 3.5.2026
DOI: 10.54899/rpd.v17n1-2585

Palloma Maria Jacinto de Melo
Master's student in Environmental Process Development,
E-mail: palloma.jmelo@gmail.com

Rafael de Souza Mendonça
PhD student in Biotechnology, E-mail: rafa.13souza@hotmail.com

Salatiel Henrique Pereira de Lima
PhD student in Biotechnology, E-mail: salatielhenrique@hotmail.com

Dayana Montero Rodríguez
Post PhD in Biotechnology, E-mail: dayanamontero87@gmail.com

Galba Maria de Campos-Takaki
Post PhD in Microbiology and Biotechnology, E-mail: galba.takaki@unicap.br

ABSTRACT
This study investigated the production and physicochemical characterization of a biosurfactant synthesized by *Mucor circinelloides* UCP 0017, isolated from mangrove sediment in Pernambuco, using corn steep liquor and waste frying soybean oil as alternative substrates. The microorganism exhibited high surfactant capacity, reducing surface tension from 41.8 to 31.0 mN/m over 96 h of cultivation. The biosurfactant maintained stability across a wide pH range (3–9), high saline concentrations (5–25% NaCl), and extreme temperatures (4–120 °C), demonstrating structural robustness. The cell-free metabolic liquid presented a critical micelle dilution (CMD) of 40% with a surface tension of 31 mN/m, while the isolated biosurfactant showed a Critical Micelle Concentration (CMC) of 900 mg/L. Extraction by precipitation with 70% ethanol in a 1:1 (v/v) ratio showed the highest yield (10.33 g/L). Biochemical characterization indicated a glycolipid with 74.22% lipids, 18.38% carbohydrates, and 7.40% proteins, with an anionic profile (Zeta potential of –23.13 mV). FTIR analysis indicated the presence of amide groups and saccharide functions, suggesting a glycolipid nature. The results demonstrate the biotechnological potential of the biosurfactant for biomedical, pharmaceutical, and industrial applications.

Keywords: Surfactant; Mucorales; Glycolipid; Thermostable.

RESUMO
O presente estudo investigou a produção e caracterização físico-química de um biossurfactante sintetizado por *Mucor circinelloides* UCP 0017, isolado de sedimento de manguezal pernambucano, utilizando milhocina e óleo residual de fritura como substratos alternativos. O microrganismo apresentou elevada capacidade tensoativa, promovendo a redução da tensão superficial de 41,8 para 31,0 mN/m em 96 h de cultivo. O biossurfactante manteve estabilidade em ampla faixa de pH (3–9), altas concentrações salinas (5–25% NaCl) e temperaturas extremas (4–120 °C), demonstrando robustez estrutural. O líquido metabólico livre de células apresentou uma diluição micelar crítica (DMC) de 40% com tensão superficial de 31 mN/m, enquanto o biossurfactante isolado apresentou uma concentração micelar crítica (CMC) de 900 mg/L. A extração por precipitação com etanol 70% na proporção 1:1 (v/v) apresentou o maior rendimento (10,33 g/L). A caracterização bioquímica indicou um glicolipídeo com 74,22% de lipídios, 18,38% de carboidratos e 7,40% de proteínas e perfil aniônico (potencial Zeta de –23,13 mV). A análise por FTIR indicou a presença de radicais amídicos e de funções sacarídicas, sugerindo natureza glicolipídica. O biossurfactante apresenta potencial biotecnológico para aplicações biomédicas, farmacêuticas e industriais.

Palavras-chave: Tensoativo; Mucorales; Glicolipídio; Termoestável,

RESUMEN
Este estudio investigó la producción y caracterización fisicoquímica de un biosurfactante sintetizado por *Mucor circinelloides* UCP 0017, aislado de sedimento de manglares en Pernambuco, utilizando licor de maceración de maíz y aceite de fritura residual como sustratos alternativos. El microorganismo mostró una alta capacidad tensoactiva, promoviendo una reducción en la tensión superficial de 41,8 a 31,0 mN/m en 96 h de cultivo. El biosurfactante mantuvo su estabilidad en un amplio rango de pH (3–9), altas concentraciones salinas (5–25% NaCl) y temperaturas extremas (4–120 °C), demostrando robustez estructural. El líquido metabólico libre de células presentó una dilución micelar crítica (DMC) del 40% con una tensión superficial de 31 mN/m, mientras que el biosurfactante aislado presentó una concentración micelar crítica (CMC) de 900 mg/L. El método de extracción por precipitación con etanol al 70% en una relación 1:1 (v/v) mostró el mayor rendimiento (10,33 g/L). La caracterización bioquímica reveló una composición predominantemente lipídica (74,22%), con fracciones de carbohidratos (18,38%) y proteínas (7,40%), además de un perfil aniónico (potencial zeta de -23,13 mV). El análisis FTIR indicó la presencia de grupos amida y funciones sacarídicas, lo que sugiere una naturaleza glicolipídica. Los resultados demuestran el potencial biotecnológico del biosurfactante para aplicaciones biomédicas, farmacéuticas e industriales.

Palabras clave: Surfactante; Mucorales; Glicolípido; Termoestable.

