

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GUSTAVO PASSARINI MORETTI

**O PAPEL DOS PESTICIDAS NATURAIS NA AGRICULTURA  
SUSTENTÁVEL**

São Carlos  
2025

GUSTAVO PASSARINI MORETTI

**O PAPEL DOS PESTICIDAS NATURAIS NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof Fábio Bentes Freire.

São Carlos  
2025

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa a finalização de um ciclo que aos poucos fui me acostumando que realmente está se encerrando. Com ele todo o apoio e participação essencial de muitas pessoas as quais eu agradeço imensamente e levarei comigo por todos os dias da minha vida.

Inicialmente, no âmbito familiar, agradeço ao meu primo Edivaldo Jr como referência mais próxima, à minha tia Eunice por ser a referência acadêmica e de papos profundos. A toda a família de maneira geral, mesmo que mínimo apoio e interesse ao longo da minha jornada. Aos mais importantes, meus pais e meu irmão, por sempre ter me dado muita liberdade e por jamais terem mostrado um mínimo sinal de desconfiança em minhas capacidades e vontades, devo a vocês dois tudo e ao meu irmão apenas a plena certeza que vou me tornar a melhor e maior inspiração que conseguir do fundo do meu coração, para que ele tenha a melhor referência que poderia o mais próximo possível.

Aos meus amigos de infância, agradeço por sempre ter estado comigo e mesmo a distância e o tempo, e mesmo que eu seja horrível em me comunicar pelo WhatsApp, o sentimento que temos não muda. E é assim que espero levar a vida toda. Em especial ao João Lucas Volpatto e João Pedro Thomé.

Ao longo da jornada, no âmbito Maringá, agradeço a Universidade Estadual de Maringá (UEM) por, apesar de não me sentir em casa, foi minha primeira experiência de universidade e onde comecei a construir minha maturidade. Por lá, naquele um ano, agradeço aos meus amigos e colegas de sala pelo ano de 2018, em especial aos amigos Leonardo Lustosa, Gabriel Aquino e Rafael Manzini, faziam tudo ser muito mais leve.

Em São Carlos, agradeço ao Futebol UFSCar e a todos que já jogaram por lá que de alguma forma tive contato. Assim como tantos outros do futebol, encontrava nos treinos de terça e quinta no almoço a alegria da semana, muitas vezes. Além disso, os companheiros de campo se tornaram meus melhores amigos. Aqui, cito em especial o “Futevôlei UFSCar” e todos seus componentes.

No âmbito engenharia química, aos meus amigos de curso, os quais foram ótimas companhias durante a graduação e à Atlética de Engenharia Química UFSCar (AEQ) que me permitiu desenvolver habilidades valorizadas no mercado de trabalho.

Não poderia deixar de agradecer a alguns professores, os quais mesmo eu não tendo tanto contato, fizeram de algumas aulas especiais, eram atenciosos ou simplesmente se mostraram exemplo e se tornaram referências as quais internamente eu admirava. Cito aqui Maria do

Carmo, Fábio Freire, Vádila Bettega, Rosineide Gomes, Alberto Colli, Felipe Furlan e Caliane Costa.

Preciso em especial também agradecer a dois amigos, os quais de alguma forma eu tenho a convicção de que a vida de alguma forma juntou nós três na mesma trajetória e curso, e obviamente foi muito generosa. Com eles partilhei as piores e melhores fases da minha vida, todos os títulos possíveis e as maiores e melhores risadas da graduação. Arthur Bastos e Rafael Romani, espero levá-los para a vida toda.

Por fim, mas de maneira alguma menos importante, agradeço a República Deus Tá Vendo e todos seus moradores e agregados. Foi nessa casa onde tive meu maior amadurecimento, aprendi a lidar com pessoas de fato, aprendi a amar e se importar com pessoas muito diferentes de quem eu sou e ver que cada um tem seu jeitinho e é especial da sua forma. Apesar das diferenças, sempre o sentimento de união e sermos um só, muito rapidamente entendi que não estava partilhando casa com alguns amigos, viraram meus irmãos. Sorte a minha de um dia bêbado ter dito ao Felipe Casseb que achava que nos daríamos bem em um rep.

## RESUMO

A agricultura convencional, baseada no uso intensivo de insumos químicos, tem gerado impactos ambientais e riscos à saúde humana, como a contaminação do solo e da água, além da resistência de pragas aos pesticidas sintéticos. Diante desses desafios, a agricultura sustentável surge como uma alternativa viável, promovendo práticas que equilibram produtividade, conservação dos recursos naturais e segurança alimentar. Nesse contexto, os biopesticidas têm se consolidado como uma ferramenta essencial para reduzir a dependência de agroquímicos sintéticos, oferecendo soluções eficazes e menos agressivas ao meio ambiente. Este trabalho teve como objetivo analisar o papel dos biopesticidas na agricultura sustentável, destacando sua importância, benefícios e desafios. Para isso, foram abordados conceitos fundamentais, a problemática dos fertilizantes químicos, a evolução dos biopesticidas e suas classificações, além das dificuldades e oportunidades relacionadas à produção em larga escala e à aceitação desses produtos no mercado. Também foram discutidos exemplos de biopesticidas amplamente utilizados, como *Trichoderma* e *Bacillus thuringiensis*, demonstrando sua viabilidade técnica e econômica. Os resultados indicam que o mercado de biopesticidas vem crescendo significativamente, impulsionado por exigências regulatórias mais rigorosas, avanços tecnológicos e pela demanda global por práticas agrícolas mais sustentáveis. No Brasil, a adoção desses produtos já é uma realidade, com perspectivas de expansão para os próximos anos. A transição para um modelo produtivo menos dependente de pesticidas sintéticos é um caminho sem volta, alinhado às exigências globais de sustentabilidade e às necessidades de um agronegócio mais eficiente e responsável. Pode-se concluir que os biopesticidas são uma alternativa essencial para o futuro da agricultura, contribuindo para a segurança alimentar e para a preservação ambiental.

**Palavras-chave:** Agricultura Sustentável, Biopesticidas, Agroquímicos, Produção Sustentável, Fertilizantes Naturais, Crescimento de Mercado.

## ABSTRACT

Conventional agriculture, based on the intensive use of chemical inputs, has led to environmental impacts and health risks, such as soil and water contamination, as well as pest resistance to synthetic pesticides. Faced with these challenges, sustainable agriculture emerges as a viable alternative, promoting practices that balance productivity, natural resource conservation, and food security. In this context, biopesticides have become an essential tool in reducing dependence on synthetic agrochemicals, offering effective and environmentally friendly solutions. This study aimed to analyze the role of biopesticides in sustainable agriculture, highlighting their importance, benefits, and challenges. To achieve this, fundamental concepts were addressed, along with the problems related to chemical fertilizers, the evolution and classification of biopesticides, as well as the difficulties and opportunities associated with large-scale production and market acceptance. Additionally, widely used biopesticides, such as *Trichoderma* and *Bacillus thuringiensis*, were discussed, demonstrating their technical and economic feasibility. The findings indicate that the biopesticide market has been growing significantly, driven by stricter regulatory requirements, technological advancements, and the global demand for more sustainable agricultural practices. In Brazil, the adoption of these products is already a reality, with promising prospects for expansion in the coming years. The transition to a production model less dependent on synthetic pesticides is an irreversible path, aligned with global sustainability demands and the need for a more efficient and responsible agribusiness. It can be concluded that biopesticides are an essential alternative for the future of agriculture, contributing to food security and environmental preservation.

**Keywords:** Sustainable Agriculture, Biopesticides, Agrochemicals, Sustainable Production, Natural Fertilizers, Market Growth.

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

TABELA 1 - Comparação de área plantada com alimentos orgânicos ao redor do mundo entre 2000 e 2006	12
FIGURA 1 - Ilustração de frasco de Piretrina, biopesticida extraído da flor de crisântemo	18
FIGURA 2 - Representação de países que cultivam plantas com utilização da bactéria <i>Bacillus thuringiensis</i> (B.t).	19
FIGURA 3 - Figura esquemática da classificação dos biopesticidas	21
FIGURA 4 - Figura esquemática ilustrando dentre os produtos biológicos registrados qual a participação percentual de cada tipo das classificações	23
FIGURA 5 - Exemplos de tipos de biopesticidas registrados no Brasil	24
FIGURA 6 - Lagarta de <i>Grapholita molesta</i> morta pelo efeito do produto Dipel a esquerda e do produto Agree a direita, ambas lagartas em ponteiro de ameixa	26
FIGURA 7 – Lagarta de <i>Grapholita molesta</i> morta pelo efeito do produto Dipel a esquerda e do produto Agree a direita, ambas lagartas em ponteiro de ameixa	26
FIGURA 8 – Exemplo do biopesticida <i>Trichoderma</i>	28
FIGURA 9 - Representação esquemática do modelo de produção de fermentação do <i>Trichoderma</i>	29
FIGURA 10 - Esporos (ep) e inclusões proteicas cristalinas bipiramidais (cb) de <i>B. thuringiensis</i>	30
FIGURA 11 - Estatísticas e previsões para o mercado global de pesticidas sintéticos e biopesticidas até 2063	32
FIGURA 12 - Projeção de mercado de biopesticidas do Brasil comparativo 2024-2029	33

## LISTA DE SIGLAS E NOMES

IFOAM - International Federation of Organic Agriculture Movements

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OMS - Organização Mundial da Saúde

IOBC - Organização Internacional de Controle Biológico

EPPO - Organização Europeia e Mediterrânea de Proteção Vegetal

MIP - Manejo Integrado de Pragas

MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

Bt - *Bacillus thuringiensis*

CAGR - Taxa de Crescimento Anual Composta

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3. AGRICULTURA SUSTENTÁVEL.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 CONCEITO.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 PROBLEMÁTICA DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 BENEFÍCIOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4 POSICIONAMENTO DA INDÚSTRIA.....</b>	<b>16</b>
<b>4. BIOPESTICIDAS.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 CONCEITO.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 CLASSIFICAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3 MODO DE UTILIZAÇÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>4.4 ESCALA DE PRODUÇÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>4.5 EXEMPLO DE PRODUÇÃO DE TRICHODERMA E BACILLUS THURINGIENSIS.....</b>	<b>29</b>
<b>5. MERCADO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>33</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>36</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1. INTRODUÇÃO

“Agricultura e meio ambiente precisam caminhar juntos. Essa é uma máxima da qual não podemos nos desvencilhar. Com o crescimento populacional e o aumento da demanda por alimentos e outros recursos naturais, a agricultura sustentável torna-se um tema que merece destaque na política ambiental.” (SÃO PAULO, 2014, p. 6).

