

## Toxicidade de bioinsumos em organismos não-alvo: uma revisão sistemática

Beatriz El-Tayar<sup>1</sup>

Sandra Maria Maziero<sup>2</sup>

Paola Mendes Milanesi<sup>3</sup>

Denise Cargnelutti<sup>4</sup>

### Resumo

O uso de bioinsumos tem se destacado como alternativa sustentável aos pesticidas sintéticos, especialmente diante da necessidade de reduzir impactos ambientais e riscos à saúde humana associados ao uso intensivo de agrotóxicos. Esses produtos, obtidos de microrganismos, extratos vegetais e nanotecnologias, apresentam potencial no controle de pragas e doenças agrícolas. Entretanto, a ideia de que compostos naturais são intrinsecamente seguros vem sendo contestada por estudos que demonstram efeitos ecotoxicológicos em organismos não-alvo, incluindo microcrustáceos, peixes, polinizadores, inimigos naturais e organismos do solo. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi realizar uma revisão sistemática da literatura sobre os efeitos toxicológicos de bioinsumos em organismos não-alvo, visando avaliar sua segurança ambiental e potencial de uso sustentável na agricultura. A pesquisa foi conduzida por meio de buscas em bases de dados nacionais e internacionais, sendo selecionados estudos experimentais publicados entre 2015 e 2025. Foram analisados 22 estudos envolvendo bioinsumos de origem vegetal, microbiana e nanotecnológica. Os resultados demonstraram que muitos bioinsumos apresentam elevada eficácia e maior seletividade em relação aos agrotóxicos convencionais, porém diversos compostos induziram efeitos subletais em organismos não-alvo, incluindo estresse oxidativo, alterações fisiológicas, histopatológicas, imunológicas e comportamentais, além de impactos sobre microbiota e comunidades microbianas. Organismos aquáticos, especialmente *Daphnia magna* e *Danio rerio*, destacaram-se entre os mais sensíveis. Conclui-se que os bioinsumos representam ferramentas promissoras para a agricultura sustentável; contudo, sua segurança ambiental depende da

<sup>1</sup> Graduanda em Ciências Biológicas Bacharelado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Erechim, Brasil; [beatriz.tayar07@gmail.com](mailto:beatriz.tayar07@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0007-5693-1399>; <http://lattes.cnpq.br/3445028087690679>

<sup>2</sup> Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); Docente da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, Brasil; [sandra.maziero@uffs.edu.br](mailto:sandra.maziero@uffs.edu.br); <https://orcid.org/0000-0003-4811-3445>; <http://lattes.cnpq.br/0722317421763007>

<sup>3</sup> Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); Docente da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, Brasil; [paola.milanesi@uffs.edu.br](mailto:paola.milanesi@uffs.edu.br); <https://orcid.org/0000-0001-7319-916x>; <http://lattes.cnpq.br/5448205426679668>

<sup>4</sup> Doutora em Bioquímica Toxicológica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); Docente da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, Brasil; [denise.cargnelutti@uffs.edu.br](mailto:denise.cargnelutti@uffs.edu.br); <https://orcid.org/0000-0002-7307-1024>; <http://lattes.cnpq.br/8816738703138575>

formulação, dose, modo de aplicação e sensibilidade dos organismos expostos, tornando essenciais avaliações ecotoxicológicas e estudos sobre efeitos crônicos e subletais.

**Palavras-chave:** Ecotoxicologia; Efeitos subletais; Organismos benéficos; Segurança ambiental; Sustentabilidade agrícola.

## Toxicity of bioinputs on non-target organisms: a systematic review

### Abstract

The use of bioinputs has emerged as a sustainable alternative to synthetic pesticides, especially given the need to reduce environmental impacts and human health risks associated with the intensive use of pesticides. These products, derived from microorganisms, plant extracts, and nanotechnologies, have shown potential for controlling agricultural pests and diseases. However, the idea that natural compounds are intrinsically safe has been challenged by studies demonstrating ecotoxicological effects on non-target organisms, including microcrustaceans, fish, pollinators, natural enemies, and soil organisms. In this context, the aim of this study was to conduct a systematic literature review on the toxicological effects of bioinputs on non-target organisms, in order to evaluate their environmental safety and potential for sustainable agricultural use. The research was carried out through searches in national and international databases, selecting experimental studies published between 2015 and 2025. A total of 22 studies involving plant-, microbial-, and nanotechnology-based bioinputs were analyzed. The results demonstrated that many bioinputs exhibit high efficacy and greater selectivity compared with conventional pesticides; however, several compounds induced sublethal effects on non-target organisms, including oxidative stress, physiological, histopathological, immunological, and behavioral alterations, as well as impacts on microbiota and microbial communities. Aquatic organisms, especially *Daphnia magna* and *Danio rerio*, were among the most sensitive. It is concluded that bioinputs represent promising tools for sustainable agriculture; however, their environmental safety depends on formulation, dose, application method, and organism sensitivity, making ecotoxicological assessments and studies on chronic and sublethal effects essential.

**Keywords:** Ecotoxicology; Sublethal effects; Beneficial organisms; Environmental safety; Agricultural sustainability.

### 1 Introdução

O uso de bioinsumos na agricultura tem ganhado destaque como alternativa sustentável aos agrotóxicos, impulsionado pela crescente preocupação com os impactos ambientais e os riscos à saúde humana decorrentes de seu uso intensivo (Zhou *et al.*, 2025). Esses produtos, obtidos a partir de microrganismos, extratos de vegetais, metabólitos secundários ou materiais naturais modificados, têm sido amplamente investigados por sua capacidade de controlar pragas e doenças agrícolas com menor toxicidade aparente e maior

compatibilidade ecológica (Assefa *et al.*, 2026; Conti *et al.*, 2026; Corrêa *et al.*, 2025). Entre as principais vantagens associadas ao uso de bioinsumos, destacam-se sua biodegradabilidade, baixa persistência ambiental e reduzida bioacumulação, características que reforçam o discurso de sustentabilidade e segurança ambiental.

Entretanto, a ideia de que o “natural” é sinônimo de “seguro” tem sido contestada por um crescente conjunto de evidências científicas (Soares *et al.*, 2026). Diversos compostos de origem biológica apresentam efeitos tóxicos significativos sobre organismos não-alvo, afetando desde microrganismos do solo (Barbosa *et al.*, 2025) até polinizadores (Lima *et al.*, 2024; Xavier *et al.*, 2015), peixes e predadores naturais de pragas (Lisi *et al.*, 2025). Esses impactos podem se manifestar de forma aguda ou subletal, provocando alterações fisiológicas, comportamentais, reprodutivas e genotóxicas, que comprometem funções ecológicas essenciais e a estabilidade dos ecossistemas agrícolas (Mariano *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2026)

Diversos estudos têm evidenciado que, embora bioinsumos de origem vegetal, microbiana e nanotecnológica apresentem elevada eficiência no controle de pragas, esses compostos também podem causar efeitos adversos em organismos ecologicamente relevantes, incluindo peixes, microcrustáceos, polinizadores e inimigos naturais (Conti *et al.*, 2026; Gostin; Popescu, 2023; Karaođlan *et al.*, 2024). Em muitos casos, os efeitos observados incluem alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e imunológicas, além de impactos sobre microbiota e processos ecológicos essenciais.

A crescente incorporação de nanotecnologias às formulações de bioinsumos também tem ampliado as discussões sobre estabilidade, biodisponibilidade e persistência ambiental desses compostos. Embora a nanoencapsulação possa aumentar a eficiência agrônômica e reduzir a degradação dos compostos ativos, alterações no tamanho das partículas e na dinâmica ambiental podem modificar o perfil toxicológico das formulações, podendo potencializar riscos ecotoxicológicos em organismos aquáticos e terrestres (Devasena *et al.*, 2022; Ridoy; Supto, 2026).

Essa variabilidade reforça a importância da avaliação ecotoxicológica de cada composto de forma individualizada, levando em conta a sensibilidade dos organismos, o tipo de formulação e as condições ambientais (Pavela, 2016). Apesar do crescimento das pesquisas na área, ainda existem lacunas relacionadas à padronização metodológica dos

ensaios ecotoxicológicos, aos efeitos subletais e crônicos e aos impactos sobre múltiplos níveis tróficos e comunidades microbianas.