INTRODUCTION

Chemical surfactants are petroleum-derived compounds that readily harm the environment, making them difficult to remove from water resources (Andrade et al., 2018; Helmy et al., 2020; Miao et al., 2024; Silva et al., 2026). Therefore, studies on microbial biosurfactants have increased in recent years for various applications because they are biodegradable and low-toxic, without harming the environment or human health (Melo et al., 2023; Purwasena et al., 2024; Sharma et al., 2025; Berberov et al., 2026).

Biosurfactants can be produced by bacteria, yeasts, or filamentous fungi. According to Geethanjali et al. (2020) and Marques et al. (2020), the species *Mucor circinelloides*, from the phylum Mucoromycota, order Mucorales, has a high biotechnological potential in the production of biomolecules of industrial interest, such as biosurfactants (Carolin et al., 2024; Datta et al., 2024; Mendonça et al., 2026).

Owing to their diverse properties and biological activities, biosurfactants are of paramount importance in the biomedical and pharmaceutical fields, particularly for drug delivery system formulation. Due to their amphiphilic nature, they act as emulsifying and solubilizing agents, making them ideal for encapsulating and solubilizing drugs with low water solubility, thereby enhancing absorption and drug efficacy. Furthermore, they are highly valuable for the formulation of bioactive dressings, directly contributing to the healing process by modulating the immune response at the wound site and facilitating more effective regeneration during cicatrization (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Han et al., 2024; Gaur et al., 2026).

METHODOLOGY

Microorganism

Mucor circinelloides UCP 0017, a filamentous fungus used in the present study, was isolated from mangrove sediment in the municipality of Rio Formoso, Pernambuco – PE, and is maintained in the Culture Collection of the Multiuser Center for Analysis and Characterization of Biomolecules and Material Surfaces (CEMACBIOS) at the Catholic University of Pernambuco.

Alternative Substrates

The substrates selected for biosurfactant production were corn steep liquor (CSL), kindly provided by Corn Products Brasil Ingredientes (Cabo de Santo Agostino – PE), a corn processing industry, and waste frying soybean oil (WFSO) obtained from informal commerce.

Biosurfactant Production

A 5 mL aliquot of a spore suspension containing 10^7 sporangiospores/mL of *M. circinelloides* UCP 0017 was inoculated into a medium composed of 6% CSL and 6% WFSO. The substrate concentrations were defined according to previous studies (Melo et al., 2023). The submerged culture was incubated in duplicate at 28 °C and pH 6.5, under orbital agitation (150 rpm) for varying time periods to obtain the growth curve and evaluate biosurfactant production.

Growth Curve and Biosurfactant Production

Samples were collected in duplicate at 24, 48, 72, 96, 168, and 192 h. They were subsequently subjected to filtration and centrifugation at 4500 rpm, at 9 °C, for 15 min. The cell-free metabolic liquids were used to determine pH, surface tension, emulsification index, and biosurfactant yield. For biomass determination by dry weight, after separation from the liquid by filtration and centrifugation under the same conditions (4500 rpm, 9 °C, 15 min), the biomass was lyophilized and subsequently weighed (Lima *et al*., 2024).

Surface Tension

The surface tension of the cell-free metabolic liquid was determined using a Sigma 700 tensiometer (KSV Instruments LTD, Finland), based on the Du Noüy ring method, as described by Kuyukina et al. (2001).

Stability Test

The stability of the biosurfactant was evaluated by measuring surface tension using 20 mL of the cell-free metabolic liquid, which was subjected to thermal treatment at 4, 20, 60, 90, and 120 °C for 20 min, then cooled to room temperature. To assess the influence of pH, the metabolic liquid was adjusted to

pH 3, 5, 7, 9, and 11. Additionally, biosurfactant stability was investigated under varying NaCl concentrations (5, 10, 15, 20, and 25%) (Marques *et al.,* 2020).

Critical Micelle Dilution (CMD) and Critical Micelle Concentration (CMC)

The surface tension of the samples was measured using a Sigma 700 tensiometer (KSV Instruments LTD, Finland) based on the Du Noüy ring method (Kuyukina et al., 2001) to determine both the CMD and the CMC.

Biosurfactant Recovery

The biosurfactant was extracted from the cell-free metabolic liquid by precipitation with 70% ethanol (1:2, 2:1, and 1:1 *v/v*), following the method of Bueno et al. (2010), with modifications. The precipitate was allowed to stand at 4 °C for 24 h, then centrifuged at 5000 rpm for 10 min. The ethanol was subsequently removed by evaporation. The isolated biosurfactant was then lyophilized, and its yield was determined gravimetrically and expressed in g/L.

Biochemical Characterization

The total sugar and protein contents of the isolated biosurfactant were determined using commercial kits from Labtest Diagnóstica S.A. (Brazil). Total lipids were quantified using chloroform and methanol at different ratios (2:1, 1:1, and 1:2, *v/v*). The organic extract was evaporated using a rotary evaporator, and the lipid content was determined gravimetrically (Manocha *et al.,* 1980).

