REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

BIOSSURFACTANTES MICROBIANOS COMO BIOINSUMOS APLICADOS NA AGRICULTURA COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL

MICROBIAL BIOSURFACTANTS AS BIO-INPUTS APPLIED IN AGRICULTURE AS A SUSTAINABLE STRATEGY

Ciências Biológicas, Ciências Agrárias • 05/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793587806

Salatiel Henrique Pereira de Lima[1]

Marcella Estanislau Marinho[2]

André Felipe Santos Lima[3]

Josimar Gurgel Fernandes[4]

Galba Maria de Campos-Takaki[5]

RESUMO

A elevada demanda por alimentos vem intensificando o uso de insumos químicos na agricultura, gerando impactos ambientais que induzem a busca por alternativas biotecnológicas sustentáveis. Nesse contexto, destacam-se os biossurfactantes microbianos, compostos anfifílicos produzidos principalmente por bactérias, leveduras e fungos filamentosos. As espécies do gênero *Bacillus* demonstram elevado potencial biotecnológico para a síntese de lipopeptídeos com propriedades antimicrobianas e na promoção do crescimento vegetal. Esses compostos apresentam biodegradabilidade, baixa toxicidade e diversidade estrutural, características que ampliam seu potencial como bioinsumos agrícolas. Esta revisão apresenta o potencial dos biossurfactantes microbianos como estratégia biotecnológica para uma agricultura sustentável, abordando classificação, características físico-químicas e microrganismos produtores, alternativas de produção usando resíduos agroindustriais como substratos e principais aplicações agrícolas. Os lipopeptídeos como surfactina, iturina e fengicina são produzidos por bactérias do gênero *Bacillus* apresentam efeitos relevantes na promoção da germinação e no desenvolvimento radicular inicial de diferentes espécies vegetais, além de atividade antagônica contra fitopatógenos como *Rhizoctonia solani*, *Fusarium* spp. e *Colletotrichum* spp., contribuindo para o manejo de doenças de plantas. No entanto, a aplicação em escala industrial é limitada, considerando os desafios relacionados aos custos operacionais de produção, recuperação e purificação. Portanto, os biossurfactantes constituem alternativa promissora para o desenvolvimento de bioinsumos multifuncionais, como indução da germinação, promoção do crescimento e capacidade de aliar proteção vegetal e sustentabilidade produtiva.

Palavras-chave: Biossurfactantes.*Bacillus*; Lipopeptídeos; Agricultura sustentável; Controle biológico; Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

The growing demand for food has intensified the use of chemical inputs in agriculture, generating environmental impacts that drive the search for sustainable biotechnological alternatives. In this context, microbial biosurfactants stand out as amphiphilic compounds produced mainly by bacteria, fungi, and yeasts, among which species of the genus *Bacillus* are notable for their ability to synthesize lipopeptides with antimicrobial properties and potential to promote plant growth. These compounds exhibit biodegradability, low toxicity, and structural diversity, characteristics that broaden their potential as agricultural bio inputs. This review aimed to analyze the potential of microbial biosurfactants as a biotechnological strategy for sustainable agriculture, addressing their physicochemical characteristics, classification, producing microorganisms, production alternatives from agro-industrial residues, and main agricultural applications. The results discussed show that lipopeptides such as surfactin, iturin, and fengycin exhibit relevant effects on the promotion of germination and initial root development of different plant species, in addition to antagonistic activity against phytopathogens such as *Rhizoctonia solani*, *Fusarium* spp., and *Colletotrichum* spp., contributing to plant disease management. However, large-scale commercial applications still face challenges related to recovery and purification costs, formulation standardization, and the need for field validation. It is concluded that biosurfactants represent a promising alternative for the development of multifunctional bio inputs, capable of combining plant protection, growth promotion, and productive sustainability.

Keywords: Biosurfactants.*Bacillus*; Lipopeptides; Sustainable agriculture; Biological control; Agro-industrial residues.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos e a necessidade de aumentar a produtividade agrícola têm intensificado o uso de fertilizantes, pesticidas e outros insumos químicos. Embora esses produtos contribuam para o controle de pragas, doenças e limitações nutricionais, seu uso excessivo pode favorecer a contaminação do solo e da água, a perda da biodiversidade e o desequilíbrio dos agroecossistemas. Nesse contexto, a busca por alternativas biotecnológicas capazes de contribuir para uma produção agrícola mais eficiente e ambientalmente sustentável tem ampliado o interesse por microrganismos e seus metabólitos (De lima *et al.*, 2026).

Entre essas alternativas, destacam-se os biossurfactantes microbianos, compostos anfifílicos produzidos principalmente por bactérias, fungos e leveduras, capazes de reduzir a tensão superficial e interfacial entre diferentes fases. Esses biocompostos apresentam características como biodegradabilidade, baixa toxicidade, diversidade estrutural e estabilidade em diferentes condições físico-químicas, propriedades que favorecem sua utilização em diferentes setores e ampliam seu potencial como insumos de interesse agrícola (Silva *et al.*, 2024).

Na agricultura, os biossurfactantes podem desempenhar diferentes funções, incluindo emulsificação e solubilização de compostos hidrofóbicos, melhoria da dispersão de formulações, interação com superfícies vegetais, promoção do crescimento vegetal e atividade

contra microrganismos fitopatogênicos. Além disso, alguns biossurfactantes estão associados à formação e modulação de biofilmes, à interação planta-microrganismo e à indução de mecanismos de defesa vegetal. Entre os principais produtores destacam-se espécies do gênero *Bacillus*, reconhecidas pela capacidade de sintetizar lipopeptídeos e glicolipídeos com propriedades antimicrobianas e potencial de promoção do desenvolvimento vegetal (Penha *et al.*, 2020; Saiyam *et al.*, 2024).

Os lipopeptídeos produzidos por espécies do gênero *Bacillus*, como surfactina, iturina e fengicina, apresentam especial relevância no contexto agrícola. Esses compostos têm sido investigados devido à sua atividade contra diferentes fitopatógenos e à capacidade de favorecer o estabelecimento e o desenvolvimento das plantas. Entre as aplicações estudadas encontram-se o controle de doenças, a proteção contra agentes fitopatogênicos e a promoção da germinação e do crescimento inicial de diferentes espécies vegetais. Entretanto, os efeitos observados dependem de fatores como a estrutura do biossurfactante, o microrganismo produtor, a concentração utilizada, a espécie vegetal e as condições ambientais (Maksimov *et al.*, 2020)

Outro aspecto relevante para a sustentabilidade da produção de biossurfactantes é a possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais como fontes alternativas de nutrientes para o cultivo microbiano. Substratos como glicerol residual, óleos vegetais, melaço, vinhaça, soro de leite e resíduos provenientes do processamento agrícola podem reduzir os custos de produção e, simultaneamente, contribuir para o aproveitamento de resíduos que poderiam apresentar impactos ambientais quando descartados inadequadamente. Essa abordagem integra princípios de economia

circular e amplia as perspectivas de obtenção de biossurfactantes em processos mais sustentáveis (Mohanty *et al.*, 2021).

Apesar do crescente número de estudos, a aplicação agrícola dos biossurfactantes ainda apresenta desafios relacionados principalmente aos custos de produção, recuperação e purificação, à padronização das formulações e à necessidade de compreender a resposta das plantas em diferentes condições de aplicação (Drakontis; Amin, 2020).

Diante desse cenário, esta revisão tem como objetivo analisar o potencial dos biossurfactantes microbianos como estratégia biotecnológica para a agricultura sustentável, abordando suas principais características, classes químicas, microrganismos produtores e alternativas de produção, com ênfase nas aplicações agrícolas relacionadas à promoção da germinação e do crescimento vegetal, ao controle de fitopatógenos e ao manejo de doenças de plantas.

2. BIOSSURFACTANTE MICROBIANOS: CONCEITO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

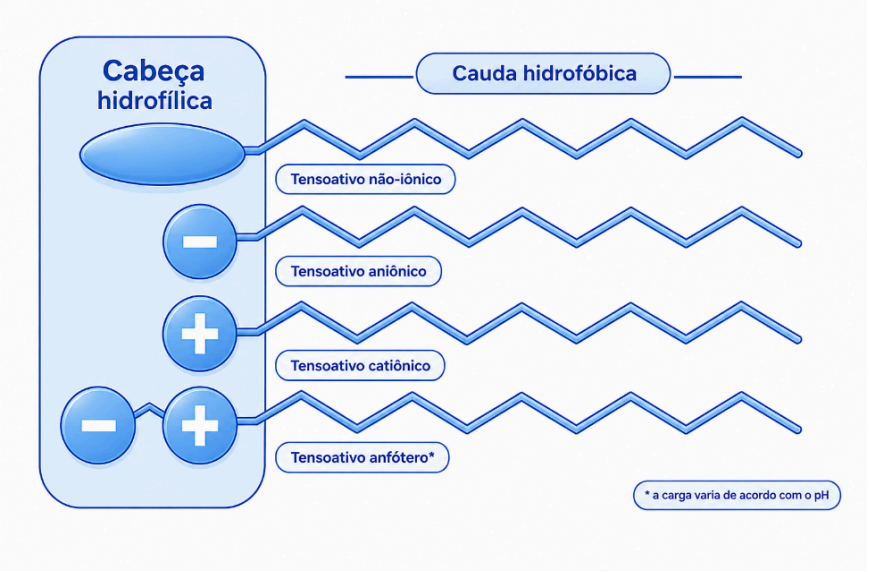
2.1. Surfactantes

A designação “surfactante” deriva da abreviação do termo em inglês “*surface active agent*”. Além disso, o vocábulo “tensoativo” é frequentemente empregado como sinônimo apropriado na língua portuguesa. Os surfactantes são substância anfifílicas de natureza orgânica que exibem, em sua estrutura molecular, uma porção polar e outra apolar. A porção apolar, também intitulada “cauda”, é composta por uma ou duas sequências de carbono, ou em

alternativa, por cadeias fluorocarbônicas ou siloxânicas (Guzmán *et al.*, 2023).

Por outro lado, a porção polar, referida como “cabeça”, tem a capacidade de abrigar grupos iônicos (sejam cátion ou ânions), grupos não iônicos ou grupos anfóteros. Esses últimos demonstram uma característica notável ao atuarem como ácidos ou bases, de acordo com o pH do ambiente circundante. Como representado na Figura 1, a categorização dos surfactantes engloba segmentos como não-iônicos, aniônicos, catiônicos ou anfotéricos, dependendo dos grupos funcionais presentes na parte polar (Abo elsoud, 2021).

Figura 1. Ilustração gráficas dos surfactantes

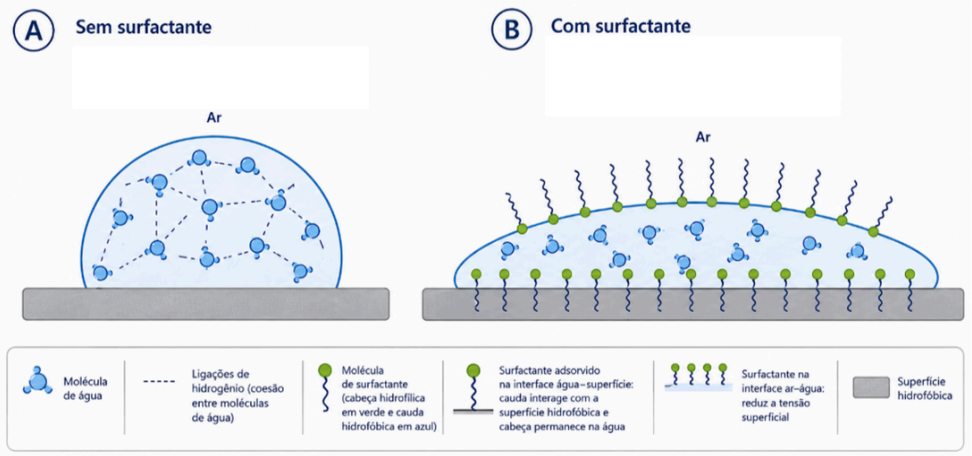


Fonte: Figura adaptada de Macler Produtos Químicos Ltda

Devido à sua natureza anfifílica, os surfactantes, quando introduzidos em um solvente polar, tal como a água, tendem a se concentrar na interface entre o solvente, ou seja, na interface solvente/ar. A incorporação das moléculas de surfactantes nessa superfície provoca uma redução na coesão entre as moléculas do solvente presentes na interface, levando à minimização da tensão

superficial (ilustrada na Figura 2) (Thavasi; Marchant; Banat, 2014; Abo Elsoud, 2021).

Figura 2. Ilustração esquemática da redução da tensão superficial

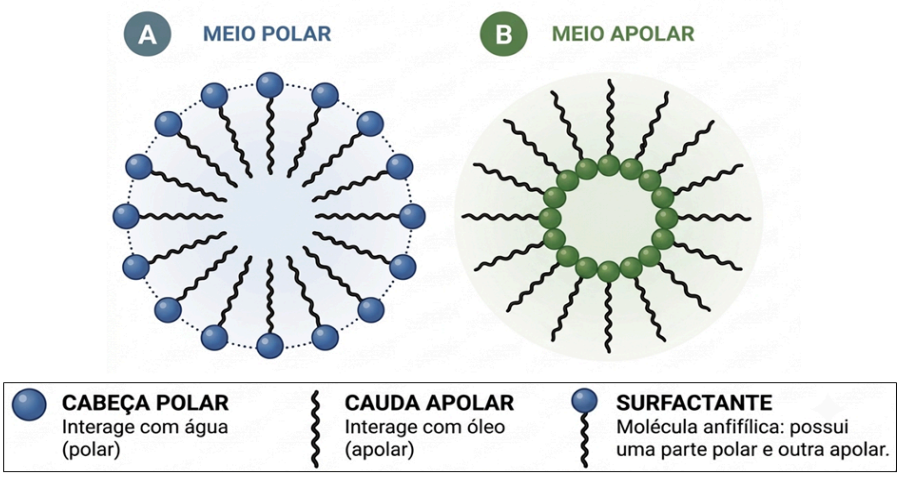


A. Gotícula de água sobre uma superfície hidrofóbica. **B.** Gotícula de água em superfície hidrofóbica, com a presença de moléculas de surfactantes. A adição do surfactante resultou na redução da tensão superficial na gota de água, o que por sua vez aumentou a área de contato entre a água e a superfície hidrofóbica.