A agricultura sustentável busca integrar a produção agrícola com a preservação ambiental, promovendo práticas que garantam a conservação dos recursos naturais, como solo, água e biodiversidade. Essa abordagem se propõe a equilibrar as necessidades da sociedade por alimentos e produtos agrícolas com a responsabilidade de preservar o meio ambiente para as gerações futuras. Trata-se de um modelo que reconhece a interdependência entre agricultura e natureza, destacando a importância de sistemas produtivos que respeitem tanto o ecossistema quanto a saúde das pessoas.

Para alcançar esse equilíbrio, é fundamental adotar práticas que minimizem impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana. Métodos convencionais que dependem intensivamente de insumos químicos, como fertilizantes e agrotóxicos, têm demonstrado sérios riscos à sustentabilidade e à segurança alimentar. Por conta disso, a agricultura deve ser conduzida de maneira responsável, buscando atender às demandas atuais sem comprometer os recursos naturais e a qualidade de vida das populações envolvidas.

Os agrotóxicos, amplamente utilizados para controlar pragas e aumentar a produtividade agrícola, são uma das principais preocupações tanto em termos ambientais quanto de saúde humana. Esses compostos químicos podem causar contaminação do solo e da água, afetando diretamente a biodiversidade e os ecossistemas locais. Além disso, a exposição contínua a resíduos de agrotóxicos nos alimentos tem sido associada a uma série de problemas de saúde, como doenças crônicas, distúrbios hormonais e até mesmo câncer. O uso desses produtos é uma prática que coloca em risco tanto a segurança alimentar quanto a saúde dos consumidores e trabalhadores rurais. Dessa forma, a busca de alternativas mais seguras, como os biopesticidas, e a adoção de práticas agroecológicas tornam-se medidas urgentes para garantir um futuro agrícola sustentável e saudável.

Os pesticidas naturais, biopesticidas, emergem como uma alternativa promissora aos pesticidas sintéticos no contexto da agricultura sustentável. Provenientes de fontes naturais, como plantas, microrganismos e minerais, esses produtos possuem propriedades que ajudam a controlar pragas e doenças sem os impactos negativos associados aos químicos convencionais. Além de serem menos tóxicos ao meio ambiente, os biopesticidas apresentam menor risco à

saúde humana, contribuindo para uma produção agrícola mais segura e alinhada com os princípios da sustentabilidade.

Uma das principais vantagens dos biopesticidas é sua seletividade, ou seja, a capacidade de atuar especificamente sobre as pragas-alvo sem prejudicar organismos benéficos, como polinizadores e predadores naturais. Isso promove o equilíbrio ecológico e reduz a necessidade de intervenções químicas recorrentes. No entanto, a substituição ampla dos pesticidas sintéticos pelos biopesticidas ainda enfrenta desafios significativos. A produção em larga escala desses produtos é limitada, tanto em termos de custo quanto de capacidade tecnológica, o que impacta sua disponibilidade e competitividade no mercado agrícola.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade de adaptação por parte dos agricultores, que muitas vezes carecem de conhecimento e treinamento para implementar o uso de biopesticidas de forma eficaz. A baixa durabilidade dos biopesticidas no ambiente e sua sensibilidade a condições climáticas também podem ser fatores que limitam sua aplicação em larga escala. Ainda assim, com o avanço da pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis, os biopesticidas têm o potencial de desempenhar um papel crucial na transição para uma agricultura mais sustentável e ambientalmente responsável.

## **2. OBJETIVOS**

Diante do contexto apresentado no tópico acima, este trabalho teve como objetivo explorar o papel dos pesticidas naturais na agricultura sustentável, analisando como essas alternativas podem contribuir para a preservação ambiental e a saúde humana.

Ao longo do trabalho, com base em uma diversa variedade de publicações sobre a temática, foram abordados o histórico e os avanços no uso de pesticidas naturais no Brasil e no mundo, bem como os desafios relacionados à produção em larga escala e à adoção dessas práticas pelos agricultores. Além disso, o estudo buscará identificar cenários atuais, avaliar possibilidades de melhorias no setor e apontar perspectivas futuras para o desenvolvimento de soluções mais viáveis e eficazes, visando fortalecer a transição para uma agricultura verdadeiramente sustentável.

## **3. AGRICULTURA SUSTENTÁVEL**

### **3.1 CONCEITOS**

A Revolução Verde foi um marco quando falamos de modelo produtivo agrícola. Por um lado, teve seus méritos, aumentando a produção mundial de alimentos por meio de inovações tecnológicas e diminuindo os custos de produção. Entretanto, esse avanço veio com consequências ambientais e sociais como: degradação dos solos, perda de biodiversidade por conta da especialização da produção, contaminação de água e solos pelo uso inadequado de adubos químicos e agrotóxicos, surgimento de novas pragas, intoxicação de agricultores e concentração de renda. E esse é o modelo produtivo que vem sendo praticado nas últimas décadas, chamado de agricultura convencional.

Com essas problemáticas, surgiram temas ligados à agroecologia, base da agricultura sustentável, integrando aspectos ambientais, sociais e econômicos na produção de alimentos. Além de outras vertentes como a agricultura orgânica, biodinâmica, natural e a permacultura, que buscam reduzir o impacto ambiental e promover sistemas produtivos mais equilibrados. De acordo com a IFOAM, a área mundial de alimentos orgânicos em 2006 superou os 30 milhões de hectares, sendo praticada em todos os continentes (Tabela 1).

Figura 1: Comparação de área plantada com alimentos orgânicos ao redor do mundo entre 2000 e 2006.

	Área plantada em hectares
América do Norte	2000 - 1 milhão
	2006 - 2,2 milhões
América Latina	2000 - 3,3 milhão
	2006 - 5,8 milhões
África	2000 - 0,02 milhão
	2006 - 0,9 milhões
Europa	2000 - 3,7 milhão
	2006 - 6,9 milhões
Ásia	2000 - 0,05 milhão
	2006 - 2,9 milhões
Oceania	2000 - 7,6 milhão
	2006 - 11,8 milhões
Total	2000 - 15,67 milhões
	2006 - 30,5 milhões

Fonte: IFOAM, 2007.

Além da crescente demanda por alimentos orgânicos, impulsionada por preocupações ambientais e sociais, a agricultura sustentável surgiu como uma abordagem mais ampla, integrando esses princípios para promover sistemas produtivos equilibrados e de baixo impacto. É uma abordagem que busca atender às necessidades da sociedade por alimentos e

produtos agrícolas sem comprometer os recursos naturais necessários para as gerações futuras. Esse modelo envolve práticas que promovem a conservação do solo, da água e da biodiversidade, além de integrar técnicas que respeitam o meio ambiente, socialmente justas e economicamente viáveis. De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), a sustentabilidade agrícola está baseada no equilíbrio entre produtividade e preservação, assegurando que a atividade agrícola possa ser mantida a longo prazo sem causar degradação ambiental.

Os princípios da agricultura sustentável envolvem o uso racional de recursos naturais, como a água, que deve ser utilizada de forma eficiente, e o solo, que precisa ser manejado para evitar a erosão e a perda de nutrientes. Essa abordagem integra aspectos econômicos, sociais e ambientais, promovendo um sistema de produção que respeita os limites dos ecossistemas e valoriza a biodiversidade. A ideia central é que a agricultura deve ser realizada de maneira a preservar os recursos naturais, enquanto se busca a eficiência na produção de alimentos. Práticas como rotação de culturas, uso de adubos orgânicos e sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta são exemplos de estratégias que aumentam a resiliência do sistema agrícola e reduzem sua dependência de insumos externos. Além disso, a redução do uso de fertilizantes químicos e agrotóxicos é um aspecto central, uma vez que essas substâncias, embora amplamente empregadas na agricultura convencional, podem causar impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana.

A agricultura sustentável também valoriza a inclusão social e o respeito às comunidades locais. A adoção de práticas que reconheçam o conhecimento tradicional dos agricultores e promovam a equidade no acesso a recursos e oportunidades é fundamental para que a sustentabilidade vá além do aspecto ambiental. Dessa forma, o modelo sustentável não apenas garante a produção de alimentos saudáveis e seguros, mas também contribui para o fortalecimento das economias locais e para a melhoria da qualidade de vida de quem vive e trabalha no campo.

### **3.2 PROBLEMÁTICA DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS**

O uso de fertilizantes químicos tem desempenhado um papel central no modelo agrícola convencional, especialmente desde a Revolução Verde. Contudo, os impactos negativos associados a essa prática levantam questionamentos sobre sua utilização a longo prazo e quanto à sustentabilidade. Enquanto os fertilizantes químicos são amplamente utilizados para

aumentar a produtividade das culturas, eles frequentemente geram efeitos colaterais que comprometem a saúde dos ecossistemas e a viabilidade agrícola a longo prazo.