Determination of Ionic Charge

The ionic charge of the biosurfactant was determined by measuring the zeta potential via electrophoretic mobility using a Zeta-Meter System 3.0 (Zeta-Meter, Inc., USA) at 100 volts, 1/4 scale, and 22 °C (Bione *et al.,* 2022).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis was performed to identify the main functional groups of the biosurfactant, using an attenuated total reflectance (ATR) accessory with a diamond/ZnSe mixed crystal. The spectra were recorded using a Shimadzu IRTracer-100 instrument over the wavelength

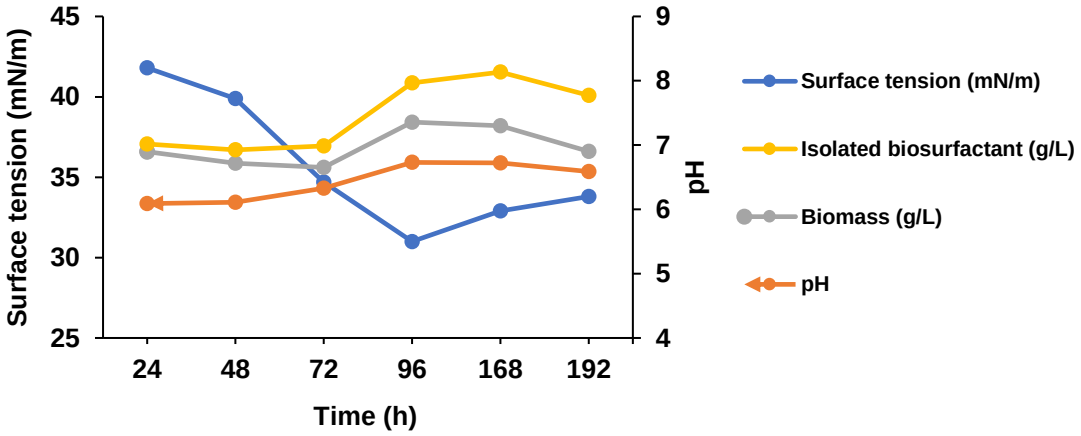
range of 500–4000 cm^{-1} (Maia *et al.,* 2022).

RESULTS AND DISCUSSION

Growth Curve and Biosurfactant Production

The results presented in Figure 1 demonstrate the growth dynamics of *Mucor circinelloides* UCP 0017 throughout 24 to 196 hours of cultivation, as well as its relationship with biosurfactant production. It was observed that biomass, biosurfactant concentration, and surface tension reduction varied over time, indicating a direct influence of the microorganism's physiological stage on compound synthesis. Regarding the correlation between isolated biosurfactant concentration and surface tension, the data show that as the yield increased from 0.1162 g/L to 0.6075 g/L, the surface tension decreased from 41.8 mN/m to 31.0 mN/m, indicating a significant reduction in the system. This performance highlights the high surfactant potential of the produced biosurfactant.

Figure 1. Growth curve and biosurfactant production by *Mucor circinelloides* UCP 0017, showing the variation in biomass, isolated biosurfactant concentration, pH, and surface tension during 192 hours of cultivation.



Source: Authors.

It is observed that the pH of the medium remained relatively stable throughout the cultivation period, ranging from 6.09 to 6.73, indicating favorable conditions for microbial growth and the potential applicability of the biosurfactant in systems operating within a slightly acidic to neutral range. This characteristic expands its prospects for use in cosmetic formulations, biodegradable cleaning products, and pharmaceutical formulations, including the production of

emulsifying agents and drug delivery systems (Phulpoto et al., 2022; Silva et al., 2026).

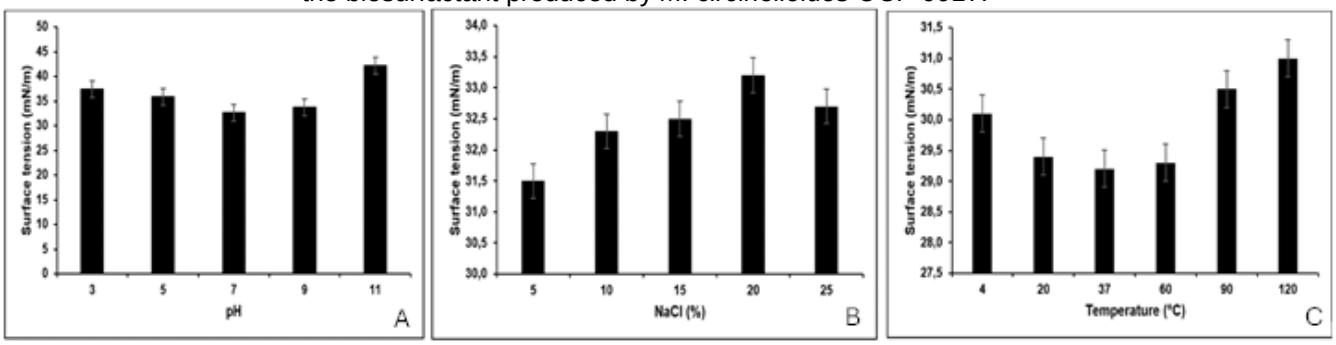
In contrast, surface tension decreased progressively during fermentation, reaching its lowest value at 96 h (31.0 mN/m), indicating high surface activity of the produced biosurfactant. According to Shah et al. (2019), a biosurfactant-producing microorganism is expected to reduce surface tension to 40 mN/m or lower. Therefore, the present study demonstrates that *M. circinelloides* UCP 0017 is an efficient biosurfactant producer. These results are comparable to those reported for other Mucorales fungi cultivated on agro-industrial waste, such as *M. hiemalis* (32.0 mN/m) (Ferreira et al., 2020), *M. circinelloides* UCP 0005 (34.0 mN/m) (Santiago et al., 2021), and *Rhizopus arrhizus* UCP 1609 (31.0 mN/m) (Cândido et al., 2022). After 96 h, a slight increase in surface tension was observed, possibly due to partial biosurfactant degradation or to product consumption as a secondary carbon source during the stationary phase of microbial growth.