Assim, o objetivo do presente estudo foi realizar uma revisão sistemática da literatura publicada entre 2015 e 2025 sobre os efeitos toxicológicos de bioinsumos em organismos não-alvo, visando avaliar sua segurança ambiental e seu potencial de uso sustentável na agricultura. A busca e análise dos estudos foram conduzidas no ano de 2026.

## 2 Metodologia

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados científicas internacionais *Web of Science* e *Scopus*, ambas acessadas por meio do portal Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), utilizando o sistema de autenticação CAFE (Comunidade Acadêmica Federada). A estratégia de busca foi composta pelas palavras-chave “*bioinputs*”, “*toxicity*”, “*non-target organisms*”, “*biofertilizers*”, “*biofungicides*”, “*biopesticides*”, combinadas pelos operadores booleanos “AND” e “OR”. Para as buscas foram formadas as seguintes combinações de palavras-chave associadas aos operadores booleanos: (“*bioinputs*” AND “*toxicity*” AND “*non-target organisms*”) OR (“*biofertilizers*” AND “*toxicity*” AND “*non-target organisms*”) OR (“*biofungicides*” AND “*toxicity*” AND “*non-target organisms*”) OR (“*biopesticides*” AND “*toxicity*” AND “*non-target organisms*”). Também foi aplicado um filtro de intervalo de data “últimos 10 anos” visando selecionar estudos mais recentes.

Após a etapa de busca, os registros foram exportados no formato BibTeX, respeitando os limites máximos de exportação de cada base, 500 registros para a *Web of Science* e 2000 registros para a *Scopus*. Os arquivos resultantes, nomeados “*savedrecs.bib*” (*Web of Science*) e “*scopus.bib*” (*Scopus*), foram armazenados e organizados para posterior processamento bibliográfico. A integração e análise dos registros obtidos foram conduzidas no *software* R versão 4.5.2, utilizando o pacote Bibliometrix, que permitiu a importação, integração e organização dos registros para posterior triagem e análise. Essa etapa possibilitou a triagem e extração sistemática das informações relevantes para a revisão. Posteriormente, os documentos extraídos foram avaliados seguindo critérios previamente estabelecidos para assegurar a consistência e a pertinência dos estudos selecionados. O processo ocorreu em três etapas sequenciais. Primeiramente foi realizada a leitura dos títulos, com o objetivo de identificar trabalhos potencialmente alinhados aos critérios de

inclusão. Em seguida, a leitura dos resumos, para verificar a presença de análises envolvendo bioinsumos e efeitos toxicológicos e ecotoxicológicos em organismos não-alvo. Por fim, a leitura integral dos textos, destinada à confirmação da metodologia experimental, da mensuração das variáveis e da adequação dos objetivos à temática proposta.

A busca inicial nas bases de dados resultou em um total de 221 registros bibliográficos, sendo 102 da *Web of Science* e 119 da *Scopus*, considerando artigos originais, artigos de revisão e capítulos de livro. Após a exportação em formato BibTeX e o processamento no *software* R com o pacote Bibliometrix, foi gerado um banco consolidado contendo 103 registros únicos, já com a remoção automática de registros duplicados. Esses registros foram utilizados para caracterização inicial da produção científica sobre o tema. Posteriormente, os estudos foram submetidos à triagem qualitativa para composição da revisão sistemática.

Foram considerados elegíveis os artigos originais que apresentavam dados experimentais sobre a toxicidade de bioinsumos em organismos não-alvo e que estavam disponíveis em texto completo, seja em acesso aberto, seja por meio do portal CAPES. Foram excluídos trabalhos de revisão, estudos teóricos sem experimentação e pesquisas envolvendo contaminantes distintos de bioinsumos ou que não apresentassem avaliação ecotoxicológica experimental em organismos não-alvo.

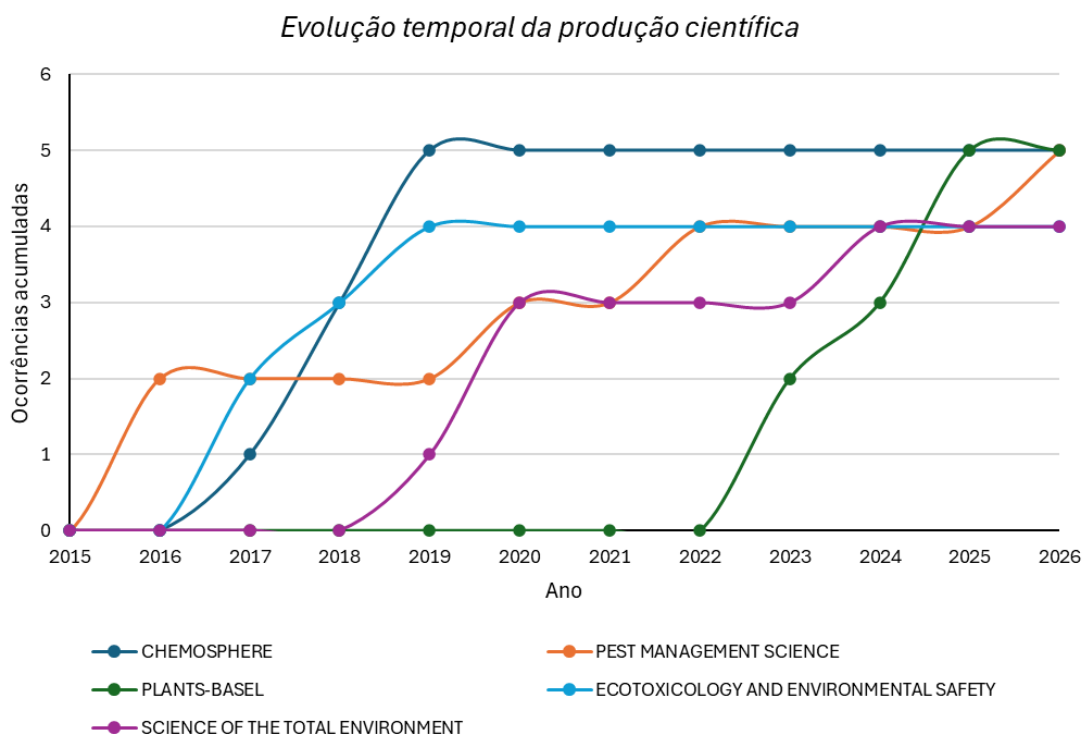
Os 103 registros bibliográficos únicos foram submetidos à triagem com base nos critérios de elegibilidade definidos. Como resultado, vinte e dois estudos experimentais publicados nos últimos dez anos atenderam aos critérios de elegibilidade e foram incluídos nesta revisão sistemática. Os estudos selecionados foram organizados no Quadro 1, contendo informações sobre os organismos avaliados, o tipo de bioinsumo utilizado, o delineamento experimental, os principais resultados obtidos e as respectivas referências.

### 3 Resultados e Discussão

O estudo temporal das fontes científicas que abordaram a toxicidade de bioinsumos em organismos não-alvo, revelou um aumento expressivo do interesse científico ao longo da última década. A partir de 2017, observou-se um crescimento contínuo no número de publicações, refletindo a intensificação do uso desses insumos na agricultura moderna e a necessidade de avaliar seus riscos ambientais (Karaođlan *et al.*, 2024; Sacco *et al.*, 2025; Turchen *et al.*, 2020). Conforme evidenciado na Figura 1, considerando os 103 registros

identificados na busca bibliográfica, periódicos de escopo ambiental e ecotoxicológico, como *Chemosphere* e *Pest Management Science*, *Plants-Basel*, *Ecotoxicology and Environmental Safety* e *Science of the Total Environment* passaram a concentrar parte significativa dessas publicações, indicando uma mudança no enfoque da literatura científica para avaliações mais críticas e integradas do impacto ambiental dos bioinsumos (Karaođlan *et al.*, 2024).

**Figura 1.** Evolução temporal da produção científica por periódicos sobre toxicidade de bioinsumos em organismos não-alvo.



Fonte: Autores.