Fonte: Figura adaptada De Oliveira Felipe; De Cássia Dias, 2017VVVVV

É importante destaca que a adição subsequente de moléculas de surfactante, após atingir a saturação da superfície entre as duas fases (polar/apolar), não contribuirá para a redução adicional da tensão superficial. Nesse cenário, as moléculas de surfactantes introduzidas após a saturação interagem mutuamente, formando conjuntos moleculares denominadas micelas, que podem estar presentes tanto na fase polar (Figura 3A) quanto na fase apolar (Figura 3B) (Belhaj *et al.*, 2020).

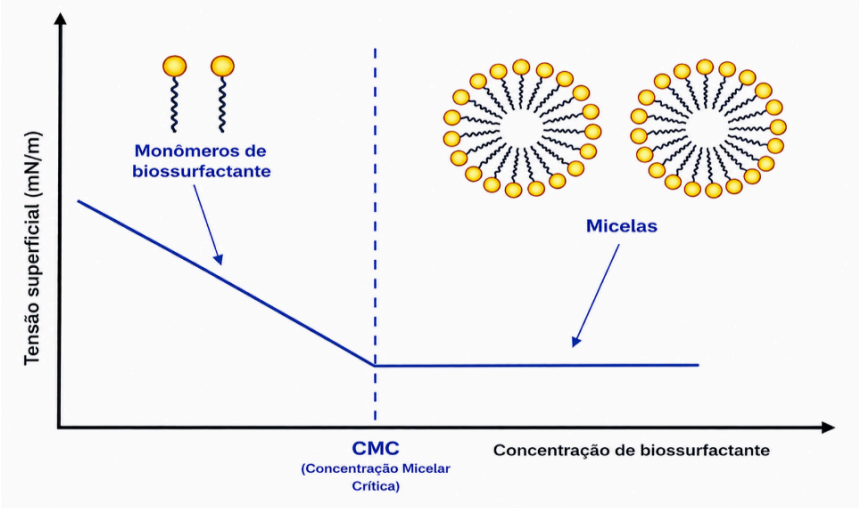
Figura 3. Arranjo molecular de um surfactante na forma de Micelar Direta (A) e Micelar Inversa (B)



Fonte: Autoria própria (2026)

A concentração na qual começa a formação de micelas é referida como Concentração Micelar Crítica (CMC). Essa concentração é definida como o valor mínimo de concentração do surfactante requerido para alcançar uma redução máxima na tensão superficial. No momento em que a CMC é atingida, ocorre a formação de múltiplas micelas, conforme exemplificado na Figura 4 (De Oliveira Schmidt *et al.*, 2021).

Figura 4. Concentração Micela Crítica e o processo de formação de micelas



Fonte: Figura adaptada de Akbari *et al.* (2018)

Essa CMC representa uma característica inerente e exclusiva de cada surfactante. Fatores como a composição química do grupo

hidrofóbico e hidrofílico, intensidade iônica, temperatura e a presença de eletrólitos são elementos que influenciam a CMC (Belhaj *et al.*, 2020).

A compreensão da relação entre surfactantes, micelas e Concentração Micelar Crítica é fundamental no desenvolvimento de formulações eficazes e na ampliação das aplicações dos surfactantes em diversos campos, como produtos de limpezas, formulações agrícolas e farmacêuticas (Guzmán *et al.*, 2023).

A predominância na aplicação dos surfactantes é observada nos setores industriais relacionados a produtos de higiene (como sabões e detergentes), na indústria petrolífera e no campo dos produtos de cosmética e higiene. A produção global de agentes tensoativos supera a marca de 3 milhões de toneladas anualmente, com a maior parcela sendo destinada à utilização como matéria-prima essencial na fabricação de detergentes de uso doméstico (Ferreira *et al.*, 2023).

O segmento de agentes tensoativos apresentou um valor global de mercado de 42,1 bilhões de dólares norte-americano em 2020, e é projetado que alcance a cifra de 52,4 bilhões de dólares americanos até o ano de 2025. O aumento do mercado é esperado em virtude do crescimento populacional e da urbanização crescente em regiões economicamente desfavorecidas de países em desenvolvimento (Ferreira *et al.*, 2023).

Cada surfactante exibe características intrínsecas distintas, as quais se refletem em aplicações específicas. Os surfactantes aniônicos, tais como sulfatos e sulfonatos, encontram aplicação difundida em detergentes e soluções de limpeza, devido à sua eficácia na remoção de resíduos e óleos. Essa funcionalidade destaca seu papel central

em variados setores industriais, abrangendo cuidados pessoais, alimentação, agricultura, petróleo, têxtil, farmacêutica e outras esferas, conforme documentado em fontes (Da Silva, 2023).

Por sua vez, os surfactantes catiônicos são comumente empregados em formulações de produtos para cuidados pessoais, a exemplo de xampus e condicionadores, devido às suas propriedades condicionantes e antimicrobianas, conforme respaldado pela literatura (Cosendey; Do Nascimento; Franzini, 2021; Jacinto, 2022).

A seleção do surfactante adequado repousa sobre a natureza da aplicação almejada, exigindo avaliações quanto à compatibilidade com outros componentes, estabilidade diante de variações de pH e temperatura, garantia de segurança para os consumidores e minimização de impactos ambientais. Concomitantemente, considerações regulatórias e legislativas nacionais e internacionais podem orientar a seleção, conforme amparo em fontes especializadas (Baul, 2026).

A indústria de surfactantes na maioria dos mercados utiliza derivados de petróleo como matéria-prima para a produção de seus produtos. Além disso, uma ampla variedade de produtos consumidos diariamente é originada do petróleo, o que o torna uma fonte de energia exclusiva. Diante desse cenário, é essencial considerar a maximização na produção de petróleo, o qual acarreta consequências ambientais e econômicas adversas (Nitschke; Pastore, 2002).

Nesse contexto, devido às novas regulamentações e preocupações ambientais, tem havido um crescente interesse na busca por agentes tensoativos que sejam menos prejudiciais à natureza. Esse

interesse tem impulsionado a investigação e o desenvolvimento de surfactantes biologicamente produzidos, denominados como biossurfactantes (Geetha; Banat; Joshi, 2018).

É importante destacar que alguns surfactantes, especialmente os que são persistentes no ambiente, podem ter efeitos negativos na saúde humana e ao ecossistema. Em comparação aos surfactantes sintéticos quimicamente produzidos, que atualmente representam aproximadamente 70-75% de consumo de surfactantes nos países industrializados, os biossurfactantes são considerados uma opção ecologicamente viável (Geetha; Banat; Joshi, 2018).

Essa tendência da utilização de biossurfactantes baseia-se na necessidade de criar produtos mais suaves, substituindo compostos não biodegradáveis, como os alquilbenzenos ramificados, e também em aumentar a especificidade dos produtos (Nitschke; Pastore, 2002; Ferreira *et al.*, 2023).

Os biossurfactantes apresentam várias vantagens em relação aos surfactantes químicos, tais como a obtenção a partir de fontes renováveis, biodegradabilidade, menor Concentração Micelar Crítica (CMC), baixa toxicidade e capacidade de atuar em condições adversas (Farias *et al.*, 2021).

2.2. Biossurfactante

Os biossurfactantes, moléculas anfifílicas, foram descobertos na década de 60. Assim como os surfactantes, suas moléculas consistem em uma porção polar e uma porção apolar, produzidas por diferentes microrganismos, incluindo bactérias, fungos e leveduras. Eles têm a tendência de se distribuir em interfaces entre fases fluidas com diferentes graus de polaridade, como (óleo/água e

água/óleo), reduzindo a tensão superficial e tornando-os adequados para diversas aplicações industriais (Borah *et al.*, 2021).

Segundo Lima (2012), os surfactantes biológicos são categorizados em baixo ou alto peso molecular. Aqueles com baixo peso molecular demonstram maior eficiência na diminuição da tensão superficial, enquanto os de alto peso molecular apresentam uma eficiência superior na estabilização de emulsões entre líquidos com distintos níveis de polaridade.

Diversas substâncias com características tensoativas são sintetizadas por organismo vivos, desde plantas (saponinas) até microrganismo (glicolipídios) e também no organismo humano (sais biliares), sendo considerados surfactantes naturais (Nitschke; Pastore, 2002).

No passado, uma variedade de produtos microbiológicos com características surfactantes foi identificada. Dentre os inúmeros microrganismos examinados para a síntese de biossurfactante, incluem-se o *Arthrobacter, Pseudomonas aeruginosa, Acinetobacter calcoaceticus, Bacillus subtilis, Candida lipolytica e Torulopsis bombicola* (Campos *et al.*, 2013).

A obtenção de surfactantes a partir de microrganismo tem recebido grande interesse no campo aplicado, visto que esses compostos são considerados naturais e exibem atributos significativos em comparação aos surfactantes sintéticos, incluindo baixa toxicidade, capacidade ampliada de redução da tensão superficial, afinidade por solubilidade em água alcalina, elevada biodegradabilidade, estabilidade térmica, resistência a concentrações salinas elevadas e estabilidade quanto a mudanças de pH (Kumar *et al.*, 2021).

Prevê-se que o setor de surfactantes biológicos para fins alimentícios e não alimentícios experimentará um notável crescimento no âmbito do mercado global, impulsionado pela crescente demanda de cunho ambiental. O amplo potencial de aplicação dos tensoativos originados de resíduos provenientes de biomassa e matérias-primas agrícolas sustentáveis e renováveis (como alquil-poliglucosídeos, lipoproteínas, saponinas vegetais, derivados de aminoácidos e betaínas) indica que essa abordagem se destaca como a alternativa mais adequada para uma utilização mais sustentável dos tensoativos (Ferreira *et al.*, 2023).

A comercialização bem-sucedida dos biossurfactantes está intrinsecamente ligada à obtenção do máximo rendimento e produtividade durante o processo, bem como à redução dos custos associados à sua produção e recuperação. O contínuo progresso da pesquisa nessa área desvenda *insights* cruciais para o desenvolvimento, otimização e aplicabilidade dos biossurfactantes (Guzmán *et al.*, 2023).

2.3. Classificação e Natureza Química dos Biossurfactantes

Os critérios fundamentais para classificação dos biossurfactantes envolvem a análise da sua composição química e a identificação da fonte microbiana responsável pela produção desses compostos. Dentre as classes predominantes de biossurfactantes destacam-se os lipopeptídios, fosfolipídios, glicolipídios, surfactantes poliméricos, particulados e ácidos graxos (Kosaric; Sukan, 2010).

Os biossurfactantes de alto peso molecular compreendem polissacarídeos, proteínas, lipoproteínas e lipopolissacarídeos, enquanto os biossurfactantes de baixo peso molecular incluem

glicolipídios, lipopeptídios e fosfolipídios. Ou seja, os biossurfactantes são considerados uma das principais categorias de surfactantes naturais, conforme indicado na tabela 1 (Da Silva Lira *et al.*, 2022).

Tabela 1. Principais grupos de surfactantes de origem natural e sintética

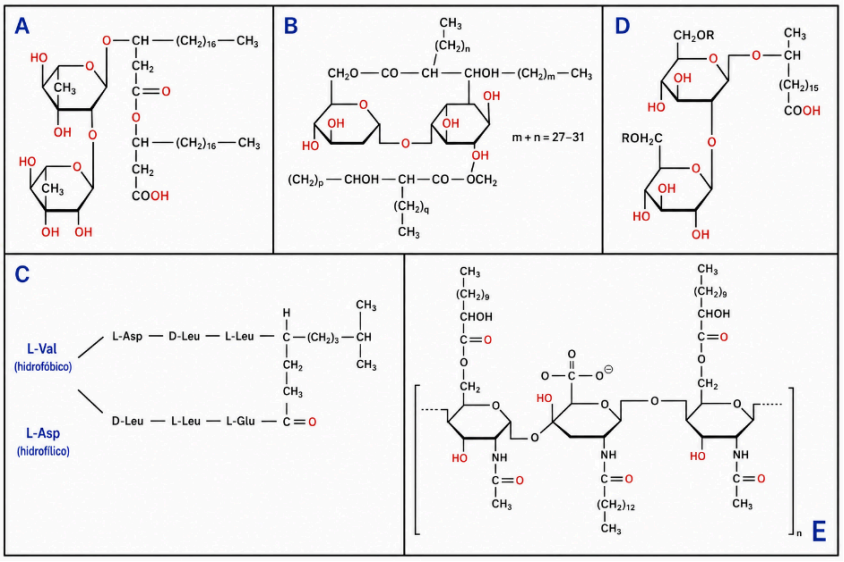
NATURAIS	SINTÉTICOS
Alquil poliglicosídeos	Alcanolaminas
Biossurfactantes	Alquil e aril éter carboxilatos
Amidas de ácidos graxos	Aquil aril sulfatos
Aminas de ácidos graxos	Alquil ari éter sulfatos
Glucamidas	Alquil etoxilados
Lecitinas	Alquil sulfonatos
Derivados de proteínas	Alquil fenol etoxilados
Saponinas	Aminoóxidos
Sorbitol e ésteres de sorbitan	Betaínas
Ésteres de sacarose	Co-polímeros de óxido de etil/propileno
Sulfatos de álcoois graxos naturais	Ácidos graxos etoxilados

Fonte: Nitschke & Pastore (2002)

Os biossurfactantes poliméricos são compostos por uma variedade de grupos químicos distintos. Por exemplo, o emulsan (Figura 5), que consiste em ácidos graxos ligados a um esqueleto de heteropolissacarídeos. Outro exemplo é o liposan de *C. lipolytica,*

que é constituído por carboidratos e proteínas (Cirigliano; Carman, 1984; Cameotra; Makkar, 1998).