Entre os problemas mais críticos relacionados ao uso de fertilizantes, destaca-se a contaminação dos recursos hídricos. A aplicação excessiva de compostos nitrogenados e fosfatados pode resultar no fenômeno da eutrofização, que desequilibra os corpos d'água, promove a proliferação de algas nocivas e prejudica a biodiversidade aquática. Além disso, o escoamento desses compostos para rios, lagos e lençóis freáticos apresentam riscos significativos à saúde humana, devido à presença de nitratos em níveis prejudiciais.

Outro aspecto preocupante é a degradação do solo. O uso contínuo e descontrolado de fertilizantes químicos pode levar ao empobrecimento da matéria orgânica, reduzindo a capacidade do solo de reter água e nutrientes. Isso não apenas compromete a fertilidade natural, mas também aumenta a dependência de insumos externos, criando um ciclo de utilização intensiva que é difícil de sustentar. Adicionalmente, a produção e o transporte de fertilizantes químicos demandam altos níveis de energia, frequentemente derivada de combustíveis fósseis, o que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e o agravamento das mudanças climáticas.

Um exemplo real que ilustra os danos potenciais do uso indiscriminado de insumos químicos na agricultura pode ser observado na pesquisa realizada em Alvorada do Gurguéia, no Piauí (SILVA et al., 2021). Esse estudo, motivado por um caso de intoxicação por agrotóxicos que resultou na morte de um agricultor, revelou a vulnerabilidade dos pequenos produtores diante das práticas agrícolas convencionais. Os agricultores da região relataram consciência dos riscos à saúde associados ao uso de produtos químicos, mas enfatizaram a falta de conhecimento sobre alternativas mais seguras e sustentáveis. Essa lacuna evidencia a necessidade de práticas agrícolas que minimizem os impactos negativos à saúde humana e ambiental.

Esses desafios reforçam a importância de promover práticas agrícolas que reduzam a dependência de fertilizantes químicos, priorizando métodos que valorizem a saúde do solo e a integração de práticas agroecológicas. Estratégias como o uso de adubos orgânicos, a rotação de culturas e os sistemas integrados de manejo do solo emergem como soluções indispensáveis para mitigar os impactos negativos e garantir a sustentabilidade da agricultura no futuro. Além

disso, a adoção dessas práticas pode contribuir para a resiliência das comunidades agrícolas, particularmente aquelas mais vulneráveis.

Essa discussão fundamenta os tópicos a serem abordados na seção 3.3, no qual serão explorados os benefícios da adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e o posicionamento das indústrias diante dessas questões, culminando na análise do potencial dos biopesticidas como solução para os desafios impostos pelos agrotóxicos.

### **3.3 BENEFÍCIOS**

A agricultura sustentável apresenta uma ampla gama de benefícios que transcendem a esfera agrícola, impactando positivamente o meio ambiente, a saúde humana e o equilíbrio econômico-social. Esses benefícios são resultados diretos da transição de práticas convencionais, que frequentemente causam degradação ambiental e riscos à saúde, para sistemas produtivos que promovem a conservação de recursos naturais, a biodiversidade e a equidade social.

Um dos principais benefícios da agricultura sustentável é a preservação do solo. Práticas como rotação de culturas, plantio direto e adubação orgânica ajudam a aumentar a matéria orgânica do solo, melhorando sua estrutura, fertilidade e capacidade de retenção de água. “O solo é a base da produção agrícola sustentável, e seu manejo deve priorizar a construção da fertilidade natural, reduzindo a dependência de insumos externos.”(Altieri, 2012). Essa abordagem contribui para a regeneração de solos degradados e para a mitigação da erosão, um dos principais desafios enfrentados pela agricultura convencional.

Outro benefício significativo é a redução do uso de insumos químicos, como fertilizantes sintéticos e agrotóxicos. A substituição desses produtos por alternativas naturais, como biopesticidas e biofertilizantes, minimiza a contaminação do solo, da água e do ar, promovendo a saúde dos ecossistemas e das populações humanas. A diminuição da exposição a agrotóxicos está diretamente relacionada à redução de doenças crônicas e outros problemas de saúde, fortalecendo a segurança alimentar e a qualidade de vida dos consumidores e trabalhadores rurais.

A agricultura sustentável também favorece a biodiversidade, incentivando a coexistência de culturas agrícolas com organismos benéficos, como polinizadores e predadores naturais de pragas. Essa integração mantém o equilíbrio ecológico e reduz a necessidade de intervenções químicas, o que, por sua vez, contribui para a resiliência dos sistemas agrícolas frente a mudanças climáticas e outras adversidades.

Do ponto de vista social, a agricultura sustentável fortalece as comunidades locais ao promover práticas agroecológicas que valorizam o conhecimento tradicional e incentivam a economia circular. A adoção de estratégias como o comércio justo e programas de incentivo à agricultura familiar gera impactos positivos na renda dos agricultores e na coesão social, consolidando uma base sólida para o desenvolvimento rural sustentável.

Por fim, a agricultura sustentável desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas. A captura de carbono no solo por meio de práticas regenerativas, como o plantio direto e a adubação verde, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, sistemas agrícolas diversificados e resilientes são mais bem equipados para lidar com eventos climáticos extremos, garantindo a segurança alimentar em longo prazo.

Em um cenário ideal, como proposto no artigo da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, práticas sustentáveis seriam amplamente adotadas, promovendo um equilíbrio entre produtividade e preservação ambiental. Esse modelo ideal inclui a ampliação do uso de biopesticidas, o manejo ecológico de recursos naturais e a valorização de práticas agroecológicas. Para alcançar essa visão, é imprescindível o avanço em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas que incentivem a adoção de práticas sustentáveis, reduzindo os desafios enfrentados pela agricultura convencional e promovendo soluções integradas para um futuro sustentável

### **3.4 POSICIONAMENTO DA INDÚSTRIA**

A adoção de práticas sustentáveis na agricultura enfrenta resistências significativas devido a desafios econômicos, culturais e tecnológicos. Embora a sustentabilidade tenha ganhado destaque nos discursos corporativos, a predominância de modelos convencionais baseados no uso intensivo de insumos químicos persiste. Segundo Altieri (2012), a

dependência de fertilizantes e pesticidas não é apenas técnica, mas também econômica, pois a indústria se estruturou em torno de cadeias de valor que sustentam essa abordagem, dificultando a transição para alternativas sustentáveis.

O alto custo inicial de implementação de práticas sustentáveis, como o uso de biopesticidas e manejo agroecológico, representa um entrave, apesar dos benefícios econômicos a longo prazo, como a redução da dependência de insumos externos e maior resiliência climática. No entanto, mudanças graduais ocorrem, impulsionadas por regulamentações mais rígidas e pela pressão de consumidores conscientes. Programas de certificação, como selos orgânicos e de comércio justo, têm estimulado a adoção de práticas responsáveis, embora ainda restritas a nichos de mercado.

A resistência cultural também é um fator relevante, pois o modelo agrícola convencional, consolidado desde a Revolução Verde, segue como paradigma dominante. Conforme Governo do Estado de São Paulo (2014), superar essa barreira exige educação ambiental e políticas públicas que incentivem a transição. Além disso, há uma lacuna entre discurso e prática: muitas empresas utilizam a sustentabilidade como ferramenta de marketing sem promover mudanças estruturais reais, um fenômeno conhecido como *greenwashing*, que enfraquece os esforços legítimos de transformação.

Embora avanços sejam observados, a transição para um modelo agrícola sustentável enfrenta desafios estruturais que exigem cooperação entre governos, instituições de pesquisa, agricultores e consumidores. Incentivos financeiros, regulamentações eficazes e conscientização são essenciais para viabilizar um sistema agrícola que equilibre produtividade, preservação ambiental e inclusão social.

## **4. BIOPESTICIDAS**

### **4.1 CONCEITO**

Os biopesticidas, também conhecidos como pesticidas naturais, são substâncias derivadas de fontes biológicas, como microrganismos, plantas ou minerais, utilizadas para o controle de pragas e doenças agrícolas. Esses agentes de controle biológico emergem como alternativas promissoras no contexto da agricultura sustentável. Eles distinguem-se dos

pesticidas químicos convencionais devido à sua alta especificidade, menor toxicidade e reduzido impacto ambiental, características que os tornam ferramentas indispensáveis para o manejo sustentável de pragas e doenças agrícolas (Singh et al., 2021).

O conceito de biopesticidas está intrinsecamente associado à seletividade, segurança ambiental e impacto positivo na saúde humana. Ao reduzir a exposição a resíduos químicos tóxicos, os biopesticidas representam um avanço significativo na mitigação dos riscos à saúde pública, especialmente em comunidades agrícolas. Além disso, são facilmente biodegradáveis e não acumulam resíduos tóxicos no meio ambiente, contribuindo para uma cadeia alimentar mais segura e saudável.

Historicamente, o uso de biopesticidas pode ser rastreado a práticas agrícolas tradicionais em várias culturas. As primeiras utilizações conhecidas de biopesticidas datam do século XIX, quando esporos de fungos foram empregados para o controle de pragas de insetos. No entanto, registros históricos apontam que, no século XVII, a nicotina foi utilizada na Índia para controlar o besouro da ameixa em estufas. Posteriormente, surgiram as piretrinas, extraídas de flores do gênero *Chrysanthemum*, amplamente aplicadas em sprays domésticos e industriais. Atualmente, as piretrinas naturais dominam o mercado global de bioinseticidas, respondendo por 80% das vendas globais e sendo utilizadas em mais de 2.000 formulações comerciais, incluindo agricultura, veterinária e aquacultura (AGROW, 2019). Na figura 1, tem-se a representação de um biopesticida de Piretrina utilizado nas plantações.

Figura 1: Ilustração de frasco de Piretrina, biopesticida extraído da flor de crisântemo.



Fonte: Interagro, 2025.