On the other hand, fungal biomass reached its highest value at 24 h (0.8078 g), followed by a decrease at 48 and 72 h, suggesting the transition from the exponential phase to the stationary phase of microbial growth. The isolated biosurfactant, in turn, showed a continuous increase, reaching its maximum value at 192 h (0.8690 g). This pattern indicates that biosurfactant production is not directly associated with cell growth, suggesting that the compound is a secondary metabolite, predominantly synthesized during the stationary phase of microbial metabolism.

Surfactant Activity and Structural Stability of the Biosurfactant Under Different Physicochemical Conditions

The stability of the biosurfactant's surfactant activity, with a surface tension of 31.0 mN/m, was evaluated under different pH, salinity, and temperature conditions to investigate the compound's structural robustness, as shown in Figure 2.

Figure 2. Effect of pH (A), NaCl concentration (B), and temperature (C) on the surface tension of the biosurfactant produced by *M. circinelloides* UCP 0017.



Source: Authors.

The results regarding pH showed that the biosurfactant maintained efficient activity over the range 3 to 9, with surface tension values between 32.6 and 37.4 mN/m (Figure 2A). These findings indicate that the molecule's structural integrity is maintained under acidic and near-neutral conditions. However, at pH 11, a significant increase in surface tension (42.2 mN/m) was observed, evidencing a partial loss of surfactant activity in strongly alkaline media. This behavior may be associated with the destabilization of the molecule's ionizable functional groups, affecting its interfacial organization capacity.

Consequently, the stability between pH 3 and 9 is particularly relevant for biomedical and pharmaceutical applications, as topical formulations, drug delivery systems, and bioactive dressings operate under slightly acidic to neutral pH levels. The physiological skin pH (≈4.5–6.0) and the pH of chronic wounds (generally between 5.5 and 8.0) are within the observed stability range. This indicates the biosurfactant's potential use as an emulsifying agent and biofilm modulator in advanced dressings (Alara; Alara; Abdurahman, 2023; Gaur et al., 2026).

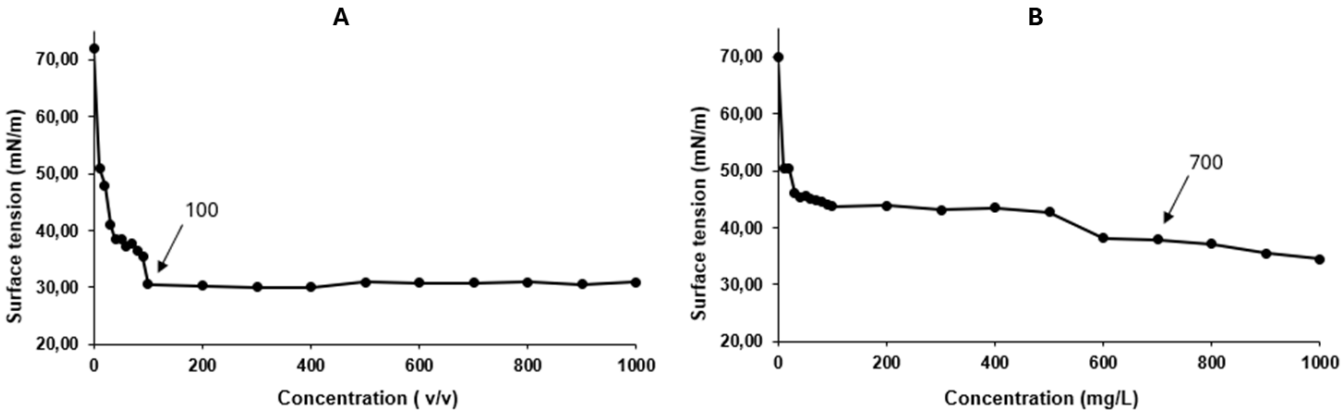
Regarding salinity, the surface tension values stayed nearly constant (31.5–33.2 mN/m) even at high NaCl concentrations (5–25%), showing a strong tolerance to electrolytes (Figure 2B). This stability indicates that the presence of ions does not significantly affect the micellar structure or the molecular orientation of the biosurfactant. Such a trait is very useful for systems with high ionic strength, like bioactive dressing formulations, injectable systems, and topical products, since body fluids, wound exudates, and physiological solutions contain high levels of electrolytes (Pandit; Meena, 2025; Datta; Bhattacharjee, 2025).

Thermal stability was confirmed by the maintenance of surfactant activity across a wide temperature range (4–120 °C), with values between 29.2 and 31.0 mN/m (Figure 2C). The preservation of efficiency even under extreme thermal conditions indicates high structural resistance and a likely robust molecular nature. This thermal stability is extremely relevant, as it facilitates the refrigerated storage of pharmaceutical formulations and is also favorable for industrial processes, cleaning systems, and advanced oil recovery, where intense thermal variations occur (Datta; Bhattacharjee, 2025; Gaur et al., 2026).

Critical Micelle Dilution (CMD) and Critical Micelle Concentration (CMC)

The CMD (A) and CMC (B) results (Figure 3) demonstrate that the produced biosurfactant exhibits high surfactant efficiency, maintaining low surface tension values even after successive dilutions and displaying characteristic micellar behavior.