Figura 5. Estruturas de biossurfactantes: ramnolipídeo (A), trehalolipídeo (B), surfactina (C), soforolipídeo (D), emulsan (E)



Fonte: Figura adaptada de Nitschke & Pastore (2002)

Determinadas células microbianas demonstram uma notável hidrofobicidade superficial, caracterizando-se como biossurfactantes por si só. Exemplos dessas células incluem microrganismos degradadores de hidrocarbonetos, algumas espécies de Cyanobacteria, e alguns patógenos como *S. aureus* e *Serratia sp.* bactérias pertencentes ao gênero *Acnetobacter sp.* produzem vesículas extracelulares que desempenham um papel importante na captação de alcanos pela célula, demonstrando uma atividade surfactante significativa (Käppeli; Finnerty, 1979).

Os biossurfactantes são caracterizados por possuírem uma estrutura comum, composta por uma porção lipofílica e uma porção hidrofílica. A porção lipofílica é geralmente constituída por uma ou mais cadeias hidrocarbonadas de ácidos graxos, que podem ser saturados, insaturados, hidroxilados ou ramificados. Já a porção

hidrofílica pode ser um éster, um grupo hidróxi, fosfato, carboxilato ou carboidrato. A maioria dos biossurfactantes é neutra ou aniônica, e sua estrutura pode varia desde pequenos ácidos graxos até grandes polímeros (Tabela 2) (Cameotra; Makkar, 1998; Bognolo, 1999).

Tabela 2. Principais grupos de surfactantes biológicos e microrganismo relacionados

TIPO DE BIOSSURFACTANTE	**MICRORGANISMO**
Glicolipídios	
- Ramnolipídios	*Pseudomonas aeruginosa*
- Soforolipídios	*Torulopsis bombicola, T. apicola*
- Trehalolipídios	*Rhodococcus erythropolis,*
	Mycobacterium sp.
Lipopeptídios e lipoproteínas	
- Peptídio-lipídio	*Bacillus licheniformis*
- Viscosina	*Pseudomonas fluorescens*
- Serrawetina	*Serratia marcescens*
- Surfactina	*Bacillus subtilis*
- Subtilisina	*Bacillus subtilis*
- Gramicidina	*Bacillus brevis*
- Polimixina	*Bacillus polymyxa*

Ácidos graxos, lipídios neutros e fosfolipídios	
- Ácidos graxos	*Corynebacterium lepus*
- Lipídios neutros	*Nocardia erythropolis*
- Fosfolipídios	*Thiobacillus thiooxidans*
Surfactantes poliméricos	
- Emulsan	*Acinetobacter calcoaceticus*
- Biodispersan	*Acinetobacter calcoaceticus*
- Liposan	*Candida lipolytica*
- Carboidrato-lipídio-proteína	*Pseudomonas fluorescens*
- Manana-lipídio-proteína	*Candida tropicalis*

Fonte: Desai; Banat (1997).

2.4. Características dos Biossurfactantes

Apesar da diversidade na composição química e nas propriedades, muitas características são compartilhadas pela maioria dos biossurfactantes. Essas características frequentemente conferem vantagens em relação aos surfactantes convencionais (Bognolo, 1999; Gomes, 2025):

- **Atividade superficial e interfacial:** Os biossurfactantes demonstram maior eficiência e eficácia em comparação aos surfactantes convencionais, uma vez que são capazes de reduzir a tensão superficial em concentrações menores de biossurfactante (Cooper; Paddock, 1984; Bognolo, 1999).

- **Tolerância à temperatura, pH e força iônica:** inúmeros surfactantes biológicos exibem notável estabilidade térmica e de pH, tornando-os adequados para aplicação em ambientes sujeitos a condições mais rigorosas. Por exemplo, o lipopeptídio produzido por *Bacillus licheniformis* JF-2 demonstrou estabilidade em temperaturas em torno de 75 °C por até 140 horas e em intervalo de pH entre 5 e 12. Além disso, os biossurfactantes mantêm sua atividade em soluções com até 10% de NaCl, ao passo que concentrações salinas de 2-3% são suficientes para inativar surfactantes convencionais (Bognolo, 1999; Horowitz; Gilbert; Griffin, 1990).

- **Biodegradabilidade:** Ao contrário dos surfactantes químicos, os surfactantes biológicos são prontamente degradáveis na água e no solo, o que os torna propícios para aplicações em biorremediação e tratamento de resíduos (Kosaric; Suakn, 2010).

- **Baixa toxicidade:** Os biossurfactantes têm recebido maior atenção devido à crescente preocupação com os efeitos alérgicos dos produtos artificiais. Sua baixa toxicidade possibilita sua aplicação em alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos (Flasz *et al.*, 1998).

Além disso, os biossurfactantes têm diversas vantagens como, síntese a partir de substratos renováveis e sua ampla diversidade química, permitindo aplicações específicas para diferentes cenários. Suas características estruturais e propriedades físicas distintas os tornam comparáveis ou até superiores aos surfactantes sintéticos em termos de eficiência. Uma vantagem adicional é que eles não são derivados de petróleo, o que se torna relevante em um cenário de aumento dos preços desse recurso. A capacidade de modificar a

estrutura química e as propriedades físicas dos biossurfactantes através de manipulações genéticas, biológicas ou químicas possibilita o desenvolvimento de produtos para atender à necessidade específicas (Reiser *et al.*, 1989).

2.5. Função Fisiológica dos Biossurfactantes

Embora a função fisiológica dos surfactantes biológicos não tenha sido plenamente elucidada, diversas atribuições funcionais têm sido propostas:

1. A produção de biossurfactantes por cepas de *Bacillus subtilis* tem sido associada a processos de emulsificação e solubilização de hidrocarbonetos ou compostos insolúveis em água, o que facilita o crescimento de microrganismos nesses substratos. No entanto, é importante notar que tais cepas demonstraram a produção de surfactantes somente em presença de substratos hidrossolúveis (Cooper *et al.*, 1981).

2. O transporte de hidrocarbonetos tem sido atribuído aos biossurfactantes associados à parede celular de *Candida tropicalis.* Durante o crescimento do microrganismo em alcanos, observou-se um aumento significativo na porção lipídica do polissacarídeo de membrana, o que sugere que o complexo polissacarídeo–ácido-graxo presente na superfície celular desempenha um papel crucial no transporte de hidrocarbonetos (Käppeli; Fiechter, 1977).

3. A aderência e liberada das células em superfícies representam uma das estratégias mais importantes para a sobrevivência dos microrganismos, permitindo-lhes colonizar nichos ecológicos propícios à multiplicação. Um elemento

fundamental nessa estratégia é a presença de estruturas na superfície celular que possibilitam a aderência das células a substratos específicos. Os microrganismos podem empregar surfactantes ancorados à parede celular para modular as propriedades da superfície celular, permitindo-lhes aderir ou desprender-se de locais específicos, de acordo com suas necessidades para encontrar novos habitats com maior disponibilidade de nutrientes ou escapar de ambientes desfavoráveis (Rosenberg *et al.*, 1999).

4. A atividade antibiótica tem sido observada em inúmeros surfactantes biológicos, especialmente na classe dos lipopeptídios e glicopeptídios. Dentre eles, os ramnolipídios de *Pseudomonas aeruginosa* e a surfactina de *Bacillus subtilis* atuam como agentes antibióticos, ao solubilizarem os componentes essenciais das membranas celulares de microrganismos. A excreção desses biossurfactantes no meio proporciona aos microrganismos uma vantagem significativa em termos de sobrevivência e competitividade na busca por nutrientes (Lin, 1996).

2.6. Microrganismo Produtores Biossurfactantes

Diversos microrganismo possuem a capacidade de sintetizar surfactantes biológicos com distintas estruturas moleculares. E a composição do substrato empregado, a quantidade de íons presente no meio de cultura e as condições de cultivo têm um impacto significativo na tipologia, quantidade de qualidade do biossurfactante gerado (Varjani; Upasani, 2017).

Estes compostos são predominantemente produzidos em substratos insolúveis em água, como hidrocarbonetos sólidos e líquidos, óleos e gorduras. Contudo, alguns são obtidos a partir de substratos solúveis ou pela combinação de ambos, sendo este metabólico secundário produzido principalmente durante a fase estacionária do crescimento microbiano (Van Hamme; Singh; Ward, 2006).

As bactérias são os principais agentes produtores de biossurfactantes, com relatos que datam desde 1949, quando a surfactina, um composto biologicamente ativo produzido por *Bacillus subtilis,* foi descoberta. Essa surfactina, produzida por espécie de *Bacillus*, destaca-se como um dos biossurfactantes mais eficazes, sendo capaz de minimizar a tensão superficial em concentrações inferiores a 0,5%. Adicionalmente ao *Bacillus,* as bactérias do gênero *Pseudomonas* também são amplamente reconhecidas como produtoras significativas de biossurfactante (Kakinuma *et al.*, 1969).

Dentro do grupo de bactérias produtoras de surfactantes, estão inclusas algumas espécies, tais como: *Pseudomonas aeruginosa,* que produz mono-di-ramnolipídeos; *Corynebacterium, Nocardia* e *Rhodococcus,* que sintetizam fosfolipídeos, glicolipídeos e outros compostos; *Bacillus subtilis,* que é produtor de surfactina; *Bacillus licheniformis,* responsável pela produção de lipopeptídeos; e *Arthrobacter paraffineus*, que produz trelose e lipídeos de sucrose (Christofi; Ivshina, 2002).

Quanto às leveduras, representantes do gênero *Candida* (classe *Deuteromycetes*, ordem *Saccharomycetales*) têm sido utilizados para emulsificação e solubilização de hidrocarbonetos, o que

favorece o crescimento microbiano nesses substratos por meio da produção de surfactantes biológicos. Essas substâncias de origem microbiana têm recebido considerável atenção devido às suas propriedades de biodegradabilidade, baixa toxicidade, aceitabilidade ecológica, bem como sua capacidade de serem obtidas a partir de fontes renováveis e de baixo custo (Santos *et al.*, 2017; Gaur *et al.*, 2019).

Outra levedura, a *Yarrowia,* também tem sido amplamente estudada quanto à sua capacidade de produzir emulsificantes. A utilização de leveduras é favorecida pelo status GRAS (Generally Regarded as Safe), o qual garante sua utilização segura na indústria de alimentos, pois esses microrganismos não apresentam riscos de toxicidade e patogenicidade. Alguns exemplos de microrganismo desse tipo são: *Yarrowia lipolytica, Saccharomyces cerevisiae, Kluyveromyces lactis, Candida lipolytica e Candida utilis* (Groenewald et al., 2014). *Bacillus amyloliquefaciens* e outros membros do grupo *Bacillus subtilis* são considerados seguros, sendo que alguns produtos celulares de linhagens de *Bacillus* têm o status GRAS (Alves *et al.*, 2018).

2.7. Aplicação de Resíduos Industriais na Produção de Biossurfactantes

Os surfactantes biológicos possuem diversas vantagens em comparação com os surfactantes sintéticos, tornando-os aplicáveis em diversos processos industriais. Contudo, do ponto de vista econômico, ainda não são competitivos em relação aos surfactantes químicos devido ao alto custo. No entanto, a crescente preocupação ambiental tem impulsionado a busca por alternativa aos produtos existentes (Bjerk *et al.*, 2021; Borah; Sen; Pakshirajan, 2021).

A maioria dos biossurfactantes conhecidos são produzidos a partir de substratos insolúveis em água, como hidrocarbonetos sólidos e líquidos, óleos e gorduras, embora alguns também tenham sido obtidos de substratos solúveis. A fermentação é uma ferramenta que pode reduzir os custos do processo de produção (Lourenço *et al.*, 2017).

A produção de biossurfactantes a partir de substratos renováveis e diferentes espécies microbianas, além da variação de parâmetros culturais como tempo de cultivo, velocidade de agitação, pH do meio e nutrientes adicionados, permite a obtenção de compostos com características estruturais e propriedades físicas distintas, comparáveis ou até superiores aos surfactantes sintéticos em termos de eficiência, embora os custos de produção ainda limitem sua competitividade com os similares sintéticos (Campos *et al.*, 2013).

Uma estratégia para enfrentar o problema econômico da produção de biossurfactantes é o uso de fontes alternativas de nutrientes de baixo custo, como resíduos agroindustriais. No entanto, a seleção do substrato adequado é crucial para fornecer o equilíbrio correto de nutrientes que suportem o crescimento celular e a produção do composto de interesse (Volpato *et al.*, 2022).