O desenvolvimento moderno dos biopesticidas começou a ganhar força no século XX, com a descoberta e comercialização de produtos à base de *Bacillus thuringiensis* (B.t). Atualmente, países como Índia, Brasil e Estados Unidos têm investido significativamente em pesquisas e políticas para a promoção do uso de biopesticidas, com iniciativas voltadas para a redução da dependência de agroquímicos sintéticos e o incentivo à agricultura sustentável. Na figura 2, podemos ver uma ilustração esquemática de diversos países que cultivam com utilização da bactéria citada.

Figura 2: Representação de países que cultivam plantas com utilização da bactéria *Bacillus thuringiensis* (B.t).

**PAÍSES QUE CULTIVAM PLANTAS BT**  
Culturas transgênicas que possuem gene da bactéria *Bacillus thuringiensis* e países em que as culturas foram aprovadas

	Milho	Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, Chile, China, Colômbia, Egito, União Europeia, Honduras, Indonésia, Japão, Malásia, México, Nova Zelândia, Paquistão, Panamá, Paraguai, Filipinas, Rússia, Cingapura, África do Sul, Coreia do Sul, Suíça, Taiwan, Tailândia, Turquia, Estados Unidos, Urugai, Vietnã, Zâmbia
	Algodão	Argentina, Austrália, Brasil, Burkina Faso, Canadá, China, Colômbia, Costa Rica, Etiópia, União Europeia, Índia, Japão, Malásia, México, Mianmar, Nova Zelândia, Nigéria, Paquistão, Paraguai, Filipinas, Cingapura, África do Sul, Coreia do Sul, Sudão, Essuatíni, Taiwan, Estados Unidos
	Soja	Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, Colômbia, União Europeia, Índia, Indonésia, Japão, Malásia, México, Nova Zelândia, Paraguai, Filipinas, Rússia, Cingapura, África do Sul, Coreia do Sul, Taiwan, Tailândia, Turquia, Estados Unidos, Urugai, Vietnã
	Batata	Austrália, Canadá, Japão, México, Nova Zelândia, Filipinas, Rússia, Coreia do Sul, Estados Unidos
	Cana-de-açúcar	Brasil, Canadá, Estados Unidos
	Arroz	China, Irã, Estados Unidos
	Tomate	Canadá, Estados Unidos
	Berinjela	Bangladesh
	Alamo	China

Fonte: Croplife Brasil, 2025.

Produtos biológicos, como fungos entomopatogênicos (*Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*), são amplamente reconhecidos por sua eficácia no controle de pragas específicas sem prejudicar organismos benéficos, como polinizadores. Essa seletividade reduz os impactos negativos no ecossistema e favorece a saúde do solo e da água. Além disso, os biopesticidas apresentam menor risco de indução de resistência em pragas, um problema comum associado ao uso excessivo de pesticidas químicos, favorecendo o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis (Garcia et al., 2023).

A regulamentação dos biopesticidas é um fator crucial para sua adoção e desenvolvimento global. A principal organização responsável pela regulamentação e promoção de diretrizes para biopesticidas é a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), por meio de seu Grupo de Especialistas em Biopesticidas, que busca harmonizar as abordagens regulatórias e fomentar a disseminação do conhecimento na área. Outras entidades de relevância incluem a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a Organização Mundial da Saúde (OMS), a Organização Internacional de Controle Biológico (IOBC) e a Organização Europeia e Mediterrânea de Proteção Vegetal (EPPO).

Atualmente, estima-se que cerca de 1400 biopesticidas estejam aprovados mundialmente. Entretanto, na Europa, devido ao rigoroso sistema regulador, apenas cerca de 60 produtos possuem autorização de comercialização. A crescente demanda por biopesticidas reflete sua importância como alternativas mais seguras e ambientalmente sustentáveis,

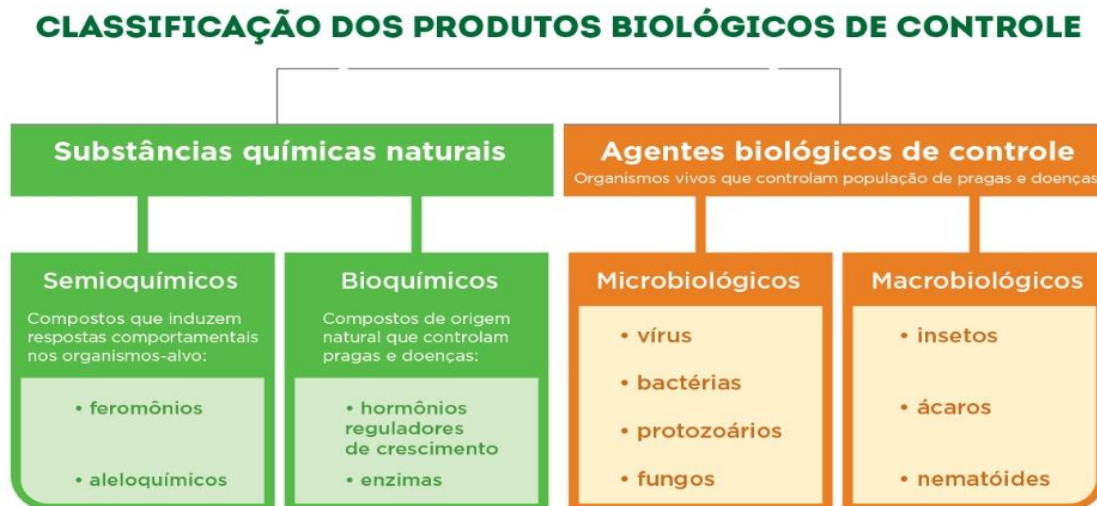
especialmente diante das restrições impostas a substâncias químicas sintéticas. No entanto, apesar das vantagens ambientais e da biodegradabilidade da maioria dos biopesticidas, sua aplicação em larga escala levanta questões sobre possíveis impactos ambientais, incluindo a adsorção de resíduos ao solo e à matéria orgânica, além da presença de estabilizantes que podem retardar sua degradação (AGROW, 2019).

O avanço no conceito e na aplicação dos biopesticidas reflete as crescentes exigências por práticas agrícolas que conciliem produtividade e preservação ambiental. A demanda por produtos menos agressivos ao meio ambiente, aliada às restrições regulatórias impostas ao uso de pesticidas sintéticos, têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novos bioprodutos (Kumar et al., 2022). Políticas rigorosas implementadas na União Europeia e nos Estados Unidos têm estimulado a substituição dos pesticidas químicos por biopesticidas, consolidando sua relevância no manejo integrado de pragas (MIP) e na transição para sistemas agrícolas sustentáveis. A adoção crescente de biopesticidas evidencia seu papel estratégico na segurança alimentar e na preservação ambiental, promovendo um equilíbrio entre inovação tecnológica e conservação ecológica.

## **4.2 CLASSIFICAÇÃO**

A classificação dos biopesticidas é variada de acordo com as regulamentações de diferentes órgãos. Podem ser classificados em diferentes categorias com base em sua origem e no mecanismo de ação empregado para o controle de pragas e doenças agrícolas. Essa classificação é fundamental para compreender suas propriedades e aplicações, uma vez que diferentes agentes biológicos apresentam mecanismos específicos de interação com os organismos-alvo. De acordo com AYILARA, M. S.; ADELEKE, B. S.; et al. (2018), os biopesticidas podem ser amplamente divididos em três grupos principais: pesticidas microbianos, fitopesticidas e nanobiopesticidas. Já o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), divide os biopesticidas em substâncias químicas naturais, semioquímicas ou bioquímicas, e agentes biológicos de controle, onde setorizam por microbiológicos e macrobiológicos. A figura 3 evidencia a classificação dos produtos biológicos de controle, os biopesticidas.

Figura 3: Figura esquemática da classificação dos biopesticidas.



Fonte: Croplife Brasil, 2025.

Os produtos semioquímicos são substâncias químicas produzidas por organismos vivos que afetam a comunicação entre indivíduos da mesma espécie ou de espécies diferentes. Entre os semioquímicos mais utilizados estão os feromônios, empregados no monitoramento e controle populacional de pragas agrícolas. Esses compostos podem atuar modificando o comportamento dos insetos por meio da atração para armadilhas ou da confusão sexual, reduzindo assim a reprodução das espécies-alvo. No Brasil, há registros de produtos semioquímicos eficientes contra pragas como a mariposa *Cydia pomonella*, amplamente utilizada em culturas de maçã e pêsego, bem como para o monitoramento do bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis*), da broca-do-coqueiro (*Rhynchophorus palmarum*) e da mariposa *Helicoverpa armigera*.