Figure 3. Variation of biosurfactant surface tension as a function of concentration: (A) critical micelle dilution (CMD) of the cell-free metabolic liquid (%) and (B) critical micelle concentration (CMC) of the isolated biosurfactant.



Source: Authors.

The CMD analysis (Figure 3A) showed that the biosurfactant maintained surface tension values near 30–31 mN/m up to approximately 10% dilution, evidencing a high capacity to maintain surfactant activity even under strong dilution conditions. This behavior indicates that the surface-active compounds present in the cell-free metabolic liquid remain active even at low concentrations, which is a desirable characteristic for industrial and environmental applications where the product is frequently used in diluted systems. At dilutions below 9%, a

progressive increase in surface tension was observed, indicating a gradual reduction in surfactant activity as the number of amphiphilic molecules available at the interface decreased. Nevertheless, values below 40 mN/m were maintained up to about 4% dilution - a threshold frequently associated with the presence of efficient biosurfactants (Shah et al., 2019) - reinforcing the application potential of the biosurfactant even at low concentrations.

The CMC analysis (Figure 3B) showed a gradual reduction in surface tension as the concentration of the isolated biosurfactant increased, followed by stabilization around 34 mN/m at the 700mg/L concentration. This behavior is characteristic of air-liquid interface saturation, where biosurfactant molecules preferentially organize at the surface until the equilibrium point is reached. Beyond this point, increasing the concentration did not promote further significant reductions in surface tension, indicating the establishment of the critical micelle concentration for the studied system, at which excess molecules begin to form micelles in the liquid medium rather than occupying the interface. This pattern confirms the typical behavior of systems containing biosurfactants with good surface tension reduction capacity.

In general, the results indicate high efficiency of the biosurfactant in reducing surface tension in both concentrated and diluted conditions, evidencing the functional stability of the produced compound. The ability to maintain low surface tension values after successive dilutions suggests that the biosurfactant exhibits consistent surfactant properties, expanding its potential applications in processes such as bioremediation, industrial formulations, and emulsified systems. Furthermore, literature reports that crude biosurfactants may exhibit surface tension values different from those obtained after purification, as the extraction method can influence CMC values and the intensity of surface tension reduction (Vieira et al., 2021; Ferreira et al., 2022). In this context, the differences observed between the CMD and CMC results may be related to the presence of other metabolites in the cell-free metabolic liquid, which may act synergistically with the isolated biosurfactant, contributing to the observed reduction in surface tension.

Biosurfactant Recovery

The biosurfactant was extracted by precipitation with 70% ethanol at three different ratios of cell-free metabolic liquid to solvent, as shown in Table 2.

Table 2. Yield and extraction efficiency of the biosurfactant using 70% ethanol precipitation at different ratios.

Ratio (cell-free metabolic liquid: 70% ethanol) (v/v)	Isolated biosurfactant (g)	Yield (g/L)
1:2	3.54	5.90
2:1	5.42	4.52
1:1	9.30	10.33

Source: Authors.

.

As observed, the highest yield was obtained at the 1:1 ratio (10.33 g/L), indicating that an optimal balance between solvent volume and biosurfactant concentration enhances precipitation efficiency and recovery. In contrast, excess solvent may increase solubility and reduce precipitation, while excess metabolic liquid may limit effective interaction with the solvent, both of which lead to lower recovery rates. This behavior confirms that alcoholic precipitation is an efficient method for biosurfactant recovery and demonstrates that adjusting the solvent-to-extract ratio can increase the process yield.

Physicochemical Characterization of the Isolated Biosurfactant

The biochemical characterization of the biosurfactant produced by *M. circinelloides* revealed 7.40% proteins, 18.38% carbohydrates, and 74.22% lipids, indicating that the molecule is predominantly lipidic in nature. This compositional profile suggests that the biosurfactant may be classified as a glycolipid-type compound, given the high lipid fraction associated with a relevant carbohydrate content.

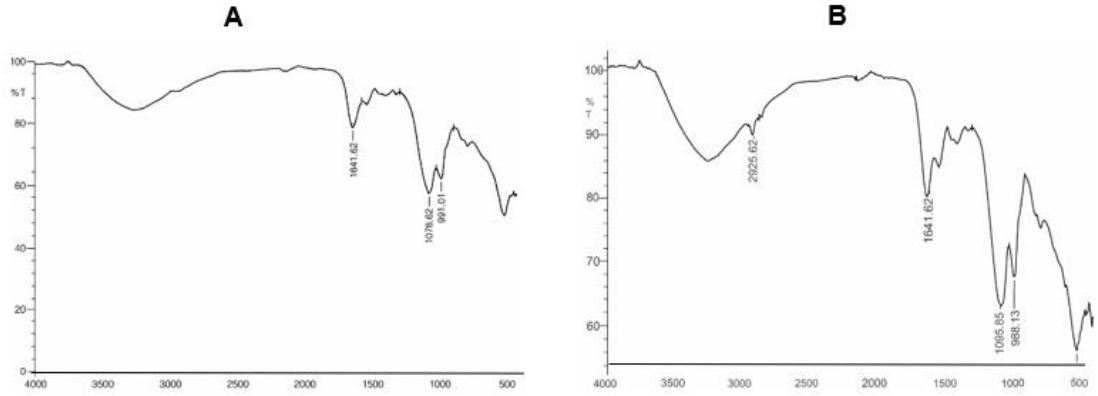
Zeta potential analysis demonstrated that the biosurfactant exhibits an anionic profile, with a mean surface charge of –23.13 mV (±1.55) at 22 °C. The negative surface charge indicates good colloidal stability due to electrostatic repulsion between particles, which is a desirable property for formulations requiring dispersion stability (Bione et al., 2022; Chotard et al., 2022).