Considerando que o Brasil é essencialmente um país agrícola, a disponibilidade e facilidade de acesso aos subprodutos agroindustriais são significativas. A viabilidade de produção em grande escala dos biossurfactantes dependerá da recuperação e concentração adequadas do meio de cultura. Geralmente, a baixa concentração e a estrutura do biossurfactante dificultam sua extração. Sendo assim, é de extrema importância desenvolver estratégias que permitam a produção e aplicação dos

biossurfactantes em escala industrial. O uso de substratos de baixo custo, a seleção de microrganismo superprodutores e o aprimoramento dos processos de produção e purificação têm sido explorados com esse objetivo (Sarubbo *et al.*, 2015).

Uma possível solução seria empregar subprodutos industriais, como a borra residual da indústria de óleos vegetais. O glicerol, um produto gerado em grandes quantidades em muitos processos industriais, como na produção de biodiesel, pode ser usado como fonte de carbono, reduzindo os custos de produção. Além disso, ajustes na composição do meio de cultura podem maximizar a produtividade, otimizando as condições de cultivo (Brito *et al.*, 2024).

Milhões de toneladas de resíduos industriais são gerados e descartados no meio ambiente todos os anos, mas muitos podem ser reutilizados na produção de biossurfactantes. Pesquisas visando selecionar substratos adequados e de baixo custo destacam os resíduos agroindustriais, como os provenientes do processamento de óleos de soja, milho, gorduras animais, açúcar da beterraba, sorgo, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos da indústria de laticínios (soro de leite), melaço de cana e glicerina. Também são mencionados óleos vegetais, efluentes industriais (Sundaram *et al.*, 2024).

A seleção cuidadosa do substrato depende da presença de um balanço adequado de nutrientes para suportar o crescimento e a produção do biossurfactante. Resíduos industriais com alto teor de carboidratos e lipídios são elementos necessários para serem usados como substratos na produção de biossurfactante (Morais *et al.*, 2012).

Atualmente, estão em curso diversos estudos de seleção de microrganismo produtores de biossurfactantes para as indústrias alimentícias e petroquímica. Também estão sendo desenvolvidas tecnologias para melhorar as linhagens e os processos de produção, dada a ampla aplicabilidade dos biossurfactantes, por exemplo, na indústria alimentícia, onde podem ser empregados como aditivos em formulações de emulsificantes (Gharai et al., 2026).

A literatura científica demonstra um crescimento expressivo no número de estudos (Tabela 3) que abordam a utilização de resíduos industriais como substratos para a produção de biossurfactantes. Essa abordagem, orientada à viabilidade de processos industriais em larga escala, reveste-se de elevada relevância, uma vez que possibilita a obtenção do biocomposto em volumes significativos, além de promover benefícios ambientais substanciais, ao reduzir a disposição inadequada de resíduos e mitigar seus impactos sobre o meio ambiente (Gharai *et al.*, 2026)

Tabela 3. Uso de resíduos industriais para produção de biossurfactantes

RESÍDUOS INDUSTRIAIS	MICRORGANISMO PRODUTOR	RENDIMENTO (g/L)	REFERÊNCIAS
Glicerol residual e milhocina	*Bacillus licheniformis* UCP 1014	1,162	Lima *et al.*, 2026
Suco de caju clarificado	*Bacillus subtilis* LAMI005	0,313	Oliveira *et al.*, 2010
Glicerol bruto	*Bacillus* sp.	2,8	Rulli *et al.*, 2019

Óleo de girassol residual	*Bacillus amyloliquefaciens* RHNK22	0,8	Kumar *et al.*, 2017

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3. BIOSSURFACTANTES NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Atender às crescentes necessidades da população é uma preocupação global quando se trata da produtividade agrícola. O emprego de compostos orgânicos é crucial para promover uma agricultura sustentável. Na agricultura, os biossurfactantes são aplicáveis na erradicação de patógenos das plantas e na promoção da disponibilidade de nutrientes para os micróbios benéficos associados às plantas. Seu uso amplo pode aprimorar a qualidade do solo agrícola, sendo essenciais para a remediação do solo (Pereira; De Castro, 2022; Da Silva; Orlanda, 2025).

Os biossurfactantes têm ampla aplicação no setor agrícola, sobretudo na composição de herbicidas e pesticidas. De modo geral, os princípios ativos dessas formulações apresentam caráter hidrofóbico, o que torna indispensável o uso de agentes emulsificantes para permitir sua adequada dispersão em meios aquosos. Nesse contexto, surfactantes produzidos por espécies do gênero *Bacillus* já foram empregados com sucesso na emulsificação de pesticidas organofosforados originalmente imiscíveis. Além disso, os ramnolipídeos demonstram potencial promissor no controle biológico de fitopatógenos que se propagam por meio de zoósporos (Patel; Gopinathan, 1986; Stanghellini; Miller, 1997).

Sua aplicação no manejo de doenças de plantas representam uma alternativa eficaz aos pesticidas químicos amplamente utilizados em

diferentes partes do mundo. Além disso, o uso de surfactantes microbianos proporciona benefícios adicionais, como o estímulo ao crescimento das plantas e a promoção de condições favoráveis para a microflora nativa. Isso é essencial para mitigar vários estresses, tanto bióticos quanto abióticos, e para a degradação de substâncias tóxicas e contaminantes ambientais (Abreu *et al.*, 2022).

3.1. Prevenção e Controle de Doenças em Plantas

As doenças das plantas são responsáveis por reduzir significativamente a produção agrícola tanto durante as fases pré quanto pós-colheita, representando uma séria ameaça à segurança alimentar da crescente população global. Estima-se que cerca de 30% da produção agrícola total seja destruída devido a diversas doenças de plantas e ataques de patógenos durante as fases de armazenamento pré e pós-colheita (Kumar; Droby, 2020).

Atualmente, os agricultores dependem, em grande parte, de pesticidas químicos para gerir fitopatógenos e doenças de plantas. No entanto, o uso indiscriminado e contínuo desses pesticidas na produção agrícola resultou em diversas consequências adversas, como má qualidade dos alimentos, poluição do solo e da água, desenvolvimento de resistência por parte das pragas, impactos na microbiota natural e sérios problemas de saúde para os consumidores (Kumar *et al.*, 2021).

Nesse contexto, vários agentes de biocontrole microbiano, incluindo bactérias, fungos e leveduras, têm sido amplamente empregados para controlar doenças de plantas. Eles têm demonstrado eficácia no combate ao crescimento de fitopatógenos, na manutenção da

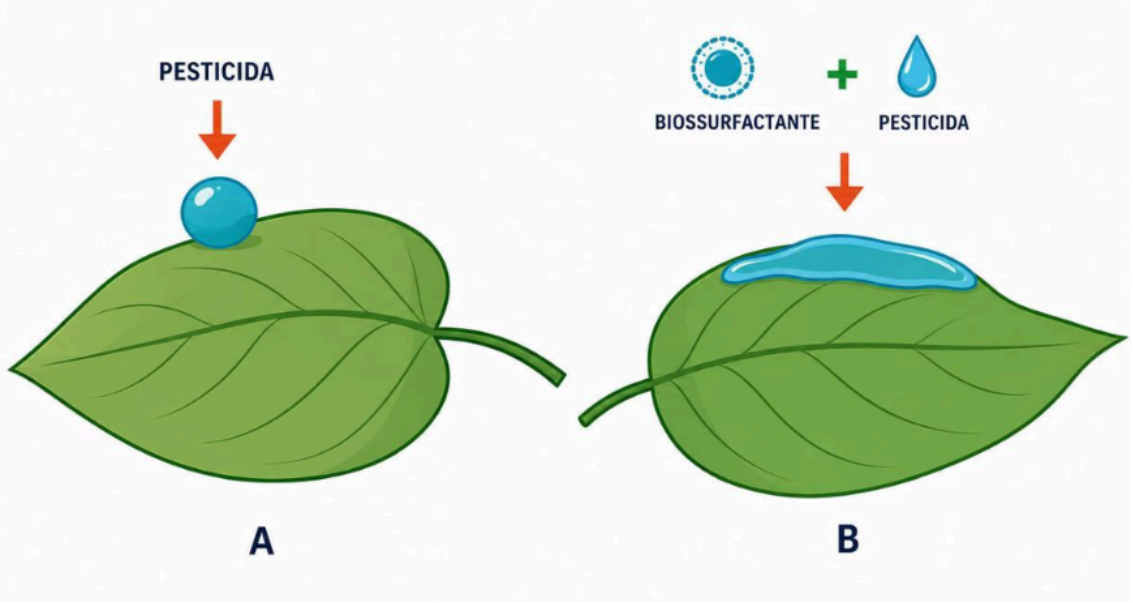
qualidade dos frutos e no aumento da vida útil durante o armazenamento (Kumar *et al.*, 2021).

Apesar da preferência recorrente pelos agroquímicos em relação a outros recursos de proteção de culturas e controle de doenças de plantas devido à sua fácil disponibilidade e resposta rápida, a formulação tradicional e a baixa capacidade de dispersão no local desejado, sejam na superfície da planta ou no patógeno, têm levado a uma eficácia reduzida e à poluição ambiental. Relatórios indicam que apenas cerca de 0,1% dos pesticidas aplicados atingem os organismos alvo, enquanto a maior parte contamina o ambiente (Mostafalou; Abdollahi, 2013; Gill; Garg, 2014).

A aplicação comum dos pesticidas envolve a pulverização direta na planta e em suas superfícies, às vezes, até mesmo imergindo a planta em soluções pesticidas. No entanto, a deriva resultante não atinge o local desejado e demonstra baixa eficácia no controle da doença. Atualmente, para melhorar a eficácia das aplicações de pesticidas, têm sido implementados avanços no mecanismo de distribuição, incluindo a adição de surfactantes, formulações à base de nano e tecnologia de pulverização aprimorada (Preininger *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2018).

Os surfactantes são frequentemente utilizados como aditivos ou adjuvantes durante a aplicação de agrotóxicos, auxiliando na dispersão, emulsificação, melhor cobertura ou aumento da área de contato com a superfície da planta. Isso possibilita que os agrotóxicos atinjam com mais eficácia as pragas ou organismos alvo (Figura 6) (Foy, 2018).

Figura 6. Representação do efeito do surfactante nas superfícies das folhas.



Fonte: Figura adaptada de Jibrin et al (2021)

Após a mistura e aplicação de biossurfactantes com pesticidas, é crucial ter cautela, pois a aplicação de surfactantes pode afetar negativamente o fitobioma não alvo e os processos fisiológicos das plantas (Rebello et al., 2013). Além disso, a maior permeabilidade proporcionada pelos pesticidas pode resultar em níveis aumentados de resíduos nos tecidos das plantas e nos frutos. Portanto, a seleção e a concentração de surfactantes são fatores críticos a serem considerados para estratégias de manejo de doenças mais eficazes (Ryckaert *et al.*, 2007).

Atualmente, diversos surfactantes quimicamente sintetizados, como Triton X-100, Cohere, Agral 90, Silwet L-77 e Tween 20, estão entre os surfactantes sintéticos mais empregados no manejo de doenças de plantas, exibindo potencial aprimorado como inseticidas tanto em aplicações *in vitro* quanto *in vivo* (Sachdev; Cameotra, 2013; Jibrin *et al.*, 2021). Contudo, devido à sua natureza química e tóxica, evita-se a aplicação direta na superfície da planta. Por outro lado, os biossurfactantes são comumente aplicados diretamente na

superfície da planta para o manejo de doenças (Mizumoto; Shoda, 2007; Crouzet *et al.*, 2020).

Atualmente, continuam sendo selecionados e explorados novos microrganismos produtores de biossurfactantes para uma recuperação ideal e aplicação como agentes antagônicos contra uma variedade de pragas e patógenos de plantas. O uso de bactérias, fungos e levedura para controlar doenças de plantas ou o crescimento de fitopatógenos, tanto durante o manejo pré quanto pós-colheita, tem sido amplamente estudado (Singh; Singh; Kumar, 2017; Kumar *et al.*, 2020).

A adição de biossurfactantes modula mecanismos de ação, como antibiose, resistência sistêmica induzida, competição e parasitismo, por agentes de biocontrole (Sachdev; Cameotra, 2013). Um resumo detalhado dos biossurfactantes utilizados no manejo de doenças de plantas foi descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Biossurfactantes empregados no manejo de doenças de plantas

MICRORGANISMO	BIOSSURFACTANTE	PROPRIEDADES	REFERÊNCIAS
Bacillus licheniformis	Biossurfactante	Biocontrole de *Rhizoctonia solani*	Akladious; Gomaa; El-mahdy, (2019)
Bacillus sp.	Lipopeptídeos	Inibição do crescimento de *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp. e *Biopolaris sorokiniana*	Velho *et al.*, (2011)

Bacillus subtilis R14	Lipopeptídeo	Antimicrobiana	Fernandes *et al*., (2007)
Bacillus subtilis	Lipopeptídeos Iturina A, fencicina e surfactina	Biocontrole de *Colletotrichum gloeosporioides*	Kim *et al*., (2010)
Brevibacillus brevis	Lipopeptídeos	Antibacterianas e antifúngicas	Haddad; Wang; Mu, (2008)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Durante o manejo de patógenos, a aplicação de surfactantes exerce efeitos distintos. Edosa *et al*. (2018) investigaram o mecanismo de ação de alguns biossurfactantes no controle de pragas de insetos. Esses compostos atuam na parede celular das pragas, causando danos significativos ao desidratá-las.