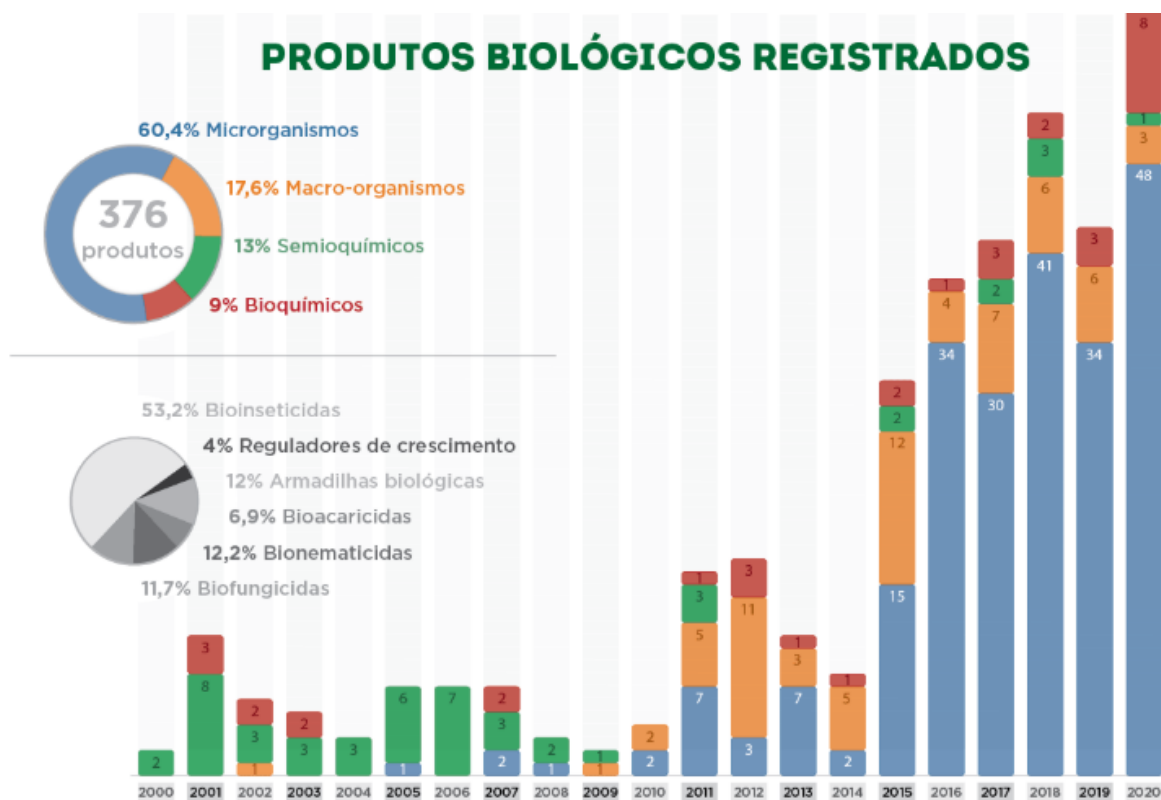
Os produtos bioquímicos, por sua vez, são formulados a partir de compostos naturais extraídos de plantas, microrganismos e outras fontes biológicas. Entre os mais comuns encontram-se os extratos vegetais, óleos essenciais e hormônios que atuam como repelentes, reguladores de crescimento e agentes tóxicos para pragas. A azadiractina, derivada do neem (*Azadirachta indica*), é um exemplo amplamente utilizado por sua capacidade de interromper funções vitais dos insetos, como a reprodução, a excreção e a locomoção. No Brasil, bioinseticidas e biofungicidas contendo azadiractina são aplicados em culturas como feijão, melão e tomate. Outra substância de destaque é o extrato da árvore-do-chá que apresenta ação

biofungicida e bioacaricida e é utilizado em diversas culturas, incluindo abacate, alface, arroz, batata e café.

Os produtos microbiológicos de controle são aqueles formulados com microrganismos, como bactérias, fungos, vírus e protozoários, que atuam diretamente sobre as pragas agrícolas. A bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt) é um dos exemplos mais difundidos, pois libera proteínas que afetam o sistema digestivo de larvas de insetos, levando-as à morte. Os bioinseticidas à base de Bt são amplamente utilizados no controle de pragas do algodão, soja e milho, além de hortaliças e frutas como abobrinha, tomate e uva. Outro exemplo relevante é o fungo entomopatogênico *Beauveria bassiana*, presente em diversos biodefensivos disponíveis no mercado. Esse microrganismo infecta insetos e ácaros em diferentes estágios de vida, colonizando internamente o organismo e causando sua morte.

Já os produtos macrobiológicos de controle são baseados no uso de organismos vivos predadores ou parasitoides, que atacam diretamente as pragas. Os predadores são organismos que necessitam consumir um número significativo de presas para completar seu ciclo de vida, como é o caso do ácaro *Stratiolaelaps scimitus*, utilizado no controle de pragas que atacam a produção de flores e cogumelos. Da mesma forma, espécies como *Phytoseiulus macropilis* e *Neoseiulus californicus* são amplamente empregadas no controle do ácaro-rajado, praga que afeta culturas como maçã, maracujá, morango e tomate. Os parasitoides, por outro lado, depositam seus ovos no interior das pragas, levando à morte do hospedeiro. Entre os mais conhecidos estão as vespas *Cotesia flavipes* e *Trichogramma galloi*, utilizadas principalmente no manejo de pragas da cana-de-açúcar e da soja. O *Trichogramma galloi*, por exemplo, coloca seus ovos dentro dos ovos da praga-alvo, interrompendo seu desenvolvimento e reduzindo a população do inseto nocivo. Com essa gama de exemplos, pode-se observar na Figura 4 a crescente produção ao longo dos anos e a diversificação entre os produtos biológicos registrados.

Figura 4: Figura esquemática ilustrando dentre os produtos biológicos registrados qual a participação percentual de cada tipo das classificações.



Fonte: Croplife Brasil, 2025.

A classificação dos produtos biológicos de controle evidencia a diversidade de estratégias disponíveis para o manejo de pragas e doenças agrícolas. O avanço na pesquisa e no desenvolvimento desses produtos tem ampliado sua adoção, contribuindo para a redução do uso de defensivos químicos e promovendo uma agricultura mais sustentável. A figura 5, ilustra alguns exemplos de biopesticidas que foram registrados no Brasil.

Figura 5: Exemplos de tipos de biopesticidas registrados no Brasil.

AGENTES BIOLÓGICOS REGISTRADOS NO BRASIL		
<p><b>Vírus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Baculovirus Anticarsia gemmatalis multiple nucleopolyhedrovirus</i></li> <li><i>Baculovirus Autographa californica nuclear polyhedrosis</i></li> <li><i>Baculovirus Chrysodeixis includens nucleopolyhedrovirus</i></li> <li><i>Baculovirus Helicoverpa armigera</i></li> <li><i>Baculovirus Helicoverpa armigera nucleopolyhedrovirus</i></li> <li><i>Baculovirus Helicoverpa zea single nucleopolyhedrovirus</i></li> <li><i>Baculovirus Helicoverpa zea nucleopolyhedrovirus (VPN-HzSNPV)</i></li> <li><i>Baculovirus Spodoptera frugiperda</i></li> <li><i>Baculovirus Spodoptera frugiperda multiple nucleopolyhedrovirus</i></li> <li><i>Chrysodeixis includens multiple nucleopolyhedrovirus</i></li> </ul>	<p><b>Fungos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Beauveria bassiana</i></li> <li><i>Isaria fumorosea</i></li> <li><i>Metarhizium anisopliae</i></li> <li><i>Paecilomyces fumosoroseus</i></li> <li><i>Paecilomyces lilacinus</i></li> <li><i>Pochonia chlamydosporia</i></li> <li><i>Trichoderma asperellum</i></li> <li><i>Trichoderma harzianum</i></li> <li><i>Trichoderma koningiopsis</i></li> <li><i>Trichoderma stromaticum</i></li> <li><i>Hirsutella thompsonii</i></li> <li><i>Aspergillus flavus</i></li> </ul>	
<p><b>Ácaros</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Neoseiulus californicus</i></li> <li><i>Phytoseiulus macropilis</i></li> <li><i>Stratiolaelaps scimitus</i></li> <li><i>Amblyseius tamatavensis</i></li> </ul>	<p><b>Bactérias</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Bacillus amyloliquefaciens</i></li> <li><i>Bacillus firmus</i></li> <li><i>Bacillus methylotrophicus</i></li> <li><i>Pasteuria nishizawae</i></li> <li><i>Bacillus subtilis</i></li> <li><i>Bacillus thuringiensis</i></li> <li><i>Bacillus licheniformis</i></li> <li><i>Bacillus pumilus</i></li> </ul>	<p><b>Insetos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Ceratitis capitata</i></li> <li><i>Cotesia flavipes</i></li> <li><i>Cryptolaemus montrouzieri</i></li> <li><i>Orius insidiosus</i></li> <li><i>Trichogramma galloi</i></li> <li><i>Trichogramma pretiosum</i></li> <li><i>Trissolcus basalisi</i></li> <li><i>Telenomus podisi</i></li> </ul>
<p><b>Nematoides</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Deladenus siricidicola</i></li> <li><i>Heterorhabditis bacteriophora</i></li> <li><i>Steinernema puertoricense</i></li> </ul>		

Fonte: Croplife Brasil, 2025.

### 4.3 UTILIZAÇÃO

Os biopesticidas desempenham um papel essencial na agricultura sustentável, sendo aplicados em diversas culturas, como hortaliças, frutas e grãos. Sua utilização vem crescendo globalmente devido à necessidade de reduzir o impacto ambiental dos agrotóxicos sintéticos e atender à crescente demanda por alimentos mais seguros. A ação desses produtos ocorre por diferentes mecanismos, dependendo da classe de biopesticida utilizada. De maneira geral, eles podem ser formulados em sprays, pós e formulações líquidas, permitindo sua aplicação em distintos tipos de cultivo e condições ambientais.

Os modos de ação dos biopesticidas variam conforme sua origem e composição. Os biopesticidas microbianos, por exemplo, incluem bactérias, fungos e vírus que infectam e eliminam pragas-alvo. *O Bacillus thuringiensis (Bt)*, uma das bactérias mais utilizadas, produz toxinas letais para determinadas espécies de lagartas, enquanto o fungo *Beauveria bassiana* atua no controle de insetos sugadores ao penetrar sua cutícula e provocar infecção sistêmica. Outra classe importante é a dos biopesticidas de origem vegetal, que exploram compostos naturais extraídos de plantas. Um exemplo é a azadiractina, proveniente do neem (*Azadirachta*

*indica*), que age como inseticida e regulador de crescimento. Além disso, os semioquímicos, como os feromônios, são amplamente empregados para atrair e capturar pragas em armadilhas ou interferir em seu comportamento reprodutivo, reduzindo populações sem necessidade de eliminação química direta.