These characteristics expand its potential applications in biomedical formulations, especially in the development of bioactive dressings, drug delivery systems, and antimicrobial agents, as the amphiphilic nature and surface charge favor interactions with biological membranes and stability in colloidal systems (Han et al., 2024; Gaur et al., 2026).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Figure 4 presents the FTIR spectra of two biosurfactant samples obtained using different extraction ratios: 2:1 (A) and 1:2 (B). These spectra allow identification of the main functional groups present in the isolated biomolecule and enable comparison of structural differences arising from the extraction conditions.

Figure 4. FTIR spectra of biosurfactant produced by *M. circinelloides*, obtained using different extraction ratios: 2:1 (A) and 1:2 (B).



Source: Authors.

The FTIR spectrum of sample obtained using the 2:1 extraction ratio (Figure 4A), exhibited a prominent absorption band around ~2925 cm^{-1}, characteristic of aliphatic C–H stretching vibrations. This intense band indicates a higher retention of lipid chains, suggesting a more pronounced lipophilic character in this fraction of the biosurfactant. Such a profile is consistent with the presence of long hydrocarbon chains typically associated with glycolipid or lipopeptide structures.

In contrast, the spectrum of sample obtained at the 1:2 extraction ratio (Figure 4B) showed major bands at approximately 1641 cm^{-1}, 1078 cm^{-1}, and 991 cm^{-1}. The strong absorption at ~1641 cm^{-1} corresponds to amide I vibrations,

indicating peptide bonds and suggesting the presence of lipopeptides or peptide-associated material. The bands at 1078 and 991 cm^{-1} are attributed to C–O and C–O–C stretching vibrations, typical of saccharidic structures or hydroxyl-containing groups, pointing to a greater contribution of carbohydrate fractions.

The attenuation or absence of the dominant aliphatic band (~2925 cm^{-1}) in sample B suggests a relatively more polar composition, possibly due to reduced lipid content or selective enrichment of peptide and carbohydrate components as a result of the extraction conditions. Overall, the differences observed between the spectra of samples A and B demonstrate that the extraction ratio directly influences the chemical profile of the isolated biosurfactant, emphasizing the importance of the extraction method in determining its structural and functional characteristics.

CONCLUSIONS

The fungus *Mucor circinelloides* UCP 0017 demonstrated high biotechnological potential for biosurfactant production using low-cost alternative substrates, reinforcing the viability of sustainable processes. The compound achieved a significant reduction in surface tension, reaching 31.0 mN/m, and exhibited stability under extreme conditions of pH, salinity, and temperature, which evidence its structural robustness.

The predominantly lipid composition, associated with the presence of peptide and saccharide fractions identified by FTIR, suggests a complex glycolipid nature, compatible with its anionic profile and colloidal stability. These characteristics significantly expand its application potential in biomedical formulations, drug delivery systems, bioactive dressings, and industrial processes that require resistance to environmental variations. Thus, the produced biosurfactant stands out as a promising alternative to synthetic surfactants, combining functional performance, structural stability, and environmental sustainability.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank FACEPE for providing research fellowships to P.M.J.M. (Process IBPG-1122-3.06/24) , S.H.P.L (Process IBPG-1322-2.00/22) and D.M.R. (Process BFP-00392.12/23), and CAPES for a fellowship to R.S.M. (Process 88887.837208/2023-00). The authors also acknowledge CNPq for providing a research grant for G.M.C.T. (Process nº 312241/2022-4).

REFERENCES

ANIDU, F.N., UBA, B.O., EZEMBA, C.C., OKOYE, E.L., DOKUBO, C.U. Study on Optimization, Degreasing and Destaining Potentials of Glycophospholipid Biosurfactant Produced by *Bacillus anthracis* S62A. **Dutse Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 9 n. 1, p. 29–43, 2023. DOI: https://doi.org/10.4314/dujopas.v9i1a.4.

ANDRADE, R.F.S., SILVA, T.A.L., RIBEAUX, D.R., et *al*. Promissor Biossurfactante Produzido por *Cunninghamella echinulata* UCP 1299. Utilizando recursos renováveis e sua aplicação no processo de limpeza de tecidos de algodão. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, pág, 1 set. 2, 2018. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/1624573.

BERBEROV, K. et al. Exploring Biosurfactant Production from Halophilic Bacteria, Isolated from Burgas Salterns in Bulgaria. **Marine Drugs**, v. 24, n. 1, p. 53, 22 jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/md24010053

BIONE, A.P., LINS, A.B., RODRÍGUEZ, D.M., SOUZA, A.F., MENDONÇA, R.S., FILHO, H.J.B.L., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Valorization of agro-industrial by-products for sustainable production of biosurfactant by Syncephalastrum racemosum UCP 1302. **Research, Society and Development**, v. 11 n. 9, e. 58011932372, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32372.