Por exemplo, a surfactina, produzida por *Bacillus amyloliquefaciens*, estudada por Yun *et al*. (2013), afeta a cutícula do pulgão, levando à desidratação da membrana da cutícula e resultando na morte do inseto. Da mesma forma, Khedher *et al*. (2017) observaram vacuolização, necrose e desintegração da membrana basal no intestino médio larval de *Spodoptera littoralis* após tratamento com biossurfactante, demonstrando seu impacto.

Pseudomonas e *Bacillus* são os gêneros bacterianos mais comuns usados para a produção de biossurfactantes. Vários relatórios destacam sua eficácia na produção de biossurfactantes e sua implicação no bem-sucedido controle de fitopatógenos. Por exemplo, Varnier *et al*. (2009) descreveram o Rhamnolipídeo produzido pela Pseudomonas aeruginosa, que aumentou a resposta

imunológica da videira contra o *Botrytis cinerea* após a aplicação. A aplicação de surfactantes inibiu a germinação de esporos e o crescimento de micélio do patógeno.

Outros estudos, como de Kruijt *et al*. (2009), relataram os surfactantes produzidos por *Pseudomonas putida*, os quais impediram o crescimento do patógeno *Phytophthora capsici* em pepino por meio da lise de zoósporos. Nielsen e Sørensen (2003) relataram que os surfactantes lipopeptídeos cíclicos produzidos por *Pseudomonas fluoresecens* possuem propriedades antifúngicas. Houve relatos sobre a aplicação combinada de fenazinas e surfactante ramnolipídico produzido pela cepa *Pseudomonas aeruginosa* PNA1, que apresentou efeito sinérgico contra os patógenos *Pythium splendens* em feijão e *Pythium myriotylum* em coco. Além disso, observou-se vacuolização e desintegração substancial das hifas de Pythium durante análises microscópicas (Perneel *et al*., 2008).

Da mesma forma, D'aes *et al*. (2011) relataram que a fenazina e o lipopeptídeo cíclico produzidos pela cepa *Pseudomonas* CMR12a mostraram um potencial de biocontrole eficaz contra a podridão da raiz de *Rhizoctonia* em feijão. Além disso, Akladious *et al*. (2019) avaliaram o biossurfactantes produzido pela cepa *Bacillus licheniformis*, que controlou significativamente o patógeno *Rhizoctonia solani*, causador da podridão radicular da fava. Hussain *et al*. (2020) investigaram biossurfactantes produzidos por *Bacillus subtilis*, com atividades bionematicidas contra o patógeno *Meloidogyne incognita*, agente causador da galha radicular.

Velho *et al*. (2011) destacaram o surfactante lipopeptídico produzido por *Bacillus*, que demonstrou forte atividade antagônica contra os

patógenos *Aspergillus* sp., *Biopolaris sorokiniana* e *Fusarium* spp. Dentre eles, destaca-se o *Fusarium,* fungo patogênico que afeta uma ampla gama de plantas, incluindo o tomateiro (*Solanum lycopersicum*). É um dos principais agentes causadores da murcha vascular, uma doença que pode levar a perdas significativas na produção de tomates.

3.2. Promoção da Germinação e Desenvolvimento Inicial de Plantas

A utilização de biossurfactantes na germinação de sementes tem recebido atenção como uma estratégia biotecnológica com potencial para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis. Esses compostos possuem propriedades físico-químicas que podem modificar as características das interfaces entre água, solo e superfície das sementes, favorecendo processos relacionados à hidratação e à distribuição da água. Além dessas propriedades, alguns biossurfactantes apresentam atividades biológicas capazes de interferir na interação entre sementes, plantas e microrganismos associados, o que pode contribuir para o estabelecimento inicial das culturas (Matosinhos *et al*., 2023).

Entre os biossurfactantes estudados na agricultura, destacam-se os lipopeptídeos produzidos por espécies do gênero *Bacillus*, principalmente surfactina, iturina e fengicina. A produção dessas moléculas está frequentemente associada à capacidade de promoção do crescimento vegetal e de interação benéfica com as plantas. Entretanto, é importante destacar que os efeitos sobre a germinação podem ocorrer por mecanismos distintos e que a resposta depende da espécie vegetal, da composição do

biossurfactante, da concentração utilizada e da forma de aplicação (Maksimov *et al*., 2020; Shahid *et al*., 2021).

Chaurasia *et al*. (2020) avaliaram um biossurfactante produzido por *Bacillus tequilensis* LK5.4, posteriormente caracterizado principalmente como surfactina, sobre a germinação de sementes de milho (*Zea mays* L.). Os autores observaram que a concentração de 300 µg/mL apresentou a maior taxa de germinação nas condições in vitro. No experimento em vasos, plantas tratadas com a bactéria produtora do biossurfactante apresentaram tempo médio de germinação de 4,4 dias, enquanto as plantas controlem apresentaram média de 8 dias. Além da redução do tempo de germinação, foram observados maiores valores de altura, comprimento foliar, massa fresca e massa seca nas plantas tratadas, indicando potencial de aplicação do microrganismo produtor de biossurfactante na promoção do estabelecimento inicial da cultura.

Resultados semelhantes foram observados por estudos envolvendo lipopeptídeos produzidos por *Bacillus subtilis*. Em pesquisa com a linhagem *B. subtilis* SNW3, o lipopeptídeo produzido apresentou efeito significativo sobre a germinação de diferentes espécies vegetais, incluindo tomate (*Solanum lycopersicum*), pimentão (*Capsicum annuum*), ervilha (*Pisum sativum*) e alface (*Lactuca sativa*). O efeito mais expressivo foi observado no pimentão, no qual a germinação alcançou aproximadamente 51,7% sob tratamento, em comparação com 21,6% no controle. Para o tomate, foi observada germinação de 68,75% na concentração de 0,7 g/100 mL, enquanto o controle apresentou 56,25%. Os autores também observaram aumento da biomassa das plantas tratadas, sugerindo que o efeito do lipopeptídeo pode se estender da germinação ao desenvolvimento inicial das plantas (Umar *et al*., 2021).

Os resultados obtidos por Lima *et al.,* 2026 evidenciam o potencial bioestimulante do lipopeptídeo produzido por *Bacillus licheniformis* UCP 1014 avaliado, uma vez que os três parâmetros analisados, germinação relativa (GR), alongamento radicular (AR) e índice de germinação (IG), apresentaram valores superiores a 100%, indicando que o biossurfactante não apenas foi inócuo às sementes testadas, mas atuou como agente promotor do desenvolvimento inicial das plântulas.

O valor de GR de 109,52% sugere que a presença do lipopeptídeo não comprometeu a viabilidade das sementes, sendo compatível com a hipótese de que biossurfactantes de origem microbiana, ao reduzirem a tensão superficial da água, podem favorecer a absorção de água pelo tegumento seminal, acelerando o processo de embebição e, consequentemente, a emergência da radícula. Esse comportamento está em consonância com relatos da literatura, que apontam que lipopeptídeos como surfactina e outros biossurfactantes da família das iturinas podem atuar de forma benéfica sobre tecidos vegetais em concentrações adequadas, diferentemente do que ocorre com surfactantes sintéticos, frequentemente fitotóxicos (Lima *et al.,* 2026).

O incremento mais expressivo foi observado no alongamento radicular (124,41%), parâmetro que reflete diretamente a capacidade de estabelecimento da plântula no substrato. Esse resultado pode ser atribuído a um possível efeito bioestimulante do composto sobre a divisão e a elongação celular na região meristemática radicular, além de uma provável ação na permeabilidade da membrana plasmática, facilitando a translocação de água e nutrientes essenciais para o crescimento inicial do sistema radicular. O aumento no comprimento das raízes é um indicativo relevante do

ponto de vista agronômico, pois raízes mais desenvolvidas ampliam a superfície de contato com o solo, favorecendo a absorção de água e nutrientes em estágios posteriores do desenvolvimento vegetal (Lima *et al.,* 2026).

O índice de germinação (IG), por integrar tanto a velocidade quanto a uniformidade da germinação, foi o parâmetro que apresentou o maior incremento percentual (136,25%), reforçando a ideia de que o lipopeptídeo não apenas favoreceu a germinação em termos absolutos, mas também acelerou o processo germinativo como um todo. Esse achado é particularmente relevante, pois uma germinação mais rápida e sincronizada está associada a maior vigor de plântulas e menor exposição a condições adversas do ambiente, como patógenos de solo e estresses abióticos durante a fase de estabelecimento (Lima *et al.,* 2026).

Além dos lipopeptídeos produzidos por *Bacillus*, os rhamnolipídios produzidos por *Pseudomonas aeruginosa* também têm sido investigados quanto ao seu efeito sobre a germinação. Em estudo experimental com trigo (*Triticum aestivum*), cevada (*Hordeum vulgare*), quiabo (*Abelmoschus esculentus*), cebola (*Allium cepa*) e alface, concentrações entre 0,25 e 1,00 g/L foram avaliadas. A concentração de 0,25 g/L aumentou significativamente a germinação de quiabo e alface para 100% no quarto dia de avaliação, enquanto os controles apresentaram 60% e 50%, respectivamente. Para cebola, a mesma concentração resultou em 100% de germinação no quinto dia, em comparação com 55% no controle. Entretanto, para trigo e cevada, observou-se atraso inicial na germinação, demonstrando que a resposta ao rhamnolipídio pode ser dependente da espécie vegetal e das condições experimentais. O estudo também indicou uma possível relação entre a proteção

contra fungos patogênicos e o estabelecimento das sementes (Ghazi Faisal, 2024).

Esses resultados são particularmente relevantes porque demonstram que a ação dos biossurfactantes sobre as sementes não é necessariamente uniforme. Enquanto determinadas concentrações podem estimular a germinação, outras podem não produzir efeitos significativos ou até mesmo retardar o processo inicial. Assim, a utilização desses compostos deve considerar uma faixa de concentração adequada para cada espécie e objetivo agronômico. A dependência da resposta em relação à concentração também foi observada no estudo com *B. subtilis* SNW3, no qual os melhores resultados de germinação foram obtidos em concentrações mais elevadas dentro da faixa experimental avaliada (Umar *et al.*, 2021).

Outro aspecto importante na avaliação dos biossurfactantes é a determinação de sua possível fitotoxicidade. Nesse sentido, um estudo recente com biossurfactante produzido por *Bacillus subtilis* UCP 1533 avaliou a germinação de sementes de tomate e alface em diferentes concentrações, utilizando o índice de germinação como parâmetro de segurança. Para o tomate, foram obtidos índices de 80%, 90% e 80% nas concentrações correspondentes a ½ CMC (0,15 $g \cdot L^{-1}$), CMC (0,3 $g \cdot L^{-1}$) e 2× CMC (0,6 $g \cdot L^{-1}$), respectivamente. Para a alface, os valores foram de 83%, 87% e 90%. Os autores consideraram índices iguais ou superiores a 80% como indicativos de ausência de fitotoxicidade, indicando que o biossurfactante apresentou compatibilidade com as sementes avaliadas nas condições do experimento (Albuquerque *et al.*, 2025).

A literatura também apresenta evidências de que microrganismos produtores de lipopeptídeos podem promover a germinação por mecanismos que não dependem exclusivamente da ação direta da molécula isolada. Em estudo com uma bactéria endofítica do gênero *Bacillus* associada à cultura do pimentão, o isolado apresentou produção de ácido indolacético, sideróforos, enzimas e outros fatores relacionados à promoção do crescimento, além da produção de surfactinas, iturinas e fengicinas. O conjunto dessas características esteve associado à promoção da germinação das sementes de pimentão e ao controle de *Colletotrichum siamense*. Esses resultados indicam que, em sistemas envolvendo o microrganismo produtor, os biossurfactantes podem atuar conjuntamente com outros mecanismos de promoção do crescimento vegetal (Bhakat *et al*., 2023).

De maneira semelhante, estudos com bactérias produtoras de lipopeptídeos têm demonstrado potencial para melhorar a germinação e o crescimento inicial de cereais. Um isolado de *Bacillus velezensis* obtido de sementes de trigo foi associado à promoção da germinação e do desenvolvimento de plântulas, além de apresentar atividade de biocontrole contra *Bipolaris sorokiniana*. Embora esses resultados não permitam atribuir exclusivamente o efeito à molécula biossurfactante, eles reforçam a importância dos lipopeptídeos como componentes de sistemas microbianos capazes de atuar simultaneamente na proteção e no estabelecimento das plantas (Zhao *et al*., 2023).

Deve-se considerar, ainda, que a ação dos biossurfactantes sobre sementes pode ocorrer de maneira indireta. A atividade antimicrobiana de determinados lipopeptídeos pode reduzir a presença de microrganismos prejudiciais na superfície ou no

entorno das sementes, favorecendo as condições para germinação e estabelecimento das plântulas. Surfactina, iturina e fengicina apresentam diferentes mecanismos de interação com membranas biológicas e podem atuar contra diversos fitopatógenos. Dessa forma, a melhoria do desempenho das sementes pode resultar tanto de uma interação direta do biossurfactante com a semente quanto da proteção proporcionada contra agentes biológicos prejudiciais (Ongena; Jacques, 2008; Meena; Kanwar, 2015; Saiyam *et al.*, 2024).