A substituição de agroquímicos convencionais por biopesticidas tem sido uma estratégia fundamental para mitigar os impactos ambientais da agricultura intensiva. Os inseticidas químicos, como os organofosforados e carbamatos, conhecidos por sua toxicidade, podem ser substituídos por formulações baseadas em Bt e extratos de neem. Os piretroides, embora menos tóxicos, também apresentam riscos ecológicos e podem ser substituídos por compostos naturais derivados de flores de crisântemo, como o *Pyrethrum*. No combate a doenças fúngicas, agentes biológicos como *Trichoderma spp.* têm mostrado eficácia no controle de fitopatógenos do solo, podendo substituir fungicidas sintéticos. Até mesmo no controle de plantas invasoras, algumas pesquisas indicam que extratos vegetais e microrganismos específicos possuem potencial para atuar como bioherbicidas, reduzindo a dependência de herbicidas químicos tradicionais.

Um estudo de caso relevante que ilustra a eficácia dos biopesticidas é a aplicação de *Bacillus thuringiensis* no controle de pragas agrícolas. Esse microrganismo tem sido amplamente utilizado na formulação de bioinseticidas devido à sua ação altamente seletiva contra larvas de lepidópteros e outros insetos (GALZER, E. C. W.; AZEVEDO FILHO, W. S., 2016). Em experimentos conduzidos com produtos comerciais como Dipel e Agree, observou-se alta eficiência no controle de pragas em diferentes culturas. No tomateiro, por exemplo, larvas de *Grapholita molesta* apresentaram significativa suscetibilidade ao tratamento com Bt. Resultados semelhantes foram obtidos em repolho e couve-flor, com a erradicação eficaz da traça da couve (*Plutella xylostella*). Ensaios de campo demonstraram que a aplicação de Bt proporcionou controle de pragas em macieiras e pessegueiros com eficiência comparável a inseticidas químicos como tebufenozide e clorpirifós.

Os resultados experimentais reforçam a eficácia do *Bacillus thuringiensis* como alternativa sustentável no manejo de pragas. Ensaios laboratoriais indicaram que diferentes dosagens de Bt foram altamente eficientes contra *Spodoptera eridania*, atingindo até 91% de mortalidade em lagartas tratadas com Dipel após 72 horas. Além disso, a combinação de Bt com extrato de neem demonstrou potencial no controle de *Spodoptera frugiperda*, sugerindo que a sinergia entre biopesticidas pode otimizar sua eficácia. Nas figuras 6 e 7, é possível se

observar dois exemplos da utilização dos produtos acima e as lagartas de *Grapholita molesta* atingidas de forma eficaz.

Figura 6 e 7: Lagarta de *Grapholita molesta* morta pelo efeito do produto Dipel a esquerda e do produto Agree a direita, ambas lagartas em ponteiro de ameixa.



Fonte: Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada, 2016.

Embora promissores, os biopesticidas ainda enfrentam desafios para sua ampla adoção. A principal barreira reside na percepção dos agricultores quanto à sua eficiência e tempo de ação, uma vez que muitos pesticidas químicos atuam de forma mais rápida. Além disso, o custo de produção e formulação dos biopesticidas pode ser elevado, dificultando sua competitividade com agroquímicos sintéticos já estabelecidos. A resistência do mercado também é um fator limitante, pois muitos produtores relutam em substituir pesticidas convencionais devido à falta de familiaridade e confiança na nova tecnologia.

Apesar desses desafios, os biopesticidas são altamente compatíveis com o Manejo Integrado de Pragas (MIP), permitindo sua combinação com outras estratégias agrícolas sustentáveis, como rotação de culturas e controle biológico. Essa abordagem integrada contribui para reduzir a dependência de produtos químicos sintéticos, promovendo uma agricultura mais equilibrada e ambientalmente responsável. Dessa forma, a utilização de biopesticidas, exemplificada pelo caso do *Bacillus thuringiensis*, representa um avanço significativo na busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis, garantindo a produção de alimentos seguros e minimizando impactos ambientais a longo prazo.

#### 4.4 ESCALA DE PRODUÇÃO

A produção de biopesticidas, por envolver microrganismos vivos como bactérias, fungos e vírus, segue um processo relativamente padronizado, independentemente do organismo utilizado. Esse processo inclui a seleção de cepas eficazes, cultivo em meios apropriados, fermentação em condições controladas e formulação final para garantir estabilidade e viabilidade do produto. A principal tecnologia empregada na produção em larga escala é a fermentação, que pode ocorrer em meio sólido, líquido ou semissólido, dependendo do microrganismo e das características desejadas no biopesticida final.

Os meios de cultura utilizados variam de acordo com a espécie cultivada, mas frequentemente incluem subprodutos agroindustriais como farelo de soja, fubá, melão e vinhaça, tornando o processo economicamente viável e sustentável. Durante a fermentação, fatores como temperatura, pH, oxigenação e tempo de incubação são rigorosamente controlados para garantir o crescimento adequado dos microrganismos e a produção de metabólitos bioativos responsáveis pelo efeito pesticida.

Após a etapa de fermentação, os biopesticidas passam por processos de separação e formulação, que podem envolver secagem, encapsulação e adição de agentes estabilizantes para aumentar a vida útil e facilitar a aplicação no campo. A escolha da formulação final influencia diretamente a eficiência do produto, podendo ser líquida, granulada ou em pó, dependendo do modo de aplicação e das condições ambientais às quais será exposto.

A crescente demanda por alternativas sustentáveis aos pesticidas químicos tem impulsionado o avanço tecnológico na produção de biopesticidas. No Brasil, o setor tem se expandido significativamente, impulsionado por políticas de incentivo e pela busca por práticas agrícolas mais ecológicas. Nos tópicos seguintes, será apresentada uma análise detalhada da produção de *Bacillus thuringiensis* e *Trichoderma*, dois dos biopesticidas mais amplamente estudados e aplicados, cujos processos de cultivo e escalonamento industrial exemplificam os desafios e avanços na produção desses produtos biológicos

#### 4.5 EXEMPLO DE PRODUÇÃO DE TRICHODERMA E BACILLUS THURINGIENSIS

Para exemplificar, este tópico utilizará como referência estudos da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, instituição que tem se destacado na pesquisa e desenvolvimento de biopesticidas no Brasil. Em particular, serão analisados dois artigos que detalham o processo produtivo de biopesticidas. O primeiro, sobre *Trichoderma*, fungo amplamente utilizado no controle biológico de fitopatógenos em culturas como soja, milho e hortaliças. Em seguida, *Bacillus thuringiensis*, bactéria de reconhecida ação inseticida, produzindo toxinas que afetam seletivamente o sistema digestivo de insetos-praga, sendo amplamente aplicado no manejo de lagartas e besouros. Esses estudos oferecem uma visão dos métodos de cultivo, fermentação e formulação desses microrganismos, ilustrando os desafios e avanços no escalonamento industrial dos biopesticidas. Na figura 8, pode-se ver um exemplo de aplicação de biopesticida com formulação de *Trichoderma spp.*

Figura 8: Exemplo do biopesticida Trichoderma.



Fonte: Terramagna, 2025.

A produção massal de *Trichoderma spp.* baseia-se principalmente na fermentação sólida estática e na fermentação líquida submersa, sendo imprescindível otimizar fatores bióticos e abióticos para maximizar o rendimento de esporos e outros propágulos de interesse. Como a maioria dos microrganismos quimiotróficos, *Trichoderma* obtém energia de compostos orgânicos e requer uma ampla gama de nutrientes essenciais, como C, H, O, N, P, K, S, Ca e

Mg, fundamentais para seu metabolismo e crescimento. A viabilidade econômica da produção depende da seleção eficiente de estirpes, do desenvolvimento de formulações estáveis e da adequação das condições nutricionais e ambientais, garantindo um produto de alta qualidade e eficácia.

A produção de *Trichoderma spp.* em larga escala pode ser realizada por diferentes métodos, sendo a fermentação líquida submersa a mais eficiente e amplamente utilizada na indústria de biopesticidas. Nesse processo, o fungo é cultivado em meio líquido rico em nutrientes, como glicose e extrato de levedura, em biorreatores equipados com controle rigoroso de oxigenação, temperatura e pH. A agitação mecânica e aeração contínua garantem uma distribuição homogênea dos nutrientes, favorecendo o crescimento da biomassa e a produção de diferentes propágulos - estruturas reprodutivas ou de sobrevivência do fungo, essenciais para sua multiplicação e colonização do ambiente. Na Figura 9, tem-se a representação da esquemática de produção para o *Trichoderma*, desde a parte de crescimento celular, preparo de substrato, controle de temperatura e até o produto final nas diferentes formulações, de acordo com a matéria prima.

Figura 9: Representação esquemática do modelo de produção de fermentação do *Trichoderma*.



Fonte: Produção Industrial de Trichoderma, Embrapa.

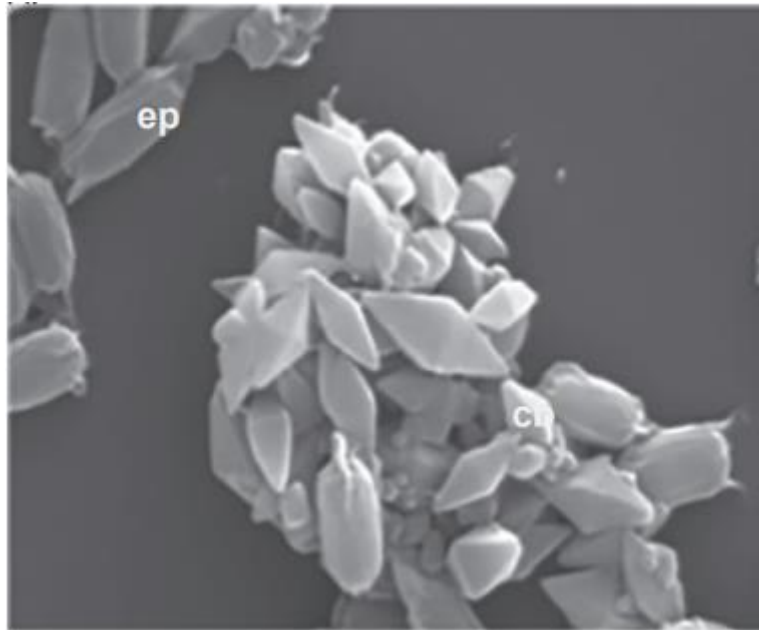
Após a fase de fermentação, os propágulos fúngicos são separados do meio de cultura por processos de filtração ou centrifugação. Em seguida, passam por secagem controlada para

garantir a estabilidade do produto final, que pode ser formulado em pó molhável, suspensão concentrada ou grânulos. A fermentação líquida submersa permite um alto rendimento, rápida escalabilidade e um processo mais econômico em comparação aos métodos tradicionais, tornando-se a escolha preferida para a produção comercial de *Trichoderma*.