BOUASSIDA, M., FOURATI, N., GHAZALA, I., ELLOUZE-CHAABOUNI, S., GHRIBI, D. Aplicação potencial de biossurfactantes *Bacillus subtilis* SPB1 em formulações de detergente para roupa: Estudo de compatibilidade com ingredientes detergentes e desempenho de lavagem. **Eng. Ciência da Vida**, v. 18, p. 70-77, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/elsc.201700152.

BUENO, S.M., SILVA, A.N., GARCIA-CRUZ, C.H. Study on the production of biosurfactant fermentation broth. **Química Nova.** v. 33, p. 1572-1577, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700026.

CÂNDIDO, T.R.S., MENDONÇA, R.S., LINS, U.M.B.L. et *al*. Produção de biossurfactantes por fungos Mucoralianos isolados de solo do bioma Caatinga utilizando resíduos industriais como substratos renováveis. **Pesquisa,**

Sociedade e Desenvolvimento, *[S. l.]*, v. 2, pág. e13411225332, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25332.

CAROLIN, F.C,. KAMALESH T. Advances in stabilization of metallic nanoparticle with biosurfactants- a review on current trends. **Heliyon**, v. 10, n. 9, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29773.

COOPER, D.G., GOLDENBERG, B.G. Surface-active agents from two *Bacillus* species. **American Society for Microbiology.** v.52, p. 224-229, 1984. DOI: 10.1128/aem.53.2.224-229.1987.

CHOTARD, M. et al. Biosurfactant-Producing Mucor Strains: Selection, Screening, and Chemical Characterization. **Applied Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 248–259, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010018

DATTA, M., CHATTOPADHYAY, I. Applications of microbial biosurfactants in human health and environmental sustainability: a narrative review**. Discov Med**. v. 1 , n. 160, 2024. DOI: https://doi.org /10.1007/s44337-024-00181-w.

DATTA, D.; BHATTACHARJEE, S. Biosurfactants as novel antibiofilm agents: mechanisms, biomedical applications, and applications in biofilm-associated infections. **Archives of Microbiology**, v. 208, n. 1, p. 6–6, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-025-04555-1

FERREIRA, I.N.S., RODRIGUEZ, D.M., CAMPOS-TAKAKI, G.M., et al. Biosurfactant
and bioemulsifier as promising molecules produced by *Mucor hiemalis* isolated from Caatinga soil. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 47, p. 51-58, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.06.006.

FERREIRA, I.N.S; SILVA, P.H, MENDONÇA, R.S; ANDRADE, R.F.S; CAMPOS-TAKAKI, G.M. Production and functional stability of the biourfactant isolated from *Stenotrophomonas maltophilia* UCP 1601. **Research, Society and Development**. v. 11, n. 11, p. e87111132995, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.32995.

GAUR, P. K. et al. Functional Roles of Microbial Biosurfactants in Pharmaceutical Formulation and Targeted Drug Delivery. **Journal of Surfactants and Detergents**, 5 fev. 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/jsde.70030

GEETHANJALI, P.A., GOWTHAM, H.G., JAYASHANKAR, M. Optimization of culture
conditions for hyper-production of laccase from an indigenous litter dwelling fungus *Mucor circinelloides* GL1. **Environmental Sustainability**, v.3, p.481–495, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s42398-020-00137-7.

GRBAVČIĆ, S., MARKOVIĆ, D., RAJILIĆ-STOJANOVIĆ, M. *et al.* Development of

an Environmentally Acceptable Detergent Formulation for Fatty Soils Based on the Lipase from the Indigenous Extremophile *Pseudomonas aeruginosa* Strain. ***J Surfact Deterg,*** v.18, p.383–395, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s11743-015-1674-x.

HELMY, Q., GUSTIANI, S., MUSTIKAWATI, A.T. Aplicação de biossurfactante ramnolipídico para formulação de biodetergente. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 823 p. 012014, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012014.

KEBBOUCHE-GANA, S., GANA, M.L., KHEMILI, S., FAZOUANE-NAIMI, F., BOUANANE, N.A., PENNINCKX, M., HACENE, H. Isolamento e caracterização de Archaea halofílicos capazes de produzir biossurfactantes. **Journal of Industrial Microbiology and Biotecnologia.** v. 36, p. 727-738. 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s10295-009-0545-8.

KUYUKINA, M. S., IVSHINA, I. B., PHILP, J. C., CHRISTOFI, N., DUNBAR, S. A., RITCHKOVA, M.I. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl tertiary–butyl ether extraction. **Journal Microbiology Methods**, v. 46, p. 149 - 156, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0167-7012(01)00259-7. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167701201002597#preview-section- cited-by.

LAITALA, K., KLEPP, I.G., KETTLEWELL, R., WIEDEMANN,S. Laundry Care Regimes: Do the Practices of Keeping Clothes Clean Have Different Environmental Impacts Based on the Fibre Content? **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7537, 12 set. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12187537.

MAIA, P.C.V.S., RODRÍGUEZ, D.M., SOUZA, A.F., ANDRADE, R.F.S., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Production of biosurfactant by Bacillus subtilis UCP 0999 using cassava wastewater (CWW) and waste frying oil (WFO) as renewable substrates. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e. 17011628805, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28805.

MANOCHA, M. S., SAN-BLAS, G., CENTENO, S. Lipid composition of *Paracoccidioides brasiliensis*: Possible correlation with virulence of different strains. **Microbiology society.** v. 117, 1980. DOI: https://doi.org/10.1099/00221287-117-1-147.

MARQUES, N.S.A.A., SALES DA SILVA, I.G., CAVALCANTI, D.L., et *al*. Eco-Friendly Bioemulsifier Production by *Mucor circinelloides* UCP0001 Isolated from Mangrove Sediments Using Renewable Substrates for Environmental Applications. **Biomolecules**, v.10, n.3, p. 365, 2020. DOI: **https://doi.org/10.3390/biom10030365.**

MELO, P.M.J., MARQUES, N.S.A.A., SOUZA, A.F., ANDRADE, G.R.P., CAMPOS-TAKAKI, G.M. Estratégia para produção sustentável de biossurfactantes por *mucor circinelloides* UCP0017. **Caderno de ANAIS**

HOME, *[S.l.]*, 2023. DOI: https://doi.org/10.56238/sevenIIImulti2023-267.

MENDONÇA, R. DE S. et al. A promising lipopeptide production and application as biostimulant for seeds germinations. **Projeção e docência**, v. 17, n. 1, p. e2544, 28 jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.54899/rpd.v17n1-2544

MIAO, Y., TO, M.H., SIDDIQUI, M.A., WANG, H., LODENS, S., CHOPRA, S.S., KAUR, G., ROELANTS, S.L.K.W., LIN, C.S.K. Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock—recent advances, process optimization and perspectives. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, 2024. DOI: 10.3389/fchem.2024.1327113.

MORIKAWA, M., DAIDO, H., TAKAO, T., MURATA, S., SHIMONISHI, Y., IMANAKA, T. A new lipopeptide biosurfactant produced by *Arthrobacter* sp. strain MIS38. **Journal of Bacteriology.** v. 175, p. 6459-6466, 1993. DOI: https://doi.org/10.1128/jb.175.20.6459-6466.1993.

PANDIT, N. K.; MEENA, S. S. Exploring Sustainable Biosurfactant Production Through Waste Valorization: Emerging Research Trends and Industrial Applications. **Waste and Biomass Valorization**, 20 jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-025-03169-4

PARASKA, O., SYNYUK, O., RADEK, N., ZOLOTENKO, E., MYKHAYLOVSKIY, Y. Usage of biosurfactants as environmental friendly detergents for textile products cleaning. **Fibres and Textiles**, v. 30, n. 5, p. 42–51, 2023. DOI: 10.15240/tul/008/2023-5-005.

PURWASENA, I.A., AMANIYAH, M., ASTUTI, D.I., FIRMANSYAH, Y., SUGAI, Y. Production, characterization, and application of Pseudoxanthomonas taiwanensis biosurfactant: a green chemical for microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Scientific Reports.** v. 14, p. 10270, 2024. DOI: https://doi.org.1038/s41598-024-61096-1

RULLI, M.M., ALVAREZ, A., FUENTES, M.S., COLIN, V.L. Production of a microbial emulsifier with biotechnological potential for environmental applications. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 174, p. 459-466, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.11.052.

SANTIAGO, M.G., LINS, U.M.B.L., CAMPOS-TAKAKI, G.M., FILHO, L.O.C., ANDRADE, R.F.S. Produção de biossurfactante por *Mucor circinelloides* UCP 0005 utilizando novo meio de cultura formulado com casca de jatobá (*Hymenaea courbaril L.*) e milhocina. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v.7, n.5, p.51292-51304, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30166.

SILVA, R.R., CALDAS, M.C.F., LIMA, C.V.A., MEIRA, H.M., SARUBBO, L.A., LUNA, J.M. Production, Characterization and Application of Biosurfactant for Cleaning Cotton Fabric and Removing Oil from Contaminated Sand. **Processes**, v. 12, n. 11, p. 2584, 18 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12112584.

SILVA, R. R. DA et al. Biosurfactants in Food: Advances, Innovative Applications and Functional Perspectives. **Foods**, v. 15, n. 3, p. 508, 1 fev. 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/foods15030508

SOUZA, C.V.M., TORRES JARA, A.M.A., BEZERRA, K.G.O., et *al*. Produção do Biossurfactante *Candida Guilliermondii* e Aplicação na Formulação de Detergente Natural. **Transações de Engenharia Química.** v. 100, p. 85-90, 2023. DOI: https://doi.org/10.3303/CET23100015.

SHAH, M.U.H., MONIRUZZAMAN, M., SIVAPRAGASAM, M., et al. A binary mixture
of a biosurfactant and an ionic liquid surfactant as a green dispersant for oil spill remediation.
Journal of Molecular Liquids. v. 280, p. 111-119, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.049.

SHARMA, N., AHLAWAT, Y.K., SHARMA, A.J., CHAMOLI, N., THAKUR, M., SHARMA, A., MEHMOOD, S., MALIK, A., AHMED, M., PUNIA, H., CHOUBEY, S. A comprehensive review on microbial production and significant applications of multifunctional biomolecules: biosurfactants. **Biodegradation**, v. 36, n. 2, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10532-025-10121-9.

TIQUIA, S.M., TAM, N.F.Y., HODKISS, I.J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. **Environmental Pollution.** v. 93, p. 249-256, 1996. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00052-8.

VIEIRA, I. M. M., SANTOS, B. L. P., RUZENE, D. S., & SILVA, D. P. An overview of current research and developments in biosurfactants**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* *v. 100***, p. 1-18, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.017.