Apesar dos resultados promissores, também existem evidências de que biossurfactantes, especialmente em concentrações elevadas e determinadas condições ambientais, podem apresentar efeitos fitotóxicos. Estudos com rhamnolipídios demonstraram que sua presença pode aumentar a fitotoxicidade de contaminantes como óleo diesel em solos, reforçando que a avaliação da concentração e das condições de aplicação é indispensável para garantir a segurança das plantas (Marecik *et al.*, 2012).

Portanto, os estudos disponíveis indicam que os biossurfactantes apresentam potencial para atuar na germinação de sementes por diferentes mecanismos, incluindo a modificação das propriedades de superfície, a facilitação da interação entre água e sementes, a atividade antimicrobiana e a interação com mecanismos relacionados à promoção do crescimento vegetal (Sachdev; Cameotra, 2013; Mnif; Ghribi, 2015; Silva *et al.*, 2024).

Entretanto, os efeitos observados podem variar de acordo com a natureza e a concentração do biossurfactante, o microrganismo produtor, a espécie vegetal e as condições experimentais, sendo relatados tanto efeitos estimulantes quanto inibitórios sobre a germinação (Silva *et al.*, 2024; Pan *et al.*, 2026). Dessa forma, estudos

futuros devem priorizar a padronização das condições experimentais, a comparação entre diferentes classes de biossurfactantes e a avaliação de sua eficácia e segurança em condições de casa de vegetação e campo, contribuindo para determinar com maior precisão o potencial desses compostos como bioinsumos destinados à agricultura sustentável (Sachdev; Cameotra, 2013; Pan *et al.*, 2026).

4. DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA A APLICAÇÃO AGRÍCOLA

Apesar do potencial dos biossurfactantes como ferramentas biotecnológicas para a agricultura sustentável, sua utilização em escala comercial ainda enfrenta importantes limitações. Entre os principais desafios destacam-se os custos relacionados à produção, recuperação e purificação dos compostos, além da variabilidade na produtividade das diferentes linhagens microbianas (Santos *et al.*, 2024).

O custo do processo produtivo está diretamente relacionado ao meio de cultivo, às condições de fermentação e às etapas de recuperação do biossurfactante. Nesse sentido, a utilização de resíduos agroindustriais como fontes alternativas de carbono e nutrientes representa uma estratégia promissora para reduzir os custos de produção. Resíduos como glicerol, melaço, vinhaça, óleos vegetais residuais, soro de leite e subprodutos da indústria alimentícia podem ser utilizados como substratos, permitindo associar a produção do biocomposto ao aproveitamento de materiais de baixo valor econômico (Vučurović *et al.*, 2024).

Outro desafio está relacionado à padronização dos biossurfactantes. A composição e as propriedades dos compostos podem variar de

acordo com a espécie e a linhagem microbiana, composição do meio de cultivo, pH, temperatura, disponibilidade de nutrientes e tempo de fermentação. Essa variabilidade pode dificultar a reprodução dos resultados e a definição de parâmetros padronizados para aplicação agrícola (Karamchandani *et al.*, 2022; Vučurović *et al.*, 2024).

A concentração utilizada também constitui um fator crítico. Embora determinadas concentrações possam estimular a germinação e o crescimento vegetal, concentrações superiores podem produzir efeitos reduzidos ou até mesmo fitotóxicos. Portanto, é fundamental determinar faixas de concentração específicas para cada biossurfactante e cultura agrícola, considerando também a forma e o momento de aplicação (Sachdev; Cameotra, 2013)

Outro aspecto importante consiste na validação dos resultados em condições de campo. Grande parte dos estudos disponíveis é realizada em condições *in vitro*, laboratório ou casa de vegetação. Embora esses experimentos sejam fundamentais para a identificação dos efeitos dos biossurfactantes, as condições encontradas no campo são muito mais complexas, envolvendo variações de temperatura, umidade, características do solo, radiação, microbiota nativa e interação com outros insumos agrícolas (Sachdev; Cameotra, 2013; Karamchandani *et al.*, 2022).

A segurança ambiental também deve ser considerada. Apesar de muitos biossurfactantes apresentarem biodegradabilidade e baixa toxicidade, essas características não devem ser generalizadas para todos os compostos. A avaliação ecotoxicológica deve considerar organismos não alvo, microbiota do solo, organismos aquáticos e

possíveis efeitos sobre as próprias plantas quando aplicados em diferentes concentrações (Briem *et al.*, 2022; Vučurović *et al.*, 2024).

Nesse cenário, pesquisas futuras devem priorizar a seleção de microrganismos altamente produtivos, o emprego de substratos renováveis e de baixo custo, a otimização dos processos fermentativos e o desenvolvimento de métodos eficientes de recuperação e purificação. Estratégias de engenharia metabólica e otimização biotecnológica também podem contribuir para aumentar o rendimento e melhorar as características dos biossurfactantes (Gupta; Gaur; Singh, 2026).

Outra perspectiva importante é o desenvolvimento de formulações agrícolas contendo biossurfactantes, possibilitando sua aplicação de maneira mais estável e eficiente. Formulações destinadas ao tratamento de sementes, aplicação foliar, aplicação no solo e associação com agentes de biocontrole podem ampliar as possibilidades de utilização desses compostos (Goswami; Deka, 2021).

A integração dos biossurfactantes com microrganismos promotores do crescimento vegetal representa igualmente uma perspectiva relevante. A associação entre biossurfactantes e outros metabólitos microbianos pode resultar em bioinsumos capazes de atuar simultaneamente na promoção do crescimento, proteção contra patógenos e melhoria do estabelecimento das plantas (Sachdev; Cameotra, 2013; Karamchandani *et al.*, 2022).

Dessa forma, a consolidação dos biossurfactantes como ferramentas agrícolas dependerá da aproximação entre pesquisas microbiológicas, bioquímicas, agronômicas e industriais. A produção

sustentável, o aproveitamento de resíduos agroindustriais, a redução dos custos e a comprovação da eficiência em condições reais serão fundamentais para transformar o potencial demonstrado em laboratório em tecnologias aplicáveis ao setor agrícola.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os biossurfactantes microbianos apresentam elevado potencial como estratégia biotecnológica para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável, devido à diversidade de propriedades e aplicações que esses compostos apresentam. A capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial, promover emulsificação, apresentar atividade antimicrobiana e interagir com superfícies biológicas possibilita sua utilização em diferentes etapas da produção agrícola.

Na proteção vegetal, biossurfactantes produzidos principalmente por espécies do gênero *Bacillus* demonstram potencial para o controle de diferentes fitopatógenos, podendo contribuir para a redução da dependência de produtos químicos convencionais. Da mesma forma, estudos demonstram que determinados biossurfactantes podem favorecer a germinação, o desenvolvimento radicular e o estabelecimento inicial das plantas, embora esses efeitos dependam da concentração, do composto utilizado, do microrganismo produtor e da espécie vegetal.

A possibilidade de utilização desses compostos como adjuvantes de formulações agrícolas, agentes emulsificantes, promotores da interação planta-microrganismo e ferramentas para processos de remediação amplia ainda mais sua importância no contexto da agricultura sustentável. Além disso, a produção utilizando resíduos

agroindustriais representa uma alternativa relevante para reduzir os custos de produção e promover o aproveitamento de subprodutos, associando inovação biotecnológica à valorização de resíduos.

Entretanto, a aplicação agrícola dos biossurfactantes ainda apresenta limitações relacionadas principalmente aos custos de produção e recuperação, à variabilidade dos compostos, à definição de concentrações adequadas, à segurança ambiental e à necessidade de validação em condições de campo. Assim, embora os resultados disponíveis sejam promissores, ainda são necessários estudos que permitam estabelecer protocolos de produção e aplicação mais eficientes e seguros.

Conclui-se que os biossurfactantes microbianos constituem uma alternativa promissora para o desenvolvimento de bioinsumos agrícolas multifuncionais, com potencial para contribuir simultaneamente para a proteção vegetal, promoção do estabelecimento das culturas e redução dos impactos associados ao uso intensivo de insumos sintéticos. A consolidação dessa tecnologia dependerá da integração entre avanços microbiológicos, otimização da produção, aproveitamento de resíduos agroindustriais e validação agronômica em condições reais de cultivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FACEPE pela concessão da bolsa de doutorado a SHPL, sob o Processo nº IBPG-1322-2.00/22; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo GMCT nº 312242/2022-4); bem como ao Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) pelo suporte técnico; e ao Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e

Materiais de Superfície (CEMACBIOS) da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Pernambuco, Brasil, pela utilização das instalações laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO ELSOUD, Mostafa Mostafa Ahmed. Classification and production of microbial surfactants. In: **Microbial biosurfactants: Preparation, properties and applications.** Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 65-89. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6607-3_4. Acesso em: 20 ago. 2026.

ABREU, Luciana de Paiva Santos *et al*. Alternativa sustentável de uso da *Bacillus amyloliquefaciens* no biocontrole de fungos fitopatogênicos: uma revisão. **Revista de Ciências Ambientais,** v. 16, n. 1, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.18316/rca.v16i1.8339. Acesso em: 20 ago. 2026.

AKLADIOUS, Samia Ageeb; GOMAA, Eman Zakaria; EL-MAHDY, Omima Mohammed. Efficiency of bacterial biosurfactant for biocontrol of *Rhizoctonia solani* (AG-4) causing root rot in faba bean (Vicia faba) plants. **European Journal of Plant Pathology,** v. 153, n. 4, p. 1237-1257, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10658-018-01639-1. Acesso em: 20 ago. 2026.

ALBUQUERQUE, Antônio P. da C. *et al*. Biosurfactant produced by Bacillus subtilis UCP 1533 isolated from the Brazilian semiarid region: Characterization and antimicrobial potential. **Microorganisms,** v. 13, n. 7, p. 1548, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/microorganisms13071548. Acesso em: 20 ago. 2026.

ALVES, Kessia Caroline Souza *et al*. Bacillus subtilis: uma versátil ferramenta biotecnológica. **Scientia Amazonia,** v. 7, n. 2, p. 15-23, 2018.

BAUL, Supradip. Surfactants: Molecular Classification, Interfacial Behavior, Industrial Applications, and Environmental Implications. **Interfacial Behavior, Industrial Applications, and Environmental Implications (January 20, 2026),** 2026.

BELHAJ, Ahmed Fatih *et al*. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology,** v. 10, p. 125-137, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13202-019-0685-y. Acesso em: 20 ago. 2026.

BHAKAT, Ankika *et al*. Plant growth promotion and lipopeptide-mediated biological control of chilli pathogen Colletotrichum siamense by endophytic Bacillus sp. **Physiological and Molecular Plant Pathology,** v. 125, p. 102026, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102026. Acesso em: 20 ago. 2026.

BJERK, Thiago R. *et al*. Biosurfactants: properties and applications in drug delivery, biotechnology and ecotoxicology. **Bioengineering,** v. 8, n. 8, p. 115, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/bioengineering8080115. Acesso em: 20 ago. 2026.

BOGNOLO, Giulio. Biosurfactants as emulsifying agents for hydrocarbons. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,** v. 152, n. 1-2, p. 41-52, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00684-0. Acesso em: 20 ago. 2026.

BORAH, Debajit *et al*. Microbial biosurfactants and their potential applications: an overview. **Microbial biosurfactants: Preparation, properties and applications,** p. 91-116, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6607-3_5. Acesso em: 20 ago. 2026.

BORAH, Siddhartha Narayan; SEN, Suparna; PAKSHIRAJAN, Kannan. Biosurfactants for Enhanced Bioavailability of Micronutrients in Soil: A Sustainable Approach. **Biosurfactants for a Sustainable Future: Production and Applications in the Environment and Biomedicine,** p. 159-181, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781119671022.ch8. Acesso em: 20 ago. 2026.

BRIEM, Ann-Kathrin *et al*. Environmental impacts of biosurfactants from a life cycle perspective: a systematic literature review. **Biosurfactants for the Biobased Economy,** p. 235-269, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/10_2021_194. Acesso em: 20 ago. 2026.

BRITO, Henrique A. *et al*. Enhanced low-cost lipopeptide biosurfactant production by Bacillus velezensis from residual glycerin. **Bioprocess and Biosystems Engineering,** v. 47, n. 9, p. 1555-1570, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00449-024-03051-y. Acesso em: 20 ago. 2026.

CAMEOTRA, Swaranjit Singh; MAKKAR, R. S. Synthesis of biosurfactants in extreme conditions. **Applied microbiology and Biotechnology,** v. 50, n. 5, p. 520-529, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s002530051329. Acesso em: 20 ago. 2026.

CAMPOS, Jenyffer Medeiros *et al*. Microbial biosurfactants as additives for food industries. **Biotechnology progress,** v. 29, n. 5, p.

1097-1108, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1002/btpr.1796. Acesso em: 20 ago. 2026.

CHAURASIA, Lalit K. *et al.* Influence of biosurfactant producing Bacillus tequilensis LK5. 4 isolate of kinema, a fermented soybean, on seed germination and growth of maize (Zea mays L.). **3 Biotech,** v. 10, n. 7, p. 297, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13205-020-02281-7. Acesso em: 20 ago. 2026.

CHRISTOFI, N.; IVSHINA, I. B. Microbial surfactants and their use in field studies of soil remediation. **Journal of Applied Microbiology,** v. 93, n. 6, p. 915-929, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01774.x. Acesso em: 20 ago. 2026.

CIRIGLIANO, Michael C.; CARMAN, George M. Isolation of a bioemulsifier from Candida lipolytica. **Applied and environmental microbiology,** v. 48, n. 4, p. 747-750, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1128/aem.48.4.747-750.1984. Acesso em: 20 ago. 2026.