Além da fermentação submersa, o *Trichoderma spp.* também pode ser produzido por fermentação em estado sólido, onde o fungo cresce sobre substratos naturais, como arroz, trigo ou farelo de soja. Embora esse método seja mais simples e exija menor investimento inicial, ele demanda maior tempo de produção e controle rigoroso das condições ambientais, como umidade e ventilação, para evitar contaminações.

A produção de *Bacillus thuringiensis* (Bt) em escala industrial é baseada predominantemente na fermentação líquida submersa, um processo altamente controlado que permite a obtenção de altas concentrações de esporos e cristais proteicos, os principais componentes bioativos dos bioinseticidas, na figura 10 tem-se uma representação dessas inclusões proteicas citadas. O processo pode ser dividido em três fases principais: crescimento vegetativo, transição e esporulação. Na fase inicial, a bactéria se multiplica rapidamente em um meio rico em nutrientes, produzindo metabólitos como lactato, piruvato e acetatos. Esses compostos desempenham um papel essencial na regulação do pH do meio, criando condições ideais para o desenvolvimento da cultura. A transição ocorre quando a bactéria começa a metabolizar os acetatos acumulados e a armazenar  $\beta$ -hidroxibutirato na forma de poli- $\beta$ -hidroxibutirato (PHB), um polímero de reserva energética. Esse acúmulo de PHB é fundamental para a fase subsequente, pois fornece energia para a esporulação.

Figura 10: Esporos (ep) e inclusões proteicas cristalinas bipiramidais (cb) de *B. thuringiensis*.



Fonte: Produção e controle de qualidade de produtos biológicos à base de *Bacillus thuringiensis* para uso na agricultura, 2018.

Na etapa de esporulação, o *Bacillus thuringiensis* mobiliza os polímeros armazenados para sustentar a formação dos esporos, que são estruturas resistentes capazes de sobreviver em condições adversas. Durante essa fase, ocorre também a síntese de cristais proteicos, compostos pelas  $\delta$ -endotoxinas, que conferem ao Bt sua ação inseticida contra diversas pragas, especialmente lepidópteros. O controle rigoroso das condições de fermentação, como temperatura, pH e agitação, é essencial para maximizar a produção desses compostos bioativos. Em termos operacionais, o cultivo é realizado em biorreatores aerados, garantindo a homogeneização do meio e a disponibilidade adequada de oxigênio. Após a fermentação, o produto é separado do meio de cultura por centrifugação e pode passar por processos de secagem para formulação em pó ou suspensão líquida, conferindo maior estabilidade e viabilidade ao bioinseticida.

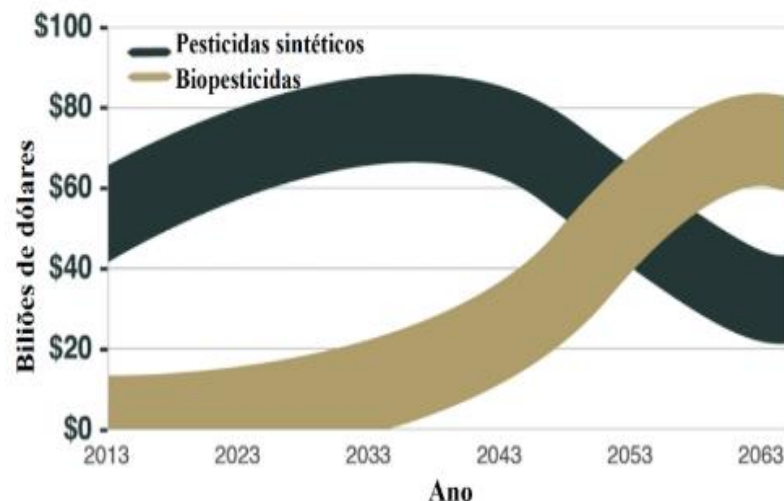
Embora a fermentação submersa seja a técnica predominante na produção industrial, algumas abordagens alternativas são empregadas em determinadas regiões, como a fermentação semi-sólida, utilizada principalmente na China (MONNERAT, R. G.; SOLON DE PONTES, J.; et al., 2018) Além disso, há uma tendência crescente para a produção "on farm", onde agricultores realizam a fermentação em suas próprias propriedades para reduzir custos.

No entanto, essa prática apresenta desafios significativos, como o risco de contaminação por microrganismos indesejáveis, comprometendo a qualidade e eficácia do bioinseticida. Dessa forma, a produção comercial de *Bacillus thuringiensis* requer um controle rigoroso de todas as etapas, desde a fase vegetativa até a formulação final, garantindo um produto de alta qualidade e eficiência no controle biológico de pragas.

## 5. MERCADO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O mercado global de biopesticidas tem apresentado crescimento acelerado, impulsionado por regulamentações mais rigorosas sobre pesticidas sintéticos e pela demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis. América do Norte e Europa Ocidental lideram a adoção desses produtos, com destaque para o uso consolidado de *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) no controle de pragas. No Brasil, essa tendência se reflete no aumento expressivo do mercado, com uma taxa de crescimento anual de 45%, significativamente superior aos 6% dos agrotóxicos (Agencia Gov, 2024). Na figura 11, evidencia-se o crescimento de mercado relatado, por meio de outra fonte de pesquisa.

Figura 11: Estatísticas e previsões para o mercado global de pesticidas sintéticos e biopesticidas até 2063.



Fonte: Casa das ciências, 2025.

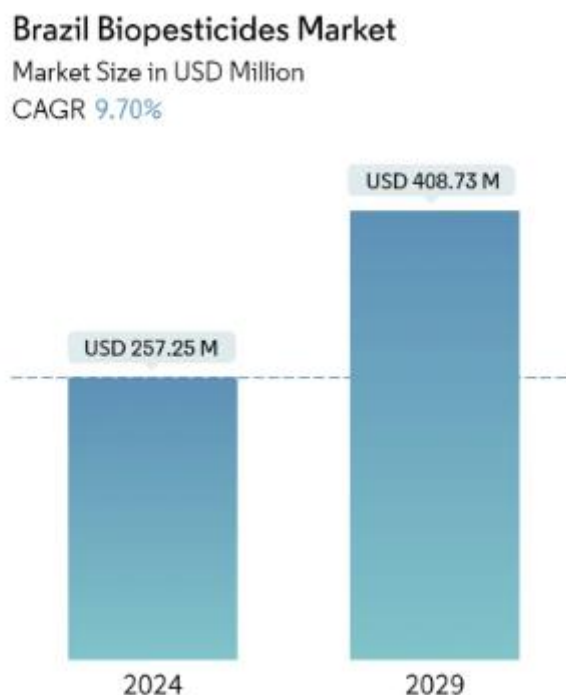
De acordo com a Agência Gov, o Brasil tem se destacado no cenário mundial como o país que mais se utiliza de técnicas não tóxicas de produção agrícola. Com base em pesquisa recente da Embrapa, 64% dos produtores brasileiros utilizaram biofertilizantes e 61% recorreram a biodefensivos em 2024, registrando um crescimento contínuo em relação a 2022. Esses índices superaram significativamente os registrados no conjunto dos países europeus, que apresentaram taxas de 33% e 25%, respectivamente, e também se destacam em relação ao México, onde os percentuais foram de 46% e 22%. Esse avanço reforça o protagonismo do Brasil no setor, impulsionado por regulamentações favoráveis, maior conscientização sobre os benefícios ambientais e incentivos à inovação tecnológica.

O avanço dos biopesticidas, no entanto, ainda enfrenta desafios como regulamentação complexa, concorrência com pesticidas sintéticos e necessidade de maior conscientização sobre seus benefícios. Apesar disso, a perspectiva é de expansão contínua, com investimentos crescentes em pesquisa e a ampliação do uso em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP). Na cultura da soja a área tratada com biopesticidas subiu de 12 milhões de hectares, em 2020, para 20 milhões de hectares, em 2023, e praticamente a mesma tendência ocorreu com outras culturas. As previsões indicam que em 2028 o mercado mundial de biopesticidas será de 27,9 bilhões de dólares.

Por meio da análise do mercado de biopesticidas no Brasil da Mordor Intelligence, o tamanho do mercado brasileiro de biopesticidas é estimado em US\$ 257,25 milhões em 2024, e deverá atingir US\$ 408,73 milhões até 2029, crescendo a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 9,70% durante o período de previsão (2024-2029). Em 2022, os biopesticidas representaram 82,7% do valor total do segmento de defensivos agrícolas no país, com um aumento de 404% no número de produtos registrados nos últimos nove anos. Dentre os diferentes tipos, os bioherbicidas dominaram o mercado, com 38,15% de participação em valor, seguidos por biofungicidas (25,6%), outros biopesticidas (18,42%) e bioinseticidas (17,8%).

Os bioinseticidas foram a categoria de biopesticidas que mais cresceu, com um aumento de 27,6% entre 2017 e 2022, alcançando um mercado avaliado em US\$ 38,9 milhões. O uso de biopesticidas tem sido particularmente relevante para as culturas em linha, como soja, milho e arroz, que responderam por 78,9% do valor total de mercado em 2022, impulsionadas pelo aumento de 23,3% na área de cultivo orgânico entre 2017 e 2022.