O aumento da produção científica em periódicos tradicionalmente associados à avaliação de risco ambiental sugere que a origem biológica dos insumos deixou de ser considerada sinônimo de segurança ecológica (Karaođlan *et al.*, 2024; Turchen *et al.*, 2020). Paralelamente, a presença de periódicos voltados à produção agrícola, como *Industrial Crops and Products*, evidencia o esforço em conciliar eficiência agrônômica com sustentabilidade ambiental (de Souza *et al.*, 2024; Modafferi *et al.*, 2024). Essa convergência temática indica a maturação do debate científico, no qual os bioinsumos passam a ser analisados de forma

crítica, considerando não apenas sua eficácia no controle de pragas, mas também seus efeitos colaterais sobre organismos não-alvo e serviços ecossistêmicos (Machado *et al.*, 2025).

Entre os bioinsumos de origem vegetal, óleos essenciais e extratos botânicos destacam-se por apresentarem elevada variabilidade nos perfis ecotoxicológicos, em função de sua composição química complexa (Machado *et al.*, 2025). Compostos presentes em óleos essenciais, como os constituintes de *Mentha spicata*, *Eucalyptus citriodora*, *Allium sativum* e *Syzygium aromaticum*, demonstraram elevada atividade inseticida e larvicida, mas também foram associados à indução de estresse oxidativo, alterações em biomarcadores antioxidantes e efeitos fisiológicos em espécies expostas, inclusive em concentrações consideradas ambientalmente relevantes (Amaral *et al.*, 2024; Diogo; Antunes; Rodrigues, 2023; Unni *et al.*, 2024). Esses achados reforçam que a ausência de toxicidade letal imediata, caracterizada pela mortalidade aguda após curtos períodos de exposição, não implica ausência de efeitos subletais e crônicos, manifestados por alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas (Amaral *et al.*, 2024). Tais efeitos, embora não resultem em mortalidade instantânea, podem comprometer funções ecológicas essenciais e processos ambientais ao longo do tempo, especialmente sob condições de exposição repetida (Dhaouadi *et al.*, 2024; Machado *et al.*, 2025; Sacco *et al.*, 2025).

A análise integrada dos 22 estudos revelou um panorama heterogêneo sobre os efeitos toxicológicos dos bioinsumos. Embora muitos desses produtos sejam promovidos como alternativas mais seguras e ambientalmente sustentáveis aos agrotóxicos, as evidências apontam que sua segurança depende de múltiplos fatores, tais como tipo de composto, concentração, tempo de exposição, organismo testado e condições ambientais. Os resultados demonstram que a seletividade ecológica dos bioinsumos é relativa e dependente do contexto de exposição, não podendo ser generalizada apenas com base na origem biológica dos compostos. Além da mortalidade aguda, diversos estudos relataram efeitos subletais importantes, incluindo alterações bioquímicas (Diogo; Antunes; Rodrigues, 2023; Amaral *et al.*, 2024), imunológicas (Planelló *et al.*, 2024; Yuan *et al.*, 2025), comportamentais (da Silva *et al.*, 2018), reprodutivas (Amaral *et al.*, 2024) e histopatológicas (Mariano *et al.*, 2021), demonstrando que a ausência de mortalidade imediata não necessariamente indica segurança ecológica dos bioinsumos.

Embora os bioinsumos de origem vegetal apresentem elevada eficácia no controle de pragas, seus efeitos sobre organismos não-alvo podem variar conforme a dose e a formulação

empregada. Compostos presentes nos bioinsumos avaliados, como os constituintes dos óleos essenciais de *Mentha spicata*, *Eucalyptus citriodora*, *Allium sativum* e *Syzygium aromaticum*, demonstraram elevada atividade inseticida e larvicida, mas também foram associados a alterações fisiológicas e bioquímicas em organismos não-alvo, incluindo estresse oxidativo, alterações em biomarcadores antioxidantes e efeitos intestinais (Amaral *et al.*, 2024; Diogo; Antunes; Rodrigues, 2023; Modafferi *et al.*, 2025b; Unni *et al.*, 2024). Esses efeitos incluíram alterações em biomarcadores antioxidantes, aumento do estresse oxidativo, peroxidação lipídica, neurotoxicidade e mudanças no comportamento natatório e na sobrevivência de organismos não-alvo, indicando impactos subletais capazes de comprometer funções fisiológicas e ecológicas de espécies benéficas.

Em alguns casos, também foram observadas alterações em vias hormonais e mecanismos de detoxificação celular. A exposição à 2-dodecanona, por exemplo, modificou a expressão de genes relacionados à sinalização hormonal e ao estresse celular em insetos benéficos não-alvo, sugerindo potencial interferência endócrina mesmo na ausência de efeitos letais imediatos (Planelló *et al.*, 2024). A sensibilidade dos organismos aquáticos, tais como *Daphnia magna* e *Danio rerio*, também foi evidente em testes de toxicidade aguda (Dhaouadi *et al.*, 2024; Diogo; Antunes; Rodrigues, 2023; Pino-Otín *et al.*, 2019a) demonstrando que até compostos de origem natural podem apresentar risco quando aplicados de forma inadequada.

Efeitos ecotoxicológicos também foram observados em organismos terrestres do solo, incluindo minhocas, colêmbolos e nematoides, nos quais foram registrados redução da reprodução, alterações comportamentais, toxicidade aguda e impactos sobre a estrutura das comunidades edáficas (Chelinho *et al.*, 2017; Dinesh-Kumar *et al.*, 2018; Pino-Otín *et al.*, 2019c; Pino-Otín *et al.*, 2019b). Esses resultados reforçam a necessidade de considerar diferentes compartimentos ambientais nas avaliações de segurança dos bioinsumos.

A toxicidade dos bioinsumos também variou conforme a via e o método de exposição. Estudos com exposição direta por contato, ingestão ou aplicação tópica relataram maiores impactos biológicos em organismos não-alvo, incluindo aumento da mortalidade, alterações fisiológicas e danos celulares, quando comparados a exposições indiretas ou residuais (Modafferi *et al.*, 2025a; Scudeler *et al.*, 2016; Vieira *et al.*, 2024). Esses resultados indicam que a forma de aplicação em campo pode influenciar significativamente o potencial de contaminação ambiental e os efeitos ecotoxicológicos dos bioinsumos.

Além dos efeitos fisiológicos observados em organismos individuais, alguns estudos demonstraram que os bioinsumos também podem alterar comunidades microbianas e processos ecológicos fundamentais. Alterações na microbiota intestinal, redução da atividade fisiológica bacteriana do solo, mudanças na degradação de substratos de carbono e impactos sobre comunidades de nematoides foram relatados após exposição a hidrolatos vegetais, bioinseticidas microbianos e nanoformulações (Chelinho *et al.*, 2017; Gutierrez-Villagomez *et al.*, 2021; Machado *et al.*, 2025; Modafferi *et al.*, 2025b; Pino-Otín *et al.*, 2019a; Pino-Otín *et al.*, 2019c; Pino-Otín *et al.*, 2019b). Esses resultados sugerem que os efeitos ecotoxicológicos dos bioinsumos podem extrapolar os níveis individuais e interferir em processos ecológicos importantes para o equilíbrio dos ecossistemas.

Além das características biológicas dos organismos expostos, fatores ambientais e físico-químicos também podem influenciar a persistência, estabilidade e biodisponibilidade dos bioinsumos no ambiente, modificando sua toxicidade potencial e distribuição nos diferentes compartimentos ecológicos. Nos bioinseticidas microbianos, formulações à base de *Bacillus thuringiensis* destacaram-se pela elevada eficácia no controle de pragas e larvas de mosquitos; entretanto, alguns estudos relataram efeitos fisiológicos e histopatológicos em organismos aquáticos não-alvo (Gutierrez-Villagomez *et al.*, 2021; Lajmanovich *et al.*, 2015; Mariano *et al.*, 2021). Em peixes expostos ao bioinseticida foram observadas alterações hematológicas, bioquímicas e lesões em fígado, rins e intestino, enquanto em anfíbios ocorreram estresse oxidativo, genotoxicidade, alterações intestinais e mudanças na microbiota intestinal (Lajmanovich *et al.*, 2015; Mariano *et al.*, 2021). Esses resultados demonstram que, embora *Bacillus thuringiensis* seja frequentemente considerado seletivo e ambientalmente seguro, seus efeitos sobre organismos não-alvo devem ser avaliados considerando a espécie exposta, a formulação utilizada e as condições ambientais do ecossistema afetado. Em contraste, alguns bioinseticidas microbianos apresentaram baixa toxicidade para organismos aquáticos não-alvo. Formulações de *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* avaliadas por Dhaouadi *et al.* (2024) causaram poucos efeitos em *Daphnia magna* e não afetaram a bioluminescência de *Aliivibrio fischeri*, demonstrando que a seletividade pode variar significativamente entre formulações comerciais e experimentais.

Entre os bioinseticidas microbianos, destacam-se também os fungos entomopatogênicos, especialmente *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* e *Isaria fumosorosea*, que apresentaram elevada eficiência como agentes de controle biológico, mas

também causaram efeitos adversos em organismos não-alvo, como abelhas sem ferrão (Vieira *et al.*, 2024). Em *Melipona scutellaris*, a exposição aos biopesticidas fúngicos resultou em aumento da mortalidade, com intensidade variável conforme a via de exposição, incluindo ingestão, contato com superfícies contaminadas e aplicação tópica. Esses resultados são particularmente relevantes devido ao papel ecológico dos polinizadores na manutenção da biodiversidade e da produtividade agrícola. Assim, embora os bioinseticidas microbianos sejam considerados alternativas mais sustentáveis ao controle químico convencional, os estudos demonstram que sua segurança ecológica depende do tipo de formulação, da forma de aplicação e da sensibilidade dos organismos expostos.

Além de bactérias e fungos, bioinseticidas virais também demonstraram potencial para afetar organismos não-alvo. O *Autographa californica multiple nucleopolyhedrovirus* (AcMNPV), utilizado no controle de lepidópteros-praga, alterou mecanismos imunológicos e vias antivirais em *Arma chinensis*, indicando que agentes virais podem interferir na resposta imune de inimigos naturais benéficos (Yuan *et al.*, 2025). Esses achados reforçam que mesmo bioinsumos considerados altamente específicos podem apresentar efeitos indiretos sobre organismos ecologicamente importantes.

Comparando os diferentes grupos de bioinsumos, observou-se variação nos padrões de toxicidade e seletividade entre formulações vegetais, microbianas e nanoestruturadas. Os bioinsumos de origem vegetal frequentemente apresentaram efeitos agudos dependentes da dose, incluindo estresse oxidativo, neurotoxicidade e alterações fisiológicas em organismos não-alvo, especialmente aquáticos (Amaral *et al.*, 2024; Diogo; Antunes; Rodrigues, 2023). Já os bioinseticidas microbianos, embora considerados mais seletivos em alguns estudos, também foram associados a alterações hematológicas, histopatológicas, genotóxicas e imunológicas em organismos não-alvo, dependendo da espécie exposta e da formulação utilizada (Lajmanovich *et al.*, 2015; Mariano *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2024).

As nanoformulações apresentaram comportamento ecotoxicológico variável. Em alguns casos, a nanoencapsulação reduziu os efeitos tóxicos sobre organismos não-alvo, como observado para o piretro encapsulado em nanopartículas lipídicas sólidas em *Apis mellifera* (Oliveira *et al.*, 2019). Entretanto, outras formulações nanoestruturadas mantiveram ou ampliaram efeitos adversos em organismos aquáticos, do solo e polinizadores, indicando que a nanotecnologia não elimina necessariamente os riscos ambientais associados aos bioinsumos (Machado *et al.*, 2025; Modafferi *et al.*, 2025a; Modafferi *et al.*, 2025b). Esses

resultados indicam que a escolha do bioinsumo deve considerar não apenas sua eficácia no controle de pragas, mas também sua compatibilidade ecológica, o organismo potencialmente exposto e o risco de impactos ambientais associados ao uso.

Os estudos analisados demonstraram que os bioinsumos constituem alternativas promissoras para o manejo sustentável de pragas, embora diversos estudos evidenciem a necessidade de avaliações ecotoxicológicas mais abrangentes, considerando diferentes organismos não-alvo, níveis tróficos e tipos de formulação (Chelinho *et al.*, 2017; Machado *et al.*, 2025; Vieira *et al.*, 2024). Os resultados também indicam que compostos naturais, bioinseticidas microbianos e nanoformulações podem causar efeitos fisiológicos, bioquímicos, imunológicos e histopatológicos em organismos aquáticos e terrestres, mesmo quando considerados ambientalmente seguros (Amaral *et al.*, 2024; Mariano *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2019). Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de protocolos padronizados de avaliação toxicológica e ecotoxicológica, incluindo abordagens multiespécies e multitróficas, a fim de ampliar a compreensão sobre os riscos ambientais associados ao uso desses produtos. Dessa forma, os resultados demonstraram que a sustentabilidade dos bioinsumos não depende exclusivamente de sua origem biológica, mas também de sua seletividade ecológica, persistência ambiental, formulação e modo de aplicação. Assim, a adoção segura desses produtos requer integração entre pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e regulamentação ecotoxicológica baseada em múltiplos níveis de organização biológica e diferentes compartimentos ambientais.

**Quadro 1.** Revisão de estudos sobre efeitos da toxicidade de bioinsumos em organismos não-alvo.

Bioinsumos	Organismos não-alvo	Metodologia	Principais resultados	Referência
Hidrolato e extrato orgânico de <i>Artemisia absinthium</i>	<i>Daphnia magna</i> ; <i>Vibrio fischeri</i> ; <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> ; comunidade microbiana natural de rio	Avaliação ecotoxicológica do hidrolato e extrato orgânico de <i>A. absinthium</i> em organismos aquáticos não-alvo, com determinação da toxicidade aguda (LC50) e análise dos efeitos sobre comunidade microbiana natural.	Toxicidade aguda significativa para organismos aquáticos. <i>D. magna</i> foi a espécie mais sensível.	Pino-Otín <i>et al.</i> (2019a)
Extrato de piretro – PE	<i>Daphnia magna</i>	Avaliação de toxicidade aguda (0,6–40,0 µg/L; 96 h; EC50/LC50) e subcrônica (0,7–1,1 µg/L; 10 dias) em <i>D. magna</i> , incluindo parâmetros de história de vida, comportamento natatório, estresse oxidativo, peroxidação lipídica, neurotoxicidade e reservas energéticas.	O aumento da concentração de PE causou mortalidade, alterações no comportamento natatório, estresse oxidativo, peroxidação lipídica e neurotoxicidade. Em exposição subcrônica houve aumento das reservas energéticas, parâmetros antioxidantes e peroxidação lipídica, indicando desequilíbrio do metabolismo oxidativo. O estudo demonstrou alta vulnerabilidade de <i>D. magna</i> ao PE, apesar de ser considerado ambientalmente seguro.	Diogo; Antunes; Rodrigues (2023)
Óleo essencial de <i>Satureja montana</i> nanoencapsulado em montmorilonita	<i>Aliivibrio fischeri</i> , <i>Raphidocelis subcapitata</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Daphnia magna</i> , <i>Folsomia candida</i> e microbiota do solo	Avaliação ecotoxicológica do óleo essencial, Tween 20, nanoclay MMT e formulação nanoargila-EO em organismos aquáticos e terrestres, utilizando protocolos padronizados para toxicidade, crescimento, reprodução e atividade microbiana do solo.	<i>D. magna</i> e <i>R. subcapitata</i> foram os organismos mais sensíveis à nanoformulação, enquanto a reprodução de <i>F. candida</i> foi reduzida em todas as concentrações. A formulação estimulou a atividade microbiana do solo, mas não reduziu a toxicidade do óleo essencial, podendo aumentar riscos ecotoxicológicos para organismos aquáticos e do solo.	Machado <i>et al.</i> (2025)
Hidrolato de <i>Artemisia absinthium</i>	<i>Eisenia fetida</i> , <i>Allium cepa</i> e microbiota do solo	Avaliação ecotoxicológica do hidrolato em organismos terrestres de diferentes níveis tróficos, incluindo análise de toxicidade aguda (LC50), atividade fisiológica microbiana, degradação de substratos de carbono e sequenciamento do gene 16S rRNA para comunidades bacterianas.	O hidrolato apresentou toxicidade para <i>A. cepa</i> , <i>E. fetida</i> e bactérias do solo, reduzindo a atividade fisiológica microbiana e alterando a degradação de substratos de carbono, o que indica impactos sobre organismos-chave do solo.	Pino-Otín <i>et al.</i> (2019c)
1,4-naftoquinona (1,4-NTQ)	<i>Zea mays</i> ; <i>Brassica</i>	Ensaio ecotoxicológicos ISO em	A 1,4-NTQ foi tóxica para todas as espécies	Chelinho <i>et al.</i> (2017)

de origem natural obtida de casca de noz	<i>napus</i> ; <i>Eisenia andrei</i> ; <i>Folsomia candida</i> ; <i>Enchytraeus crypticus</i> ; comunidades de nematoides do solo	solo contaminado com diferentes concentrações de 1,4-NTQ, avaliando emergência e crescimento de plantas, comportamento de fuga, reprodução de invertebrados do solo e alterações em comunidades de nematoides não-alvo.	testadas, com maior sensibilidade de <i>F. candida</i> e <i>E. andrei</i> . Também reduziu a abundância e diversidade de nematoides do solo, embora tenha ocorrido recuperação parcial em baixas concentrações. Concentrações inferiores a 20 mg kg <sup>-1</sup> podem ser seguras ambientalmente, mas pouco eficazes contra nematoides-alvo.	
Óleos essenciais de <i>Mentha spicata</i> e <i>Eucalyptus citriodora</i>	Predador aquático e <i>Apis mellifera</i>	Caracterização química dos óleos por GC-MS, avaliação larvicida e repelente contra <i>Culex quinquefasciatus</i> , análises histológicas e fotomicrográficas em larvas expostas, além de avaliação de toxicidade em predador aquático e análise <i>in silico</i> de toxicidade para <i>A. mellifera</i> usando BeeTox.	Os óleos apresentaram alta atividade larvicida e repelente contra <i>Culex quinquefasciatus</i> , com baixa toxicidade para predadores aquáticos e menor impacto ambiental em comparação ao Temephos. A análise <i>in silico</i> também indicou ausência de toxicidade de contato para <i>A. mellifera</i> , sugerindo maior segurança ambiental dos óleos essenciais.	Unni <i>et al.</i> (2024)
Hidrolato de <i>Lavandula luisieri</i>	<i>Eisenia fetida</i> , <i>Allium cepa</i> e microbiota do solo	Avaliação ecotoxicológica do hidrolato em organismos do solo de diferentes níveis tróficos, incluindo testes de toxicidade aguda (LC50), crescimento bacteriano, diversidade fisiológica microbiana e sequenciamento do gene 16S rRNA.	O hidrolato apresentou toxicidade para <i>A. cepa</i> e efeito moderado sobre <i>E. fetida</i> , além de reduzir o crescimento bacteriano e alterar a diversidade funcional da comunidade microbiana do solo.	Pino-Otín <i>et al.</i> (2019b)
Bioinseticidas formulados à base de <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>kurstaki</i> (BLB1 e Lip)	<i>Daphnia magna</i> e <i>Aliivibrio fischeri</i>	Ensaio de toxicidade aguda comparando BLB1 e Lip com o biopesticida comercial Delfin® e formulação controle à base de lactose, avaliando motilidade/sobrevivência de <i>D. magna</i> e bioluminescência de <i>A. fischeri</i> .	BLB1 e Lip apresentaram baixa toxicidade para organismos aquáticos não-alvo, com poucos efeitos sobre <i>D. magna</i> e sem impacto na bioluminescência de <i>A. fischeri</i> . Ambos se mostraram menos tóxicos que o biopesticida comercial Delfin®.	Dhaouadi <i>et al.</i> (2024)
Extrato metanólico de <i>Swietenia mahagoni</i>	Minhoca <i>Eudrilus eugeniae</i>	Caracterização fitoquímica por GC-MS, avaliação inseticida contra <i>Spodoptera litura</i> (mortalidade, desenvolvimento, fecundidade e histologia intestinal) e ensaio de	O extrato apresentou alta toxicidade contra <i>Spodoptera litura</i> , causando alterações no desenvolvimento, redução da fecundidade e danos intestinais nas larvas. Em contrapartida, não apresentou toxicidade significativa para <i>E.</i>	Dinesh-Kumar <i>et al.</i> (2018)

		toxicidade em minhocas do solo comparando o extrato vegetal com monocrotófos.	<i>eugeniae</i> , mostrando-se menos tóxico que o monocrotófos para organismos benéficos do solo.	
Nanoemulsões de óleos essenciais de <i>Allium sativum</i> , <i>Eucalyptus</i> e <i>Syzygium aromaticum</i>	Parasitoide <i>Anagaspis daci</i>	Desenvolvimento de nanoemulsões por microfluidização de alta pressão e avaliação da atividade inseticida contra <i>Ceratitidis capitata</i> . A nanoemulsão mais promissora foi avaliada quanto à toxicidade para <i>A. daci</i> , expressão gênica de enzimas de detoxificação e alterações na microbiota intestinal.	A nanoemulsão de alho apresentou maior atividade inseticida contra <i>Ceratitidis capitata</i> , porém causou alta mortalidade no parasitoide não-alvo <i>A. daci</i> . Além disso, desencadeou forte resposta de detoxificação metabólica no parasitoide e promoveu alterações significativas na microbiota intestinal de <i>C. capitata</i> .	Modafferi <i>et al.</i> (2025b)
Spinosad (SPI) composto por uma mistura de duas espinosinas naturais (A e D) isoladas a partir da fermentação do actinomiceto <i>Saccharopolyspora spinosa</i>	<i>Danio rerio</i>	Avaliação ecotoxicológica aguda (0,07–1,0 mg/L) e crônica (0,006–0,100 mg/L), com análise de biomarcadores antioxidantes, peroxidação lipídica, metabolismo energético e neurotoxicidade colinérgica.	O spinosad induziu estresse oxidativo, alterações nas vias energéticas e efeitos neurotóxicos em ambas as exposições, mesmo em concentrações ambientalmente relevantes. O índice integrado de biomarcadores (IBRv2) mostrou aumento dos impactos com o aumento da concentração do bioinseticida, demonstrando a vulnerabilidade de <i>D. rerio</i> a esse composto tradicionalmente descrito como seguro.	Amaral <i>et al.</i> (2024)
Biopesticidas a base de fungos entomopatogênicos ( <i>Beauveria bassiana</i> , <i>Metarhizium anisopliae</i> , <i>Isaria fumosorosea</i> )	<i>Melipona scutellaris</i>	Avaliação da sobrevivência de operárias expostas aos fungos por ingestão, contato com superfície contaminada e aplicação tópica, utilizando curvas de sobrevivência de Kaplan-Meier durante 168 horas.	Todos os biopesticidas causaram mortalidade em <i>M. scutellaris</i> , com variações conforme a via de exposição. Os fungos <i>B. bassiana</i> , <i>M. anisopliae</i> e <i>I. fumosorosea</i> apresentaram diferentes níveis de toxicidade, ressaltando a importância de estratégias de aplicação para minimizar impactos sobre abelhas.	Vieira <i>et al.</i> (2024)
Derisom® à base de karanjina	<i>Cyprinus carpio</i>	Exposição subletal de <i>C. carpio</i> a 0,28 ppm do biopesticida durante 21 dias, com análises bioquímicas em brânquias, fígado, rins e músculos. Foram avaliadas proteínas totais, aminoácidos livres, glutamato desidrogenase (GDH), alanina aminotransferase (ALAT) e aspartato	O biopesticida causou alterações significativas em todos os parâmetros bioquímicos avaliados nos diferentes tecidos e períodos de exposição. As mudanças em proteínas, aminoácidos e enzimas do metabolismo proteico indicaram efeitos tóxicos subletais em <i>C. carpio</i> , demonstrando que o biopesticida pode afetar organismos aquáticos não-alvo.	Tasneem; Yasmeeen (2021)

		aminotransferase (AAT).		
<i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>Arapaima gigas</i>	Exposição de peixes ao biopesticida via água (0,13 g/L) e alimentação (0,13 g) durante 24 e 48 h, com análises hematológicas, bioquímicas e histopatológicas em fígado, rins e intestino.	Alterações hematológicas, bioquímicas e enzimáticas significativas. Lesões histopatológicas no fígado, rins e intestino, incluindo vacuolização citoplasmática, hipertrofia e atrofia nuclear, necrose e alterações nas vilosidades intestinais.	Mariano <i>et al.</i> (2021)
<i>Bacillus thuringiensis israelensis</i> (Bti)	Girinos de <i>Lithobates sylvaticus</i> e <i>Anaxyrus americanus</i>	Exposição aguda e crônica de girinos a diferentes concentrações de VectoBac 200G e 1200L até a metamorfose, avaliando sobrevivência, crescimento, índices somáticos, expressão gênica, histologia intestinal e composição da microbiota intestinal.	Os produtos não causaram efeitos significativos sobre sobrevivência ou crescimento dos anfíbios, mas alteraram o tempo de metamorfose e a composição da microbiota intestinal, com aumento de grupos bacterianos como Verrucomicrobia, Firmicutes, Bacteroidetes e Actinobacteria.	Gutierrez-Villagomez <i>et al.</i> (2021)
Formulação comercial líquida de <i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>israelensis</i> (Introbans®)	Girinos de <i>Leptodactylus latrans</i>	Exposição laboratorial de girinos a diferentes concentrações de Bti-AS (0–40 mg/L), avaliando mortalidade (LC50, NOEC e LOEC), atividade antioxidante (GST e CAT), genotoxicidade em eritrócitos e alterações histológicas intestinais.	Os girinos apresentaram sensibilidade dose-dependente ao <i>Bacillus thuringiensis israelensis</i> , com mortalidade elevada, estresse oxidativo, genotoxicidade e danos intestinais após exposições subletais.	Lajmanovich <i>et al.</i> (2015)
Óleo de neem de <i>Azadirachta indica</i>	Predador <i>Ceraeochrysa claveri</i>	Larvas de <i>C. claveri</i> foram alimentadas com ovos contaminados de <i>Diatraea saccharalis</i> tratados com óleo de neem (0,5%, 1% e 2%). Em fêmeas adultas foram realizadas análises morfológicas e ultraestruturais do intestino médio, além da avaliação de mecanismos de detoxificação celular.	Severos danos citotóxicos no intestino médio, incluindo alterações celulares e organelares. Apesar da ativação de mecanismos de proteção e detoxificação, os efeitos não foram totalmente revertidos, indicando impactos subletais importantes em organismos benéficos não-alvo.	Scudeler <i>et al.</i> (2016)
Abamectina	Camundongos <i>Mus musculus</i>	Exposição crônica (90 dias) de camundongos machos e fêmeas a 1/10 da LD50 de abamectina, seguida de testes comportamentais e neurológicos: reconhecimento de	A exposição à abamectina causou prejuízo na memória espacial, evidenciado pelo maior tempo para localizar a plataforma no MWM e menor permanência no quadrante-alvo. Camundongos Swiss apresentaram comportamento depressivo	da Silva <i>et al.</i> (2018)

		objeto novo (NORT), labirinto aquático de Morris (MWM), teste de suspensão pela cauda (TST) e teste de natação forçada (FST).	no FST. Os resultados demonstraram potencial neurotóxico da abamectina, incluindo déficits de memória e alterações comportamentais em mamíferos não-alvo.	
2-Dodecanona (metabólito secundário vegetal), produto comercial	<i>Nasonia vitripennis</i>	Exposição de pupas de <i>N. vitripennis</i> a doses subletais de 2-Dodecanona (5 e 500 µg/L) por até 6 dias, com avaliação de expressão gênica, níveis hormonais, atividade enzimática, desenvolvimento, reservas energéticas, fecundidade e genotoxicidade.	A 2-dodecanona alterou a expressão de genes ligados à sinalização hormonal, detoxificação e estresse celular em insetos benéficos não-alvo, sugerindo potencial interferência endócrina, embora sem efeitos significativos sobre desenvolvimento, fecundidade ou genotoxicidade.	Planelló <i>et al.</i> (2024)
Nanoemulsão de óleo essencial de <i>Allium sativum</i>	<i>Apis mellifera</i> ; plantas de pimentão-doce	Desenvolvimento e caracterização físico-química da nanoemulsão por microfluidização de alta pressão, seguida de bioensaios de toxicidade contra <i>Aphis gossypii</i> e avaliação de efeitos em abelhas e plantas.	Elevada atividade inseticida contra <i>A. gossypii</i> , com baixas doses letais em aplicações tópicas e por contato residual. Os efeitos fitotóxicos em plantas de pimentão foram desprezíveis. Entretanto, a formulação mostrou alta toxicidade para <i>A. mellifera</i> por ingestão, indicando risco potencial para polinizadores não-alvo.	Modafferi <i>et al.</i> (2025a)
<i>Autographa californica multiple nucleopolyhedrovirus (AcMNPV)</i>	<i>Arma chinensis</i>	Avaliação dos efeitos do AcMNPV no sistema imune de <i>A. chinensis</i> , incluindo análise de mecanismos antivirais, expressão de miR-8 e participação das vias RNAi, JAK/STAT e Toll na resposta imunológica.	O <i>Autographa californica multiple nucleopolyhedrovirus</i> afetou a resposta imune de <i>A. chinensis</i> , modulando vias antivirais e imunológicas. Os resultados indicam que o vírus, embora usado contra lepidópteros-praga, pode causar efeitos colaterais em inimigos naturais não-alvo.	Yuan <i>et al.</i> (2025)
Nanopesticida de extrato de piretro encapsulado em nanopartículas lipídicas sólidas (SLN + PYR)	<i>Apis mellifera</i>	Desenvolvimento e caracterização físico-química de nanopartículas lipídicas sólidas contendo extrato de piretro, seguida de avaliação da toxicidade de curto prazo em <i>A. mellifera</i> , incluindo análise de sobrevivência e morfologia do intestino médio.	O nanopesticida apresentou alta estabilidade e eficiência de encapsulação. Enquanto o extrato de piretro livre reduziu a longevidade e causou danos intestinais em abelhas, o piretro nanoencapsulado não mostrou efeitos significativos nas células digestivas, indicando maior segurança para organismos não-alvo no curto prazo.	Oliveira <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autores.

#### 4 Considerações finais

A presente revisão demonstrou que os bioinsumos representam estratégias sustentáveis para o manejo de pragas, especialmente devido à sua elevada eficácia biológica e ao potencial de redução do uso de pesticidas sintéticos convencionais. Entretanto, os estudos analisados evidenciaram que esses produtos não são isentos de riscos ecotoxicológicos, podendo causar efeitos adversos em organismos não-alvo aquáticos e terrestres, incluindo alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais, imunológicas e histopatológicas. Além da mortalidade aguda, diversos trabalhos relataram efeitos subletais, como estresse oxidativo, neurotoxicidade, alterações reprodutivas, danos intestinais e modificações na microbiota e em comunidades microbianas, demonstrando que a ausência de mortalidade imediata não necessariamente indica segurança ambiental.

Os resultados também demonstraram que a toxicidade dos bioinsumos depende de múltiplos fatores, incluindo a natureza do composto, a formulação utilizada, a dose aplicada, o tempo e a via de exposição, bem como a sensibilidade dos organismos avaliados. Organismos aquáticos, especialmente *Daphnia magna* e *Danio rerio*, destacaram-se entre os mais sensíveis aos efeitos ecotoxicológicos observados, enquanto organismos do solo, polinizadores e inimigos naturais também apresentaram respostas adversas relevantes. Nesse contexto, os bioinseticidas microbianos e as nanoformulações mostraram comportamento ecotoxicológico variável, evidenciando que produtos considerados seletivos ou ambientalmente seguros podem apresentar efeitos distintos conforme a formulação e o ecossistema exposto.

A revisão também evidenciou importantes lacunas científicas relacionadas à padronização metodológica dos ensaios ecotoxicológicos e à limitada quantidade de estudos envolvendo múltiplos níveis tróficos, efeitos crônicos e comunidades microbianas do solo e da água. Embora a maioria dos estudos tenha priorizado análises de mortalidade e toxicidade aguda, os estudos apontaram para a importância crescente da incorporação de biomarcadores bioquímicos, análises histopatológicas, avaliações imunológicas e estudos de microbiota para compreensão mais abrangente dos impactos ambientais dos bioinsumos.

Ressalta-se, entretanto, que a heterogeneidade metodológica entre os estudos analisados, incluindo diferenças de organismos-teste, formulações e parâmetros avaliados, limita comparações quantitativas diretas entre os resultados

Dessa forma, conclui-se que a sustentabilidade dos bioinsumos não depende exclusivamente de sua origem biológica, mas também de sua seletividade ecológica,

persistência ambiental, formulação e modo de aplicação. Assim, a adoção segura desses produtos requer integração entre pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e regulamentação ecotoxicológica baseada em abordagens multiespécies, multinível e adaptadas aos diferentes contextos ecológicos, garantindo que os benefícios agrônômicos não ocorram em detrimento da integridade dos ecossistemas.

### Referências bibliográficas

AMARAL, I.; ANTUNES, S. C.; REBELO, D.; CARVALHO, A. P.; RODRIGUES, S. Biopesticide spinosad: unraveling ecotoxicological effects on zebrafish, *Danio rerio*. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 108, p. 104458, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104458>. Acesso em: 05 maio de 2026.

ASSEFA, M.; SAEED, M. T.; NAZ, T.; FAN, Y.; ZHAO, X.; SONG, Y. Biological pesticides as viable alternative to synthetic pesticides for sustainable agriculture and nutrition: A systematic review. **Journal of Sustainable Agriculture and Environment**, v. 5, n. 2, e70139, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1002/sae2.70139>. Acesso em: 05 maio de 2026.

BARBOSA, M. F.; SALES, R. M. M.; GALARZA, F. A. D.; KRUGER, C. Q.; FÁVARO, L. C. de L.; QUIRINO, B. F. Biological resources driving productivity: bioinputs for sustainable plant agriculture in Brazil. **Sustainable Microbiology**, v. 2, n. 3, qvaf011, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/sumbio/qvaf011>. Acesso em: 05 maio de 2026.

CHELINHO, S.; MALEITA, C. M. N.; FRANCISCO, R.; BRAGA, M. E. M.; CUNHA, M. J. M. da; ABRANTES, I.; SOUSA, H. C. de; MORAIS, P. V.; SOUSA, J. P. Toxicity of the bionematicide 1,4-naphthoquinone on non-target soil organisms. **Chemosphere**, v. 181, p. 579–588, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.092>. Acesso em: 05 maio de 2026.

CONTI, P. N.; TANARO, L. F.; CHRISTOFARI, L. F.; GARLET, T. M. B.; PINTO, N. G. M.; VELHO, J. P. Bioinsumos: uma alternativa viável. **Revista DCS**, v. 23, n. 86, p. e3870, 2026. DOI: <https://doi.org/10.54899/dcs.v23i86.3870>. Acesso em: 05 maio de 2026.

CORRÊA, G. M.; PEREIRA, C. de S.; QUEIROZ, A. T. da S.; SILVA, M. P. da; MELLO, M. E. de; OLIVEIRA, T. M. L. de; ARAÚJO, L. C.; FRADE, L. F. da S.; SANTOS, J. B. dos; SILVA, C. M. da; SILVA, A. V. da. Use of bioinputs in sustainable agriculture: trends, challenges and perspectives for reducing the use of agrochemicals. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. e011955, 2025. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n5-003>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DA SILVA, W. A. M. da; GUIMARÃES, A. T. B.; MONTALVÃO, M. F.; MENDES, B. de O.; RODRIGUES, A. S. de L.; MALAFAIA, G. The chronic exposure to abamectin causes spatial memory deficit and depressive behavior in mice. **Chemosphere**, v. 194, p. 523–533, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.028>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DE SOUZA, L.; CARDOSO, M. das G.; KONIG, I.; SOUZA, S. P. de; SILVA, A. L. R.; MELO, N.; MARUCCI, R. C.; HADDI, K. Terpenes and phenylpropanoids for the control of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): toxicity, oxidative stress, histopathology, and

selectivity. **Industrial Crops and Products**, v. 220, p. 119159, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119159>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DEVASENA, T.; IFFATH, B.; RENJITH KUMAR, R.; MUNINATHAN, N.; BASKARAN, K.; SRINIVASAN, T.; JOHN, S. T. Insights on the dynamics and toxicity of nanoparticles in environmental matrices. **Bioinorganic Chemistry and Applications**, v. 2022, n. 1, p. 1-21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4348149>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DHAOUADI, S.; JENI, R. E.; KRAIEM, H.; AYYILDIZ, G.; FILIK-ISCEN, C.; YURTKURAN-CETEREZ, Z.; BOUHAOUALA-ZAHAR, B. Effects of new Btk-based formulations BLB1 and Lip on aquatic non-target organisms. **Biology**, v. 13, n. 10, p. 824, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology13100824>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DINESH-KUMAR, A.; SRIMAAN, E.; CHELLAPPANDIAN, M.; VASANTHA-SRINIVASAN, P.; KARTHI, S.; THANIGAIVEL, A.; PONSANKAR, A.; MUTHUPANDIAN CHANTHINI, K.; SHYAM-SUNDAR, N.; ANNAMALAI, M.; KALAIVANI, K.; HUNTER, W. B.; SENTHIL-NATHAN, S. Target and non-target response of *Swietenia mahagoni* Jacq. chemical constituents against tobacco cutworm *Spodoptera litura* Fab. and earthworm, *Eudrilus eugeniae* Kinb. **Chemosphere**, v. 199, p. 35–43, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.130>. Acesso em: 05 maio de 2026.

DIOGO, B. S.; ANTUNES, S. C.; RODRIGUES, S. Are biopesticides safe for the environment? Effects of pyrethrum extract on the non-target species *Daphnia magna*. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 99, p. 104114, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104114>. Acesso em: 05 maio de 2026.

GOSTIN, I. N.; POPESCU, I. E. Evaluation of the essential oils used in the production of biopesticides: assessing their toxicity toward both arthropod target species and beneficial pollinators. **Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 81, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010081>. Acesso em: 05 maio de 2026.

GUTIERREZ-VILLAGOMEZ, J. M.; PATEY, G.; TO, T. A.; LEFEBVRE-RAINE, M.; LARA-JACOBO, L. R.; COMTE, J.; KLEIN, B.; LANGLOIS, V. S. Frogs respond to commercial formulations of the biopesticide *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*, especially their intestine microbiota. **Environmental Science and Technology**, v. 55, n. 18, p. 12504–12516, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02322>. Acesso em: 05 maio de 2026.

KARAOĞLAN, B.; ALKASSAB, A. T.; BORGES, S.; FISHER, T.; LINK-VRABIE, C.; MCVEY, E.; ORTEGO, L.; NUTI, M. Microbial pesticides: challenges and future perspectives for non-target organism testing. **Environmental Sciences Europe**, v. 36, n. 205, p. 1-40, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-01017-1>. Acesso em: 05 maio de 2026.

LAJMANOVICH, R. C.; JUNGES, C. M.; CABAGNA-ZENKLUSEN, M. C.; ATTADEMO, A. M.; PELTZER, P. M.; MAGLIANESE, M.; MÁRQUEZ, V. E.; BECCARIA, A. J. Toxicity of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* in aqueous suspension on the South American common frog *Leptodactylus latrans* (Anura: Leptodactylidae) tadpoles. **Environmental Research**, v. 136, p. 205–212, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.10.022>. Acesso em: 05 maio de 2026.

LIMA, M. A. P.; BERNARDES, R. C.; FERREIRA, L. M. N.; CATANIA, R.; MAZZEO, G. Non-target effects of biopesticides on stingless bees (Apidae, Meliponini): recent trends and

insights. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 42, p. 100580, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100580>. Acesso em: 05 maio de 2026.

LISI, F.; SISCARO, G.; BIONDI, A.; ZAPPALÀ, L.; RICUPERO, M. Non-target effects of bioinsecticides on natural enemies of arthropod pests. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 45, p. 100624, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100624>. Acesso em 25 maio 2013

MACHADO, S.; GANILHO, C.; ANDREANI, T.; SOUSA, R. M. O. F.; RIBEIRO, A.; PEREIRA, R. Montmorillonite-based essential oil carrier and its effects on non-target species: an environmental perspective on its risk assessment. **Frontiers in Toxicology**, v. 7, p. 1-15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1696913>. Acesso em: 05 maio de 2026.

MARIANO, W. S.; OLIVEIRA-LIMA, J.; SANTUCI, M. A.; LIMA, L. B. D.; MORON, S. E.; TAVARES-DIAS, M. Can a biopesticide based on *Bacillus thuringiensis* affect the physiology and histomorphology of *Arapaima gigas*? **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, supl. 4, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201715>. Acesso em: 05 maio de 2026.

MODAFFERI, A.; LATELLA, I.; LONGORDO, M.; PINEDA, M.; CAVALIERE, R.; FORLANO, P.; PALMERI, V.; GIUNTI, G.; CAMPOLO, O. Is natural always safe? Effective botanical nano-aphicide can be harmful to pollinators. **Environmental Science: Nano**, v. 12, n. 12, p. 5257–5269, 2025a. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5en00498e>. Acesso em: 05 maio de 2026.

MODAFFERI, A.; RICUPERO, M.; MOSTACCHIO, G.; LATELLA, I.; ZAPPALÀ, L.; PALMERI, V.; GARZOLI, S.; GIUNTI, G.; CAMPOLO, O. Bioactivity of *Allium sativum* essential oil-based nano-emulsion against *Planococcus citri* and its predator *Cryptolaemus montrouzieri*. **Industrial Crops and Products**, v. 208, p. 117837, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117837>. Acesso em: 05 maio de 2026.

MODAFFERI, A.; URBANEJA, A.; AURE, C. M.; GIUNTI, G.; MARTINEZ-SAÑUDO, I.; IENCO, A.; CAMPOLO, O.; PALMERI, V.; PEREZ-HEDO, M. Metabolic and microbial responses of *Ceratitis capitata* to essential oil-based nano-emulsions: implications for pest management. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 214, p. 106569, 2025b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106569>. Acesso em: 05 maio de 2026.

OLIVEIRA, C. R.; DOMINGUES, C. E. C.; MELO, N. F. S. de; ROAT, T. C.; MALASPINA, O.; JONES-COSTA, M.; SILVA-ZACARIN, E. C. M.; FRACETO, L. F. Nanopesticide based on botanical insecticide pyrethrum and its potential effects on honeybees. **Chemosphere**, v. 236, p. 124282, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.013>. Acesso em: 05 maio de 2026.

PAVELA, R. History, presence and perspective of using plant extracts as commercial botanical insecticides and farm products for protection against insects: a review. **Plant Protection Science**, v. 52, n. 4, p. 229–241, 2016. DOI: <https://doi.org/10.17221/31/2016-PPS>. Acesso em: 05 maio de 2026.

PINO-OTÍN, M. R.; BALLESTERO, D.; NAVARRO, E.; GONZÁLEZ-COLOMA, A.; VAL, J.; MAINAR, A. M. Ecotoxicity of a novel biopesticide from *Artemisia absinthium* on non-target aquatic organisms. **Chemosphere**, v. 216, p. 131–146, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.071>. Acesso em: 05 maio de 2026.

PINO-OTÍN, M. R.; VAL, J.; BALLESTERO, D.; NAVARRO, E.; SÁNCHEZ, E.; GONZÁLEZ-COLOMA, A.; MAINAR, A. M. Ecotoxicity of a new biopesticide produced by *Lavandula luisieri* on non-target soil organisms from different trophic levels. **Science of the Total Environment**, v. 671, p. 83–93, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.293>. Acesso em: 05 maio de 2026.

PINO-OTÍN, M. R.; VAL, J.; BALLESTERO, D.; NAVARRO, E.; SÁNCHEZ, E.; MAINAR, A. M. Impact of *Artemisia absinthium* hydrolate extracts with nematicidal activity on non-target soil organisms of different trophic levels. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 180, p. 565–574, 2019c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.055>. Acesso em: 05 maio de 2026.

PLANELLÓ, R.; AQUILINO, M.; BEAUGEARD, L.; LLORENTE, L.; HERRERO, Ó.; SIAUSSAT, D.; LÉCUREUIL, C. Unveiling molecular effects of the secondary metabolite 2-dodecanone in the model hymenopteran *Nasonia vitripennis*. **Toxics**, v. 12, n. 2, p. 1-19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12020159>. Acesso em: 05 maio de 2026.

RIDOY, Md. N.; SUPTO, Sk. T. J. Environmental impacts and sustainability of nanomaterials in water and soil systems. **Materials Proceedings**, v. 26, n. 1, p. 6, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2025026006>. Acesso em: 05 maio de 2026.

SACCO, D.; VELÍŠEK, J.; MIKUŠKOVÁ, N. Toxicological effects of azadirachtin on aquatic species: a review of its role in biopesticides. **Aquatic Toxicology**, v. 288, p. 107547, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107547>. Acesso em: 05 maio de 2026.

SCUDELER, E. L.; GARCIA, A. S. G.; PADOVANI, C. R.; PINHEIRO, P. F. F.; SANTOS, D. C. dos. Cytotoxic effects of neem oil in the midgut of the predator *Ceraeochrysa claveri*. **Micron**, v. 80, p. 96–111, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2015.10.005>. Acesso em: 05 maio de 2026.

SOARES, A. P.; ZOCCOLO, G. J.; BUENO, A. de F. The overlooked impact of botanical pesticides on non-target organisms. **Plants**, v. 15, n. 6, p. 917, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants15060917>. Acesso em: 05 maio de 2026.

TASNEEM, S.; YASMEEN, R. Biochemical alterations in total proteins and related enzymes in tissues of *Cyprinus carpio* (L.) during sublethal exposure to karanjin based biopesticide Derisom. **Indian Journal of Experimental Biology**, v. 59, p. 125–131, 2021. DOI: <https://doi.org/10.56042/ijeb.v59i02.45725>. Acesso em: 05 maio de 2026.

TURCHEN, L. M.; COSME-JÚNIOR, L.; GUEDES, R. N. C. Plant-derived insecticides under meta-analyses: status, biases, and knowledge gaps. **Insects**, v. 11, n. 8, p. 532, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects11080532>. Acesso em: 05 maio de 2026.

UNNI, P. S.; KIRUPAANNTHA-RAJAN, P.; VASANTHA-SRINIVASAN, P.; SRINIVASAN, S.; HAN, Y. S.; KARTHI, S.; RADHAKRISHNAN, N.; PARK, K. B.; RAJAGOPAL, R.; SENTHIL-NATHAN, S. Chemical composition and toxicity of commercial *Mentha spicata* and *Eucalyptus citriodora* essential oils on *Culex quinquefasciatus* and non-target insects. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 14, p. 21610–21631, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32249-6>. Acesso em: 05 maio de 2026.

VIEIRA, J. B.; AGUIAR, C. M. L.; CHAMBÓ, E. D.; FANCELLI, M.; BRAGANÇA, C. A. D.; CARVALHO, C. A. L. Susceptibility of *Melipona scutellaris* Latreille (Hymenoptera:

Apidae) to biopesticides. **Sociobiology**, v. 71, n. 3, e9329, 2024. DOI: <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v71i3.9329>. Acesso em: 05 maio de 2026.

XAVIER, V. M.; MESSAGE, D.; PICANÇO, M. C.; CHEDIK, M.; SILVA JÚNIOR, P. A.; RAMOS, R. S.; MARTINS, J. C. Acute toxicity and sublethal effects of botanical insecticides to honey bees. **Journal of Insect Science**, v. 15, n. 1, p. 137, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev110>. Acesso em: 05 maio de 2026.

YUAN, X.; MENG, Q.; LU, Z.; WANG, C.; HE, Y.; LI, K.; DU, J.; FU, Y. AcMNPV, a viral insecticide of Lepidoptera pests, stimulates the immune response of the natural enemy *Arma chinensis* Fallou. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 91, n. 6, e00613-25, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00613-25>. Acesso em: 05 maio de 2026.

ZHOU, W.; LI, M.; ACHAL, V. A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. **Emerging Contaminants**, v. 11, n. 1, p. 100410, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>. Acesso em: 25 maio de 2026.