COOPER, D. G. et al. Enhanced production of surfactin from Bacillus subtilis by continuous product removal and metal cation additions. **Applied and Environmental microbiology,** v. 42, n. 3, p. 408-412, 1981. Disponível em: https://doi.org/10.1128/aem.42.3.408-412.1981. Acesso em: 20 ago. 2026.

COOPER, D. G.; PADDOCK, D.A. Production of a biosurfactant from Torulopsis bombicola. **Applied and environmental microbiology,** v. 47, n. 1, p. 173-176, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1128/aem.47.1.173-176.1984. Acesso em: 20 ago. 2026.

COSENDEY, Veridyanna Malaquias Pinto; DO NASCIMENTO, Amanda Cristina Moreira; FRANZINI, Cristina Maria. Desenvolvimento de cosméticos veterinários para higiene e beleza de cães de pelagem clara e análises macroscópica e microscópica dos fios. **Brazilian Journal of Development,** v. 7, n. 5, p. 51859-51870, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30293. Acesso em: 20 ago. 2026.

CROUZET, Jérôme *et al*. Biosurfactants in plant protection against diseases: Rhamnolipids and lipopeptides case study. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,** v. 8, p. 1014, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01014. Acesso em: 20 ago. 2026.

D'AES, Jolien *et al*. Biological control of Rhizoctonia root rot on bean by phenazine-and cyclic lipopeptide-producing Pseudomonas CMR12a. **Phytopathology,** v. 101, n. 8, p. 996-1004, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-10-0315. Acesso em: 20 ago. 2026.

DA SILVA LIRA, Isabela Cristina Alvares *et al*. Microbial biosurfactant: Production, characterization and application as a food emulsions. **Research, Society and Development,** v. 11, n. 5, p. e44111528339-e44111528339, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28339. Acesso em: 20 ago. 2026.

DA SILVA, Gessele Almeida; ORLANDA, José Fábio França. Biodegradação do organoclorado endosulfan por nanoemulsões contendo biossurfactantes rizobacterianos. **Caderno Pedagógico,** v. 22, n. 7, p. e16235-e16235, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.54033/cadpedv22n7-113. Acesso em: 20 ago. 2026.

DA SILVA, Leonardo Mendes. Impactos dos detergentes no meio ambiente: evidências de um estudo ecotoxicológico. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação,** v. 9, n. 2, p.

1429-1441, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.51891/rease.v9i2.8883. Acesso em: 20 ago. 2026.

DE LIMA, Pedro Soares *et al.* USO DE BIOINSUMOS NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO SOBRE SUSTENTABILIDADE E PROCESSOS QUÍMICOS DO SOLO. **Revista Tópicos,** v. 4, n. 34, p. 1-30, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781365493. Acesso em: 20 ago. 2026.

DE OLIVEIRA FELIPE, Lorena; DE CÁSSIA DIAS, Sandra. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova na Escola,** v. 39, n. 3, 2017. Disponível em: http://doi.org/10.21577/0104-8899.20160079. Acesso em: 20 ago. 2026.

DE OLIVEIRA SCHMIDT, Vanessa Kristine *et al.* Biosurfactant inducers for enhanced production of surfactin and rhamnolipids: an overview. **World Journal of Microbiology and Biotechnology,** v. 37, n. 2, p. 21, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11274-020-02970-8. Acesso em: 20 ago. 2026.

DESAI, Jitendra D.; BANAT, Ibrahim M. Microbial production of surfactants and their commercial potential. **Microbiology and Molecular biology reviews,** v. 61, n. 1, p. 47-64, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1128/mmbr.61.1.47-64.1997. Acesso em: 20 ago. 2026.

DRAKONTIS, Constantina Eleni; AMIN, Samiul. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. **Current Opinion in Colloid & Interface Science,** v. 48, p. 77-90, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.03.013. Acesso em: 28 out. 2026.

EDOSA, Tariku Tesfaye *et al*. Biosurfactants: production and potential application in insect pest management. **Trends Entomol,** v. 14, n. 79, p. 79-87, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.31300/tent.14.2018.79-87?sid=semanticscholar. Acesso em: 20 ago. 2026.

FARIAS, Charles Bronzo B. *et al*. Production of green surfactants: Market prospects. **Electronic Journal of Biotechnology,** v. 51, p. 28-39, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.02.002. Acesso em: 20 ago. 2026.

FERNANDES, Paulo André Vicente *et al*. Antimicrobial activity of surfactants produced by Bacillus subtilis R14 against multidrug-resistant bacteria. **Brazilian Journal of Microbiology,** v. 38, p. 704-709, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-83822007000400022. Acesso em: 20 ago. 2026.

FERREIRA, Patricia Garcia *et al*. Aqui tem Química: Parte VII. Tensoativos em Produtos Comerciais. **Revista Virtual de Química,** v. 15, p. 423, 2023. Disponível em: http://doi.org/10.21577/1984-6835.20220105. Acesso em: 20 ago. 2026.

FLASZ, A. *et al*. A comparative study of the toxicity of a synthetic surfactant and one produced by Pseudomonas aeruginosa ATCC 55925. **Medical Science Research,** v. 26, n. 3, p. 181-185, 1998.

FOY, C. L. Adjuvants: terminology, classification, and mode of action. In: **Adjuvants and agrochemicals.** CRC Press, 2018. p. 1-15.

GAUR, Vivek Kumar *et al*. Biosynthesis and characterization of sophorolipid biosurfactant by Candida spp.: application as food emulsifier and antibacterial agent. **Bioresource technology,** v. 285,

p. 121314, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121314. Acesso em: 20 ago. 2026.

GEETHA, S. J.; BANAT, Ibrahim M.; JOSHI, Sanket J. Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,** v. 14, p. 23-32, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.01.010. Acesso em: 20 ago. 2026.

GHARAI, Mousumi et al. Agro-Waste: A Potential Bio-Surfactant Source. **Agroindustrial Waste Management: Towards a Sustainable Future,** p. 357-392, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781119620303.ch9. Acesso em: 28 out. 2026.

GHAZI FAISAL, Zeena. Promoting seed germination of some plant species by rhamnolipid produced by Pseudomonas aeruginosa. **Scientifica,** v. 2024, n. 1, p. 7137413, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2024/7137413. Acesso em: 20 ago. 2026.

GILL, Harsimran Kaur; GARG, Harsh. Pesticide: environmental impacts and management strategies. **Pesticides-toxic aspects,** v. 8, n. 187, p. 10-5772, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.5772/57399. Acesso em: 20 ago. 2026.

GOMES, Izabella Braga. Mapeamento tecnológico de Biossurfactantes para fins cosmético. 2025.

GOSWAMI, Madhurankhi; DEKA, Suresh. Biosurfactant-mediated biocontrol of pathogenic microbes of crop plants. **Biosurfactants for a sustainable future: production and applications in the environment and biomedicine,** p. 491-509, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781119671022.ch22. Acesso em: 20 ago. 2026.

GROENEWALD, Marizeth *et al*. Yarrowia lipolytica: safety assessment of an oleaginous yeast with a great industrial potential. **Critical reviews in microbiology,** v. 40, n. 3, p. 187-206, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3109/1040841X.2013.770386. Acesso em: 20 ago. 2026.

GUPTA, Pallavi; GAUR, Prachi; SINGH, Rachana. Biosurfactant Production From Agro-Industrial and Food Waste: A Sustainable Approach to Waste Management. **Biotechnology and applied biochemistry,** v. 73, n. 2, p. 927-945, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bab.70058. Acesso em: 20 ago. 2026.

GUZMÁN, Ollin Edmundo Blanco *et al*. Puntos Cuánticos De Sulfuro De Zinc Dopados Con Manganeso: Síntesis, Aplicaciones Y Perspectivas A Futuro. **Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología,** v. 6, n. 10, p. 41-52, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.61820/esc70d80. Acesso em: 20 ago. 2026.

HADDAD, Namir IA; WANG, Ji; MU, Bozhong. Isolation and characterization of a biosurfactant producing strain, Brevibacilis brevis HOB1. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology,** v. 35, n. 12, p. 1597-1604, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10295-008-0403-0. Acesso em: 20 ago. 2026.

HOROWITZ, Sarah; GILBERT, J. N.; GRIFFIN, W. Michael. Isolation and characterization of a surfactant produced by Bacillus licheniformis 86. **Journal of industrial microbiology,** v. 6, n. 4, p. 243-248, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF01575868. Acesso em: 20 ago. 2026.

HUANG, Hui *et al*. Towards physicochemical and biological effects on detachment and activity recovery of aging biofilm by enzyme and

surfactant treatments. **Bioresource Technology,** v. 247, p. 319-326, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.082. Acesso em: 20 ago. 2026.

HUSSAIN, Touseef *et al*. Bio-nematicidal activities by culture filtrate of Bacillus subtilis HussainT-AMU: New promising biosurfactant bioagent for the management of Root Galling caused by Meloidogyne incognita. **Vegetos,** v. 33, n. 2, p. 229-238, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42535-020-00099-5. Acesso em: 20 ago. 2026.

JACINTO, Alcides Pereira. Mapeamento de especialidades químicas que utilizam biossurfacatantes em produtos de cuidados pessoais como alternativa mais sustentável. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental,** v. 11, n. 3, p. 157-175, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.59306/rgsa.v11e32022157-175. Acesso em: 20 ago. 2026.

JIBRIN, Mustafa O. *et al*. Surfactants in plant disease management: A brief review and case studies. **Plant Pathology,** v. 70, n. 3, p. 495-510, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/ppa.13318. Acesso em: 20 ago. 2026.

KAKINUMA, Atsushi *et al*. Determination of the location of lactone ring in surfactin. **Agricultural and Biological Chemistry,** v. 33, n. 10, p. 1523-1524, 1969. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00021369.1969.10859499. Acesso em: 20 ago. 2026.

KÄPPELI, O.; FIECHTER, A. Component from the cell surface of the hydrocarbon-utilizing yeast Candida tropicalis with possible relation to hydrocarbon transport. **Journal of Bacteriology,** v. 131, n. 3, p. 917-

921, 1977. Disponível em: https://doi.org/10.1128/jb.131.3.917-921.1977. Acesso em: 20 ago. 2026.

KÄPPELI, O.; FINNERTY, W. R. Partition of alkane by an extracellular vesicle derived from hexadecane-grown Acinetobacter. **Journal of bacteriology,** v. 140, n. 2, p. 707-712, 1979. Disponível em: https://doi.org/10.1128/jb.140.2.707-712.1979. Acesso em: 20 ago. 2026.

KARAMCHANDANI, Bhoomika M. *et al.* Biosurfactants' multifarious functional potential for sustainable agricultural practices. Frontiers in bioengineering and biotechnology, v. 10, p. 1047279, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1047279. Acesso em: 20 ago. 2026.

KHEDHER, Saoussen Ben *et al.* Combinatorial effect of Bacillus amyloliquefaciens AG1 biosurfactant and Bacillus thuringiensis Vip3Aa16 toxin on Spodoptera littoralis larvae. **Journal of invertebrate pathology,** v. 144, p. 11-17, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jip.2017.01.006. Acesso em: 20 ago. 2026.

KIM, Pyoung Il *et al.* Production of biosurfactant lipopeptides Iturin A, fengycin and surfactin A from Bacillus subtilis CMB32 for control of Colletotrichum gloeosporioides. **J Microbiol Biotechnol,** v. 20, n. 1, p. 138-145, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.4014/jmb.0905.05007. Acesso em: 20 ago. 2026.

KOSARIC, Naim; SUKAN, Fazilet Vardar. **Biosurfactants: production: properties: applications.** CRC Press, 2010.

KRUIJT, Marco; TRAN, Ha; RAAIJMAKERS, Jos M. Functional, genetic and chemical characterization of biosurfactants produced by plant growth-promoting Pseudomonas putida 267. **Journal of Applied**

Microbiology, v. 107, n. 2, p. 546-556, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04244.x. Acesso em: 20 ago. 2026.

KUMAR, Ajay *et al.* Endophytic microbiome in the carposphere and its importance in fruit physiology and pathology. In: **Postharvest Pathology: Next Generation Solutions to Reducing Losses and Enhancing Safety.** Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 73-88. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56530-5_5. Acesso em: 20 ago. 2026.

KUMAR, Ajay *et al.* Microbial biosurfactant: a new frontier for sustainable agriculture and pharmaceutical industries. Antioxidants, v. 10, n. 9, p. 1472, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/antiox10091472. Acesso em: 20 ago. 2026.

KUMAR, Ajay; DROBY, Samir (Ed.). **Food security and plant disease management.** Woodhead Publishing, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/C2019-0-03610-2. Acesso em: 20 ago. 2026.

KUMAR, P. Narendra *et al.* Statistical optimization of antifungal iturin A production from Bacillus amyloliquefaciens RHNK22 using agro-industrial wastes. **Saudi Journal of Biological Sciences,** v. 24, n. 7, p. 1722-1740, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.014. Acesso em: 20 ago. 2026.

KUMAR, P. Senthil *et al.* A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: Types, production, properties and its application in the bioremediation process. **Journal of Hazardous Materials,** v. 407, p. 124827, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124827. Acesso em: 20 ago. 2026.

LIMA, R. A. *et al*. Biosurfactants production by Candida glabrata strains using industrial wastes as carbon and nitrogen sources. In: **Microbes in Applied Research: Current Advances and Challenges.** 2012. p. 362-366. Disponível em: https://doi.org/10.1142/9789814405041_0073. Acesso em: 20 ago. 2026.