Figura 12: Projeção de mercado de biopesticidas do Brasil comparativo 2024-2029.



Fonte: Mordor Intelligence, 2025.

A crescente participação de empresas, pesquisadores e instituições no desenvolvimento de novas soluções têm fortalecido o setor, posicionando o Brasil como um dos protagonistas nesse mercado emergente. Além dos benefícios ambientais e da redução de resíduos químicos nos alimentos, os biopesticidas apresentam uma vantagem econômica significativa. Enquanto o desenvolvimento de um pesticida sintético pode custar cerca de 300 milhões de dólares, um biopesticida pode ser produzido com investimentos entre 1 e 5 milhões de dólares. Essa diferença substancial, aliada ao fortalecimento da regulamentação e às mudanças nas preferências do consumidor, tem acelerado a adoção do controle biológico na agricultura brasileira, consolidando sua relevância no cenário agrícola global.

O mercado de biopesticidas segue em trajetória ascendente, impulsionado pelo fortalecimento de políticas regulatórias, avanços tecnológicos e maior conscientização ambiental. No Brasil, espera-se que o crescimento continue acelerado, consolidando o país como referência global no desenvolvimento e aplicação dessas tecnologias. A tendência é que o controle biológico ganhe ainda mais espaço em programas de Manejo Integrado de Pragas

(MIP) e que novos investimentos tornem os biopesticidas ainda mais competitivos em relação aos sintéticos. Com previsões otimistas para os próximos anos, esse mercado se firma como peça-chave para a construção de uma agricultura mais sustentável e eficiente.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O crescimento do mercado de biopesticidas reflete uma transformação significativa na agricultura, impulsionada pela necessidade de práticas mais sustentáveis e pela busca por alternativas viáveis aos agroquímicos sintéticos. Com regulamentações mais rígidas, maior conscientização ambiental e avanços tecnológicos, os biopesticidas vêm se consolidando como uma ferramenta essencial para o manejo agrícola moderno, cada vez mais alinhado com a proposta da agricultura sustentável.

Diante desse cenário, a ampliação do uso dessas tecnologias não apenas fortalece a competitividade do setor agrícola, mas também contribui para a segurança alimentar e para a preservação dos recursos naturais. A transição para um modelo produtivo menos dependente de pesticidas sintéticos é um caminho sem volta, alinhado às exigências globais de sustentabilidade e às necessidades de um agronegócio mais eficiente e responsável. Pode-se concluir que a tendência é de crescimento para os próximos anos, de fato sendo uma alternativa, já presente no Brasil, essencial a um futuro sustentável.

Nota-se que um dos principais obstáculos para a consolidação da agricultura sustentável, no contexto dos biopesticidas, é a falta de informação e conhecimento sobre o tema, conforme discutido no tópico 3.2. Quando uma nova alternativa surge para competir com um modelo já consolidado — nesse caso, os biopesticidas em relação aos agrotóxicos —, é natural que enfrente desafios para se estabelecer. A percepção inicial tende a ser de que essa nova alternativa será mais cara ou menos eficiente. No entanto, este estudo evidenciou que os biopesticidas, além de sustentáveis, podem ter um custo de produção mais baixo do que os agrotóxicos, aproveitando tecnologias já consolidadas em outras indústrias, como o uso de biorreatores. Assim, o maior entrave não está na viabilidade técnica ou econômica dos biopesticidas, mas sim na falta de informação, no planejamento estratégico para sua adoção e na resistência de um mercado dominado por grandes indústrias de agroquímicos.

Dessa forma, os biopesticidas não são apenas uma tendência futura, mas já representam uma realidade no setor agrícola. Seu avanço reflete a busca por padrões de produção mais sustentáveis e alinhados às exigências ambientais globais. O fortalecimento desse mercado dependerá de políticas públicas, incentivos financeiros e, principalmente, da disseminação de conhecimento, garantindo que mais produtores tenham acesso a essas tecnologias e possam contribuir para uma agricultura mais eficiente e responsável.

A engenharia química desempenha um papel crucial nesse cenário, uma vez que o processo de produção de biopesticidas já é amplamente conhecido e consolidado nessa área, especialmente com o uso de biorreatores e o controle rigoroso de variáveis como pH, temperatura e tempo de fermentação. Além disso, a engenharia química pode contribuir significativamente para a automação desses processos, minimizando erros e aumentando a eficiência produtiva em larga escala. A implementação de sistemas automatizados e integrados permite um controle mais preciso da qualidade dos biopesticidas, garantindo padronização e maior estabilidade nos produtos finais. Com isso, a engenharia química não apenas viabiliza a produção de biopesticidas em alta escala, mas também impulsiona a inovação tecnológica, tornando essas soluções cada vez mais acessíveis e eficazes para o agronegócio sustentável.

## REFERÊNCIAS

**AgroAdvance.** Biopesticidas ou Biodefensivos Biológicos? Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-biopesticidas-ou-biodefensivos-biologicos/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

ALTIERI, M. A. **Manejo Ecológico do Solo.** São Paulo: Expressão Popular, 2012.

AYILARA, M. S.; ADELEKE, B. S.; et al. **Biopesticides as a Promising Alternative to Synthetic Pesticides: A Case for Microbial Pesticides, Phytopesticides, and Nanobiopesticides.**

BHARTI, V. **Biopesticides: Production, Formulation and Application Systems.**

CADERNOS DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. **Agricultura Sustentável.** Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente.

COSTA, A. A. V.; RIO, M. **Agricultura Sustentável I: Conceitos / Sustainable Agriculture I: Concepts.**

**CropLife Brasil.** Mercado de Bioinsumos Cresceu 15% na Safra 2023-2024. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/mercado-de-bioinsumos-cresceu-15-na-safra-2023-2024/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

DATTA, S.; SINGH, J.; SINGH, S.; SINGH, J. **Earthworms, Pesticides and Sustainable Agriculture: A Review.**

EL-BENDARY, M. A. **Bacillus thuringiensis and Bacillus sphaericus Biopesticides Production.**

**Forbes Agro.** O Mercado de Bioinsumos Vai Para Onde no Brasil? Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/01/o-mercado-de-bioinsumos-vai-para-onde-no-brasil/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

**GALZER, E. C. W.; AZEVEDO FILHO, W. S. Utilização do *Bacillus thuringiensis* no Controle Biológico de Pragas.**

**InfoMoney.** Mercado Global de Bioinsumos Pode Atingir US\$ 45 Bilhões Até 2032. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/economia/mercado-global-de-bioinsumos-pode-atingir-us-45-bilhoes-ate-2032/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

**Instituto Biológico de SP.** Trichoderma no Controle de Doenças de Plantas Causadas por Patógenos de Solo. Disponível em: <http://www.biologico.agricultura.sp.gov.br/publicacoes/comunicados-documentos-tecnicos/comunicados-tecnicos/trichoderma-no-controle-de-doencas-de-plantas-causadas-por-patogenos-de-solo>. Acesso em: 08 fev. 2025.

**KAWALEKAR, J. S. Role of Biofertilizers and Biopesticides for Sustainable Agriculture.**

**LENG, P.; ZHANG, Z.; PAN, G.; ZHAO, M. Applications and Development Trends in Biopesticides.**

**LENGAI, G. M. W.; MUTHOMI, J. W. Biopesticides and Their Role in Sustainable Agricultural Production.**

**LUNA-FINKLER, C.; FINKLER, L. *Bacillus sphaericus* and *Bacillus thuringiensis* to Insect Control: Process Development of Small Scale Production to Pilot-Plant-Fermenters.**

**MASCARIN, G. M. et al. Produção Industrial de *Trichoderma*.**

**MFARREJ, M. F. B.; RARA, F. M. Competitive, Sustainable Natural Pesticides. *Acta Ecologica Sinica*. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.08.005>**

MONNERAT, R. G.; SOLON DE PONTES, J.; et al. **Produção e Controle de Qualidade de Produtos Biológicos à Base de *Bacillus thuringiensis* para Uso na Agricultura.** Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2018. (Documentos, 360). Disponível em: [www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)

**Mordor Intelligence.** Brazil Biopesticides Market. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-biopesticides-market>. Acesso em: 08 fev. 2025.

**NovaCana.** Maior Uso de Bioinsumos Levará o Mercado a R\$ 5,6 Bi no Brasil (2022-23). Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/maior-uso-bioinsumos-levar-mercado-r-5-6-bi-brasil-2022-23-croplife-040523>. Acesso em: 08 fev. 2025.

OLIVEIRA, F. H.; SILVA, V. R. **Uso de Agrotóxico ou Controle Agroecológico de Pragas e Doenças da Agricultura? Uma Reflexão a Partir do Município de Alvorada do Gurguéia-PI.** *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*, v. 1, n. 2, p. 1-21, jan. 2020. DOI: 10.52719/bjas.v1i2.2925.

RODGERS, P. B. **Potential of Biopesticides in Agriculture.**

SINGH, D. N. **Biopesticides: A Key to Sustainable Agriculture.** Udai Pratap Autonomous College, Varanasi.

**Spherical Insights.** Biopesticides Market. Disponível em: <https://www.sphericalinsights.com/pt/reports/biopesticides-market>. Acesso em: 08 fev. 2025.

**SwissInfo.** Biopesticidas Ganham Espaço no Brasil. Disponível em: <https://www.swissinfo.ch/por/biopesticidas-ganham-espaco-no-brasil%2c-o-pa%C3%ADs-dos-%27agrot%C3%B3xicos%27/72774566>. Acesso em: 08 fev. 2025.

YEZZA, A.; TYAGI, R. D.; VALE`RO, J. R.; SURAMPALLI, R. Y.; SMITH, J. **Scale-up of Biopesticide Production Processes Using Wastewater Sludge as a Raw Material.**