Lima, S. H. P. de, Silva, I. N. F. da, Souza, A. F. de, Rodríguez, D. M., Gusmao, N. B. de, Fernandes, J. G., & Takaki, G. M. de C.-. (2026). OPTIMIZATION AND CHARACTERIZATION OF LIPOPEPTIDE PRODUCED BY BACILLUS LICHENIFORMIS UCP1014 AND POTENTIAL BIOSTIMULANT ON GERMINATION OF TOMATO SEEDS. **Artefactum - Revista De Estudos Interdisciplinares,** 25(10).Disponível em: https://doi.org/10.23900/artefactum.v25i10.3938. Acesso em: 21 out. 2026.

LIN, Sung-Chyr. Biosurfactants: recent advances. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology,** v. 66, n. 2, p. 109-120, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199606)66:2<109::AID-JCTB477>3.0.CO;2-2. Acesso em: 20 ago. 2026.

LOURENÇO, Luís Antonio *et al*. Produção de biossurfactantes fúngicos por cultivo em estado sólido e submerso utilizando substratos hidrofóbicos. 2017.

MAKSIMOV, I. V. *et al*. Prospects and applications of lipopeptide-producing bacteria for plant protection. **Applied biochemistry and microbiology,** v. 56, n. 1, p. 15-28, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1134/S0003683820010135. Acesso em: 20 ago. 2026.

MARECIK, Roman *et al*. Rhamnolipids increase the phytotoxicity of diesel oil towards four common plant species in a terrestrial environment. **Water, Air, & Soil Pollution,** v. 223, n. 7, p. 4275-4282, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11270-012-1190-9. Acesso em: 20 ago. 2026.

MATOSINHOS, Renato Dias *et al*. The biosurfactants mannosylerythritol lipids (mels) as stimulant on the germination of Lactuca sativa L. **Agriculture,** v. 13, n. 9, p. 1646, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriculture13091646. Acesso em: 20 ago. 2026.

MEENA, Khem Raj; KANWAR, Shamsher S. Lipopeptides as the antifungal and antibacterial agents: applications in food safety and therapeutics. **BioMed research international,** v. 2015, n. 1, p. 473050, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2015/473050. Acesso em: 20 ago. 2026.

MIZUMOTO, Shinji; SHODA, Makoto. Medium optimization of antifungal lipopeptide, iturin A, production by Bacillus subtilis in solid-state fermentation by response surface methodology. **Applied Microbiology and Biotechnology,** v. 76, n. 1, p. 101-108, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00253-007-0994-9. Acesso em: 20 ago. 2026.

MNIF, Inès; GHRIBI, Dhouha. Review lipopeptides biosurfactants: mean classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications. **Peptide Science,** v. 104, n. 3, p. 129-147, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bip.22630. Acesso em: 20 ago. 2026.

MOHANTY, Swayansu Sabyasachi *et al*. A critical review on various feedstocks as sustainable substrates for biosurfactants production: a

way towards cleaner production. **Microbial cell factories,** v. 20, n. 1, p. 120, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12934-021-01613-3. Acesso em: 20 ago. 2026.

MORAIS, Renara Kariny Santos de *et al*. Produção de biossurfactantes a partir de substratos de baixo custo. 2012.

MOSTAFALOU, Sara; ABDOLLAHI, Mohammad. Pesticides and human chronic diseases: evidences, mechanisms, and perspectives. **Toxicology and applied pharmacology,** v. 268, n. 2, p. 157-177, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.taap.2013.01.025. Acesso em: 20 ago. 2026.

NAGY, Géssika Marçal *et al*. Produção de biossurfactante de baixo custo a partir de resíduos agroindustriais. 2018.

NIELSEN, Tommy Harder; SØRENSEN, Jan. Production of cyclic lipopeptides by Pseudomonas fluorescens strains in bulk soil and in the sugar beet rhizosphere. **Applied and environmental microbiology,** v. 69, n. 2, p. 861-868, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1128/AEM.69.2.861-868.2003. Acesso em: 20 ago. 2026.

NITSCHKE, Marcia; PASTORE, Gláucia Maria. Biossurfactantes: propriedades e aplicações. **Química nova,** v. 25, n. 5, p. 772-776, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000500013. Acesso em: 20 ago. 2026.

OLIVEIRA, D. W. F. *et al*. Kinetic study of biosurfactant production by Bacillus subtilis LAMI005 grown in clarified cashew apple juice. **Journal of Biotechnology,** v. 150, p. 421-422, 2010. Disponível

em: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.06.011. Acesso em: 20 ago. 2026.

ONGENA, Marc; JACQUES, Philippe. Bacillus lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. **Trends in microbiology,** v. 16, n. 3, p. 115-125, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009. Acesso em: 20 ago. 2026.

PALMA-BAUTISTA, Candelario *et al.* Can control of glyphosate susceptible and resistant Conyza sumatrensis populations be dependent on the herbicide formulation or adjuvants?. **Agronomy,** v. 10, n. 10, p. 1599, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy10101599. Acesso em: 20 ago. 2026.

PAN, Yun *et al.* Bacillus-Derived Lipopeptides as Green Biosurfactants: Structures, Functions, Production, and Safety for Sustainable Applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,** v. 25, n. 3, p. e70508, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1111/1541-4337.70508. Acesso em: 20 ago. 2026.

PATEL, Mukul N.; GOPINATHAN, Karumathil P. Lysozyme-sensitive bioemulsifier for immiscible organophosphorus pesticides. **Applied and environmental microbiology,** v. 52, n. 5, p. 1224-1226, 1986. Disponível em: https://doi.org/10.1128/aem.52.5.1224-1226.1986. Acesso em: 20 ago. 2026.

PENHA, Rafaela O. *et al.* Bacillus lipopeptides as powerful pest control agents for a more sustainable and healthy agriculture: recent studies and innovations. **Planta,** v. 251, n. 3, p. 70, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00425-020-03357-7. Acesso em: 20 ago. 2026.

PEREIRA, Caroline Nascimento; DE CASTRO, César Nunes. **Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural.** Texto para Discussão, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.38116/td2765. Acesso em: 20 ago. 2026.

PERNEEL, Maaike *et al*. Phenazines and biosurfactants interact in the biological control of soil-borne diseases caused by Pythium spp. **Environmental Microbiology,** v. 10, n. 3, p. 778-788, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01501.x. Acesso em: 20 ago. 2026.

PREININGER, Claudia *et al*. Concepts and applications of foliar spray for microbial inoculants. **Applied microbiology and biotechnology,** v. 102, n. 17, p. 7265-7282, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00253-018-9173-4. Acesso em: 20 ago. 2026.

REBELLO, Sharrel *et al*. Surfactants: chemistry, toxicity and remediation. In: **Pollutant diseases, remediation and recycling.** Cham: Springer International Publishing, 2013. p. 277-320. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-02387-8_5. Acesso em: 20 ago. 2026.

REISER, J. *et al*. Advances in Applied Biotechnology Series. 1989.

ROSENBERG, Eugene; RON, Eliora Z. High-and low-molecular-mass microbial surfactants. **Applied microbiology and biotechnology,** v. 52, n. 2, p. 154-162, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s002530051502. Acesso em: 20 ago. 2026.

RULLI, Macarena María *et al*. Production of a microbial emulsifier with biotechnological potential for environmental

applications. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,** v. 174, p. 459-466, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.11.052. Acesso em: 20 ago. 2026.

RYCKAERT, Bert *et al*. Quantitative determination of the influence of adjuvants on foliar fungicide residues. **Crop Protection,** v. 26, n. 10, p. 1589-1594, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.02.011. Acesso em: 20 ago. 2026.

SACHDEV, Dhara P.; CAMEOTRA, Swaranjit S. Biosurfactants in agriculture. **Applied microbiology and biotechnology,** v. 97, n. 3, p. 1005-1016, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00253-012-4641-8. Acesso em: 20 ago. 2026.

SAIYAM, Diksha *et al*. Lipopeptides from Bacillus: Unveiling biotechnological prospects—Sources, properties, and diverse applications. **Brazilian Journal of Microbiology,** v. 55, n. 1, p. 281-295, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42770-023-01228-3. Acesso em: 20 ago. 2026.

SANTOS, Brenda Lohanny Passos *et al*. Unlocking the potential of biosurfactants: Production, applications, market challenges, and opportunities for agro-industrial waste valorization. **Environmental Research,** v. 244, p. 117879, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117879. Acesso em: 20 ago. 2026.

SANTOS, Danyelle Khadydja F. *et al*. Biosurfactant production from Candida lipolytica in bioreactor and evaluation of its toxicity for application as a bioremediation agent. **Process Biochemistry,** v. 54, p. 20-27, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.12.020. Acesso em: 20 ago. 2026.

SARUBBO, L. A. *et al*. Some aspects of heavy metals contamination remediation and role of biosurfactants. **Chemistry and Ecology,** v. 31, n. 8, p. 707-723, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1080/02757540.2015.1095293. Acesso em: 20 ago. 2026.

SHAHID, Izzah *et al*. Profiling of metabolites of Bacillus spp. and their application in sustainable plant growth promotion and biocontrol. **Frontiers in Sustainable Food Systems,** v. 5, p. 605195, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.605195. Acesso em: 20 ago. 2026.

SILVA, Maria da Gloria C. *et al*. Biosurfactants: promising biomolecules for agricultural applications. **Sustainability,** v. 16, n. 1, p. 449, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su16010449. Acesso em: 20 ago. 2026.

SILVA, Yali Alves *et al*. Biossurfactantes: Uma alternativa sustentável no combate à resistência antimicrobiana. **Sustentabilidade, Tecnologia e Meio Ambiente: Tópicos Atuais em Pesquisa,** v. 4, p. 8-28, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.37885/241218397. Acesso em: 20 ago. 2026.

SINGH, Vipin Kumar; SINGH, Amit Kishore; KUMAR, Ajay. Disease management of tomato through PGPB: current trends and future perspective. **3 Biotech,** v. 7, n. 4, p. 255, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13205-017-0896-1. Acesso em: 20 ago. 2026.

STANGHELLINI, Michael E.; MILLER, Raina M. Biosurfactants: their identity and potential efficacy in the biological control of zoosporic plant pathogens. **Plant disease,** v. 81, n. 1, p. 4-12, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.1.4. Acesso em: 20 ago. 2026.

SUNDARAM, Thanigaivel et al. Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. **Frontiers in microbiology,** v. 15, p. 1357302, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1357302. Acesso em: 28 out. 2026.

THAVASI, Rengathavasi; MARCHANT, Roger; BANAT, Ibrahim M. 15 Biosurfactant Applications in Agriculture. **Biosurfactants: Production and Utilization—Processes, Technologies, and Economics,** v. 159, p. 313, 2014.

UMAR, Aiman *et al*. Low-cost production and application of lipopeptide for bioremediation and plant growth by Bacillus subtilis SNW3. **AMB Express,** v. 11, n. 1, p. 165, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13568-021-01327-0. Acesso em: 20 ago. 2026.

VAN HAMME, Jonathan D.; SINGH, Ajay; WARD, Owen P. Physiological aspects: Part 1 in a series of papers devoted to surfactants in microbiology and biotechnology. **Biotechnology advances,** v. 24, n. 6, p. 604-620, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.08.001. Acesso em: 20 ago. 2026.

VARJANI, Sunita J.; UPASANI, Vivek N. Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. **Bioresource technology,** v. 232, p. 389-397, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.047. Acesso em: 20 ago. 2026.

VARNIER, ANNE-LISE *et al*. Bacterial rhamnolipids are novel MAMPs conferring resistance to Botrytis cinerea in grapevine. **Plant, cell & environment,** v. 32, n. 2, p. 178-193, 2009. Disponível em:

https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01911.x. Acesso em: 20 ago. 2026.

VELHO, R. V. *et al*. Production of lipopeptides among Bacillus strains showing growth inhibition of phytopathogenic fungi. **Folia Microbiologica,** v. 56, n. 4, p. 297-303, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12223-011-0056-7. Acesso em: 20 ago. 2026.

VOLPATO, Caroline Portilho Trentini *et al*. Utilização de glicerol como substrato na produção de biossurfactante. **Research, Society and Development,** v. 11, n. 16, p. e474111638391-e474111638391, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38391. Acesso em: 20 ago. 2026.

VUČUROVIĆ, Damjan *et al*. Biotechnological utilization of agro-industrial residues and by-products—Sustainable production of biosurfactants. **Foods,** v. 13, n. 5, p. 711, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/foods13050711. Acesso em: 20 ago. 2026.

YUN, Dong Cheon *et al*. Identification of surfactin as an aphicidal metabolite produced by Bacillus amyloliquefaciens G1. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry,** v. 56, n. 6, p. 751-753, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13765-013-3238-y. Acesso em: 20 ago. 2026.

ZHAO, Tianxin *et al*. A seed-endophytic bacterium NEAU-242-2: Isolation, identification, and potential as a biocontrol agent against Bipolaris sorokiniana. **Biological Control,** v. 185, p. 105312, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105312. Acesso em: 20 ago. 2026.

[1] Discente do Programa de Doutorado em Biotecnologia – Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO) da Universidade Federal Rural de Pernambuco. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Discente do Programa de Doutorado em Desenvolvimento de Processos Ambientais (PPGDPA) da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais (PPGDPA) da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Extensionista rural e Pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[5] Professora Titular, Escola de Tecnologia e Comunicação, CEMACBIOS, Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail