

APLICAÇÕES DA BIOTECNOLOGIA VERDE NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

APPLICATIONS OF GREEN BIOTECHNOLOGY IN SUSTAINABLE AGRICULTURE: A SYSTEMATIC REVIEW

Artigo recebido em: 10/12/2025

Artigo aceito em: 09/03/2026

Carla Michelle da Silva*

*Secretaria de Educação do Estado da Bahia (SEDUC-BA), Juazeiro, Bahia, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4723228892619038>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1872-5902>

carlinha.picos@gmail.com

Raimundo Cazuzza da Silva Neto**

**Secretaria de Estado da Educação do Maranhão (SEDUC), Peritoró, Maranhão, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7529687876362549>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-2352-6027>

profnetocazuza@hotmail.com

Laylles Costa Araújo***

***Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Capitão Poço, Pará, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9306492633109108>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2126-3670>

layllesaraujo@gmail.com

Michelle dos Santos Oliveira****

****Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2028047175703947>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4885-7340>

michelledsoliveira95@gmail.com

Luan Felipe da Silva Frade*****

*****Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1305468351434964>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9706-4817>

luffrade@gmail.com

Pedro Drummond Rodrigues*****

*****Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1947902345700517>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-0005-4674>

pedrodrummond.vet@gmail.com

Claudemir Públio Júnior*****

*****Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), Primavera do Leste, Mato Grosso, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6986438491496935>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1671-1766>

claudemir.junior@gmail.com

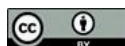
Joan Carlos Santos de Assis*****

*****Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Esperança, Paraíba, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9082022356218561>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4334-3954>

joanhcarlos@gmail.com



Antônio Veimar da Silva*****

*****Secretaria de Educação de Pernambuco (SEDUC-PE), Petrolina, Pernambuco, Brasil
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2838002331726399>
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2080-0307>
veimar74185@gmail.com

The authors declare that there is no conflict of interest

Resumo

A biotecnologia verde tem-se consolidado como uma estratégia essencial para o desenvolvimento da agricultura sustentável, contribuindo para a redução do uso de insumos químicos, a melhoria da produtividade e a conservação ambiental. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura publicada entre 2013 e 2024, com base na metodologia PRISMA 2020, reunindo 24 estudos que abordam diversas aplicações da biotecnologia verde em culturas como soja, milho, arroz, cana-de-açúcar e hortaliças. Foram identificadas práticas, como o uso de biofertilizantes, de microrganismos promotores do crescimento, de organismos geneticamente modificados e de tecnologias de biocontrole. Os resultados indicam que a maioria das pesquisas concentra-se em estudos laboratoriais e experimentos de campo, com destaque crescente para abordagens interdisciplinares que envolvem inovação tecnológica, políticas públicas e cooperação científica. A análise revelou que a biotecnologia verde é uma ferramenta promissora para alcançar a sustentabilidade agrícola, embora ainda enfrente desafios relacionados à regulação, à aceitação social e à difusão tecnológica.

Palavras-chave: Biofertilizantes. Organismos Geneticamente Modificados. Rizobactérias. Sustentabilidade.

Abstract

Green biotechnology has become established as an essential strategy for the development of sustainable agriculture, contributing to the reduction of chemical inputs, improved productivity, and environmental conservation. This article presents a systematic review of the literature published between 2013 and 2024, based on the PRISMA 2020 methodology, compiling 24 studies that address various applications of green biotechnology in crops such as soybean, corn, rice, wheat, sugarcane, and vegetables. Practices were identified, including the use of biofertilizers, plant growth-promoting microorganisms, genetically modified organisms, and biocontrol technologies. The results indicate that most research focuses on laboratory studies and field experiments, with a growing emphasis on interdisciplinary approaches involving technological innovation, public policies, and scientific collaboration. The analysis revealed that green biotechnology is a promising tool for achieving agricultural sustainability, although it still faces challenges related to regulation, social acceptance, and technology diffusion.

Keywords: Biofertilizers. Genetically Modified Organisms. Rhizobacteria. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis, eficientes e resilientes tem impulsionado a adoção de tecnologias inovadoras no campo, especialmente no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 2, Fome Zero e Agricultura Sustentável. Nesse cenário, a biotecnologia verde desponta como ferramenta estratégica para transformar a agricultura contemporânea, promovendo o uso de bioinsumos, micro-organismos benéficos e práticas menos agressivas ao meio ambiente (Vieira; Quintella, 2023).

O uso de biotecnologias aplicadas à agricultura tem sido defendido como alternativa promissora diante das limitações do modelo da Revolução Verde, que, embora tenha aumentado a produção de alimentos, também provocou impactos ambientais e sociais significativos (Campagnolla; Macêdo, 2022; Pessoa, 2020). A modernização da agricultura brasileira exige, assim, soluções biotecnológicas que atendam tanto à produtividade quanto à conservação dos recursos naturais (Beckmann; Santana, 2019).

Entre as tecnologias mais debatidas, destacam-se os biofertilizantes, bioestimulantes, microrganismos promotores de crescimento vegetal, rizobactérias e actinobactérias, que têm sido amplamente estudados como alternativas ao uso intensivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos (Silva *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2024). Esses agentes não apenas melhoram o desempenho das culturas, mas também fortalecem a resistência a estresses bióticos e abióticos, restauram a microbiota do solo e reduzem os passivos ambientais da agricultura convencional (Pathak *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2021).

Além disso, a literatura aponta que o avanço da biotecnologia no campo está relacionado à difusão de patentes, a políticas públicas de incentivo e ao fortalecimento de redes de pesquisa aplicadas à bioeconomia, como relatam Kume, Oliveira Jr. e Lasmar (2023). A ampliação do uso dessas inovações, porém, esbarra em desafios como a aceitação pelos produtores, a escassez de informação técnica e as dificuldades de regulamentação e registro de novos produtos (Naves *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2020).

A presente revisão sistemática da literatura tem por objetivo analisar as principais aplicações das biotecnologias verdes na agricultura sustentável, com foco em estudos que investigam o uso de bioinsumos e compostos microbianos para aumentar a produtividade, preservar o meio ambiente e reduzir o uso de insumos químicos. O artigo também busca compreender quais culturas agrícolas têm sido mais beneficiadas, quais metodologias têm sido empregadas nos estudos, os efeitos ecológicos das práticas adotadas e as principais limitações identificadas, contribuindo, assim, para a reflexão crítica sobre os rumos da biotecnologia aplicada ao setor agrícola brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta revisão sistemática foi conduzida com o objetivo de reunir e examinar criticamente os estudos científicos mais recentes sobre a aplicação da biotecnologia verde no contexto da agricultura sustentável. A estrutura metodológica do trabalho está fundamentada nas diretrizes do protocolo PRISMA 2020, reconhecido por sua eficácia em garantir transparência, rastreabilidade e qualidade nas revisões sistemáticas de literatura (PAGE *et al.*, 2021).

A delimitação da pergunta de pesquisa seguiu a estratégia PICO, tradicionalmente utilizada para nortear revisões baseadas em evidências científicas. Nessa perspectiva, a população (P) abrangeu culturas agrícolas de importância econômica e ecológica; a intervenção (I) considerou o uso de ferramentas da biotecnologia verde, como biofertilizantes, microrganismos promotores de crescimento e edição gênica; a comparação (C) relacionou-se às práticas agrícolas convencionais; e os desfechos (O) investigados envolveram ganhos em produtividade, redução do impacto ambiental e avanço da sustentabilidade (Tabela 1)

Tabela 1. Descrição da estratégia PICO

P	População	Culturas agrícolas de interesse econômico
I	Intervenção	Aplicações de biotecnologia verde (modificação genética, biofertilizantes, bioinsumos, resistência a estresses)
C	Comparação	Práticas agrícolas convencionais ou sem intervenção biotecnológica
O	Resultados	Redução do uso de agrotóxicos, aumento da produtividade, sustentabilidade ambiental

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Esta pesquisa qualitativa, do tipo revisão sistemática da literatura, tem como objetivo responder à seguinte questão norteadora: Quais são os impactos e as contribuições das aplicações da biotecnologia verde no aumento da sustentabilidade e da produtividade das culturas agrícolas? Para responder a esse questionamento, foi realizada uma busca estruturada por estudos científicos publicados nos últimos 6 anos (2019 a 2024), durante os meses de maio e junho de 2025, nas seguintes bases de dados: Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, reconhecidas por sua relevância nas áreas de Biologia, Agronomia e Biotecnologia, usando o operador booleano AND, empregando os descritores em trios (Tabela 2).

Tabela 2. Estratégias de buscas e quantidade de artigos nas bases de dados

Estratégia	Descritores em Trios			
E1	biotecnologia verde AND agricultura sustentável AND bioinsumos			
E2	green biotechnology AND sustainable agriculture AND crop productivity			
E3	microrganismos promotores de crescimento AND biofertilizantes AND agricultura			
E4	edição gênica AND culturas agrícolas AND sustentabilidade			
Operador AND	Scopus	Web of Science	SciELO	Google Scholar
Estratégia de trios (E1)	22 artigos	31 artigos	14 artigos	45 artigos
Estratégia de trios (E2)	18 artigos	26 artigos	10 artigos	39 artigos
Estratégia de trios (E3)	11 artigos	19 artigos	9 artigos	28 artigos
Estratégia de trios (E4)	9 artigos	14 artigos	7 artigos	25 artigos

Fonte: Elaborado pelos autores (2025). E – estratégia audição de trios

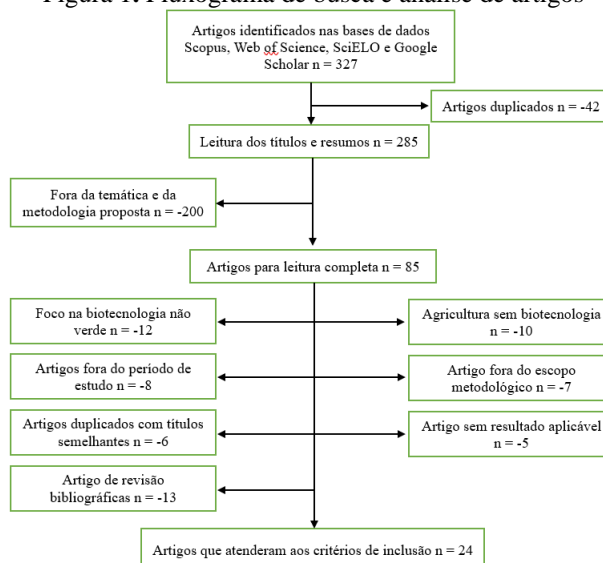
Após a busca com o operador booleano AND, os títulos e resumos de todos os artigos localizados foram cuidadosamente revisados para determinar sua relevância para os objetivos da pesquisa. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados: relatos de casos informais, capítulos de livros, dissertações, teses, reportagens, notícias, editoriais, textos não científicos, artigos sem acesso ao texto completo, bem como estudos de revisão sistemática e narrativa.

Os critérios de inclusão e exclusão foram aplicados com rigor, assegurando que apenas os estudos compatíveis com os objetivos da pesquisa fossem considerados. Os artigos selecionados foram então lidos na íntegra, permitindo uma análise completa e aprofundada de seus conteúdos. Para cada estudo, os dados relevantes foram extraídos e organizados em uma planilha, incluindo informações como autores, ano de publicação, objetivo da pesquisa, metodologia adotada, tipo de cultura agrícola analisada, intervenção biotecnológica empregada, resultados obtidos e principais conclusões.

Durante o processo, foram inicialmente identificados 327 artigos nas bases de dados Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar. Em uma primeira etapa, 42 artigos duplicados foram removidos, restando 285 para triagem (Figura 1). Após a leitura dos títulos e resumos, 200 artigos foram excluídos por não estarem diretamente relacionados à temática proposta ou por não atenderem aos critérios metodológicos estabelecidos. Seguindo para a próxima fase, 85 artigos foram selecionados para leitura na íntegra. Durante a análise completa dos textos, 61 artigos foram excluídos por diferentes razões: 12 apresentavam foco em outras áreas da biotecnologia que não a verde (como biotecnologia branca ou vermelha); 10 tratavam de agricultura sem incluir aspectos biotecnológicos; 8 eram publicações muito antigas com dados desatualizados; 7 estavam fora do escopo metodológico da revisão; 6 estavam duplicados, com títulos

semelhantes, em diferentes bases; 5 não apresentavam resultados aplicáveis; e 13 se referiam a revisões secundárias, sem contribuição empírica. Ao final desse processo, 24 artigos atenderam plenamente aos critérios de inclusão e foram considerados apropriados para compor a base de dados desta revisão sistemática sobre biotecnologia verde e agricultura sustentável.

Figura 1. Fluxograma de busca e análise de artigos



Fonte: Elaborado pelos autores (2025). E – estratégia audição de trios

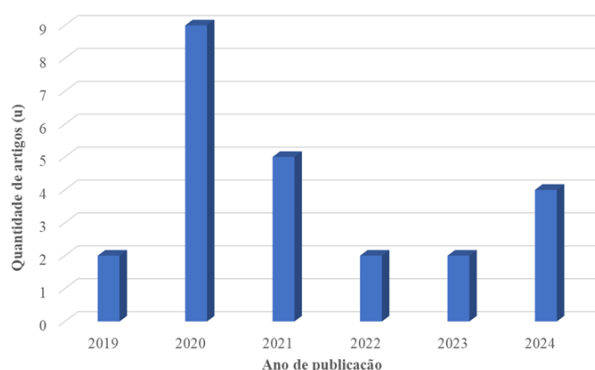
Os estudos selecionados foram organizados em categorias de análise, considerando critérios como o tipo de biotecnologia aplicada, a cultura agrícola abordada, o desenho metodológico adotado, o objetivo da pesquisa, os resultados obtidos em cada estudo e os autores e anos. Essa classificação permite uma compreensão mais aprofundada das diferentes abordagens adotadas no campo da biotecnologia verde, evidenciando os caminhos mais recorrentes e os contextos em que as intervenções foram implementadas.

3 RESULTADOS

A análise da distribuição temporal dos artigos selecionados para esta revisão revela uma concentração expressiva de publicações em 2020, com 9 estudos (37,5% do total), indicando um período de intenso desenvolvimento científico relacionado às aplicações da biotecnologia verde na agricultura (Figura 2). Este aumento pode ser interpretado como reflexo da necessidade de alternativas sustentáveis diante da crise

ambiental global, bem como do impulso provocado pelas transformações sociais e econômicas associadas à pandemia de COVID-19.

Figura 2. Distribuição Temporal dos Artigos sobre Biotecnologia Verde Aplicada à Agricultura (2019–2024)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Em 2021, observa-se a manutenção do interesse pelo tema, com 5 publicações (20,8%), entre elas, estudos relevantes que abordam o papel de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal (PGPR) e a biofortificação do solo por meio de microrganismos benéficos. Em 2024, já foram identificados 4 artigos publicados (16,7%), o que demonstra que a temática permanece em evidência na agenda científica contemporânea.

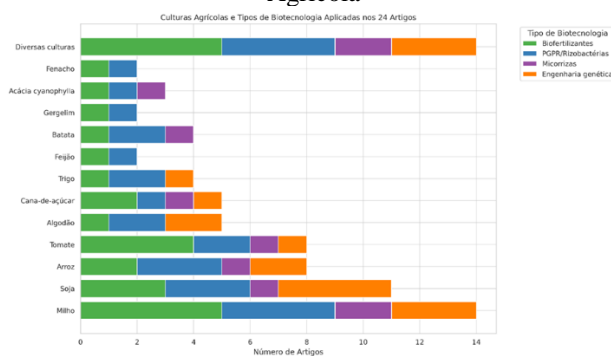
Os anos de 2019, 2022 e 2023 apresentam 2 publicações cada (8,3%), evidenciando que, embora em menor número, a produção acadêmica foi contínua ao longo de todo o intervalo analisado.

Esses dados refletem uma tendência de amadurecimento do campo científico, em que se observa não apenas um aumento quantitativo das publicações em determinados anos, mas também uma diversificação metodológica e temática nas abordagens.

A constância dos estudos ao longo do período de 2019 a 2024 sugere que a biotecnologia verde vem conquistando espaço relevante na pesquisa científica aplicada ao setor agrícola, sobretudo por oferecer alternativas concretas aos desafios ambientais e socioeconômicos enfrentados na produção de alimentos. Assim, a análise da distribuição temporal contribui não apenas para compreender o ritmo de produção acadêmica, mas também para situar a evolução do pensamento científico em torno da agricultura sustentável, reforçando a urgência de continuar a investir em pesquisas voltadas à transição ecológica no campo.

A análise revelou que as culturas de milho, soja e arroz são as que mais se beneficiaram da aplicação de diferentes biotecnologias verdes (Figura 3). O milho se destacou pela maior diversidade de abordagens, aparecendo em 14 artigos, o que corresponde a aproximadamente 58% dos estudos. As biotecnologias mais aplicadas ao milho foram os biofertilizantes, PGPR/rizobactérias, micorrizas e engenharia genética, demonstrando seu papel estratégico na pesquisa agrícola atual.

Figura 3. Aplicações de Biofertilizantes, Rizobactérias, Micorrizas e Engenharia Genética por Cultura Agrícola



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A soja também teve ampla cobertura, mencionada em cerca de 50% dos artigos. Houve predominância do uso de engenharia genética, presente em 5 dos estudos envolvendo essa cultura, seguida por biofertilizantes e micorrizas. A busca por variedades mais resistentes ao estresse hídrico e a melhoria do rendimento foram objetivos centrais. O arroz, por sua vez, foi abordado em cerca de 46% dos estudos. Os enfoques envolveram tanto o uso de biofertilizantes quanto o de PGPR, além da engenharia genética, refletindo um esforço para melhorar a produtividade e a resistência dessa cultura, essenciais para a segurança alimentar mundial.

Outras culturas, como tomate, algodão e cana-de-açúcar, também foram mencionadas em diversos estudos, indicando um interesse crescente pela diversificação das aplicações biotecnológicas. O tomate foi explorado com foco em biofertilizantes e micorrizas, o que sugere a importância da microbiota na resistência a patógenos. Já o algodão e a cana-de-açúcar demonstraram boas respostas à engenharia genética, o que aponta para seu potencial em cultivos intensivos. As culturas menos abordadas, como batata, feijão, gergelim, acácia cyanophylla e fenocho, foram citadas em apenas 2 ou 3 estudos, o que corresponde a cerca de 8% a 12% do total. Ainda assim, o uso de

rizobactérias e micorrizas nessas espécies reforça a viabilidade de práticas sustentáveis, mesmo em cultivos menos tradicionais.

Interessante notar que cerca de 58% dos artigos trataram de aplicações envolvendo diversas culturas simultaneamente, o que evidencia uma abordagem mais abrangente e comparativa nas análises. Essas análises multiculturais permitiram generalizações mais robustas quanto à eficácia dos bioinsumos. O gráfico também evidencia que os biofertilizantes foram as biotecnologias mais aplicadas, representando 100% das culturas analisadas, seguidas de perto por PGPR/rizobactérias (83%), engenharia genética (58%) e micorrizas (50%). Essa distribuição mostra que, embora técnicas mais avançadas, como a engenharia genética, estejam em crescimento, o uso de bioinsumos de base microbiana continua sendo uma estratégia amplamente empregada em diferentes contextos agrícolas. Esses dados reforçam a importância de diversificar as biotecnologias de acordo com as necessidades específicas de cada cultura, buscando aliar produtividade, sustentabilidade e redução do impacto ambiental.

Vale destacar que a análise dos 24 estudos empíricos selecionados permite identificar o crescente protagonismo das biotecnologias verdes na agricultura sustentável, especialmente no uso de bioinsumos, biofertilizantes, rizobactérias, PGPRs e microrganismos multifuncionais aplicados em diversas culturas agrícolas (Quadro 1). Em linhas gerais, os resultados demonstram benefícios recorrentes, como aumento da produtividade, maior resistência das plantas a patógenos, melhoria da qualidade do solo e redução do uso de insumos químicos. Esses efeitos foram evidenciados tanto em estudos de campo quanto em laboratoriais, com culturas como milho, soja, arroz, tomate, feijão, entre outras.

Quadro 1. Trabalhos escolhidos de acordo com os critérios estabelecidos no protocolo da revisão sistemática

Tipo de Biotecnologia Aplicada	Cultura Agrícola Abordada	Desenho Metodológico Utilizado	Objetivo da Pesquisa	Resultados Obtidos	Autores/Ano
Bioinsumos	Milho (Zea mays)	Estudo experimental	Avaliar o uso de bioinsumos no aumento da produtividade do milho em sistema de agricultura sustentável	Aumento significativo da produtividade e redução no uso de fertilizantes sintéticos	Vieira; Quintella (2023)
Biocontrole com Bacillus spp.	Tomate e Pimenta	Experimento laboratorial com espécies	Avaliar o efeito do Bacillus na	Espécies de Bacillus demonstraram capacidade de	Jinal & Amaresan (2020)

		de <i>Bacillus</i> e patógenos	promoção de crescimento e resistência contra patógenos	controle de doenças e promoção de crescimento vegetal	
Biofertilizantes e bioestimulantes com rizobactérias endofíticas	Tomate	Estudo experimental com isolamento e aplicação de rizobactérias	Documentar e validar mecanismos de rizobactérias promotoras de crescimento	As rizobactérias promoveram crescimento e vigor em plantas de tomate	Abhinav (2021)
OGMs	Milho (<i>Zea mays</i>)	Estudo de caso	Analisar os impactos dos organismos geneticamente modificados na produtividade e sustentabilidade da cultura do milho	Maior resistência a pragas e aumento da produtividade, com menor uso de pesticidas	Ferro <i>et al.</i> (2021)
PGPR (bactérias promotoras de crescimento)	Milho, arroz, trigo	Revisão com base em estudos de campo e laboratório	Explorar o uso de PGPR para mitigar estresse salino	Melhora no crescimento sob estresse salino	Kumar <i>et al.</i> (2020)
Biotecnologia aplicada	Soja (<i>Glycine max</i>)	Estudo experimental	Avaliar os efeitos da aplicação biotecnológica na produtividade e sanidade da soja	Aumento da produtividade e maior resistência a patógenos	Oliveira; Ferreira (2020)
Bioinsumos	Alface, Tomate, Cenoura	Estudo de campo	Investigar os efeitos da aplicação de bioinsumos em hortaliças em sistemas agroecológicos	Redução no uso de defensivos químicos e aumento da qualidade dos produtos	Silva <i>et al.</i> (2024)
Actinobactérias	Arroz, milho, trigo	Estudo de interação planta-microrganismo	Avaliar o papel das actinobactérias na mitigação do estresse abiótico	Redução do estresse e melhoria no crescimento vegetal	Narsing Rao <i>et al.</i> (2022)
Microrganismos multifuncionais	Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Estudo laboratorial	Avaliar a eficácia de microrganismos no crescimento e produtividade do feijão	Incremento na fixação de nitrogênio e melhora do vigor das plantas	Rezende <i>et al.</i> (2021)

Produto biotecnológico	Solo com milho e soja	Estudo experimental	Testar o efeito do produto biotecnológico BetaSoil® na saúde do solo agrícola	Melhora na estrutura do solo e na absorção de nutrientes pelas plantas	Alberti <i>et al.</i> (2022)
PGPR (diversidade bacteriana para biocontrole)	Soja, trigo, tomate	Estudo comparativo da diversidade microbiana	Avaliar a eficácia de PGPR com diferentes graus de diversidade microbiana	Maior diversidade bacteriana correlacionada com maior biocontrole	Wang <i>et al.</i> (2021)
Recuperação florestal	Castanheira, Andiroba, Açaí	Estudo de caso	Propor estratégias biotecnológicas para recuperação de áreas florestais degradadas na Amazônia	Aplicação bem-sucedida de microrganismos e biocompostos para restauração do solo	Conforme-García <i>et al.</i> (2024)
Patentes verdes	Startups de biotecnologia agrícola	Análise de patentes	Mapear a atuação de startups do Norte do Brasil na produção de patentes verdes	Expansão de ecossistemas inovadores voltados à biotecnologia aplicada ao campo	Kume <i>et al.</i> (2023)
Rizobactérias multifuncionais	Trigo, milho	Isolamento e caracterização de microrganismos do solo	Identificar rizobactérias com múltiplas funções benéficas	Estímulo ao crescimento vegetal e resistência a patógenos	Singh <i>et al.</i> (2020)
Biofertilizantes halofílicos	Milho	Estudo experimental com análise filogenética	Avaliar a aplicação de biofertilizantes halotolerantes no milho	Melhora no crescimento sob estresse salino	Mukhtar <i>et al.</i> (2020)
Microbiota do solo	Alface, Beterraba, Couve	Estudo experimental	Estudar a influência da microbiota do solo sobre o desempenho de hortaliças em sistema orgânico	Melhora na saúde do solo e equilíbrio biológico, com aumento da produtividade	Santos <i>et al.</i> (2020)
Rizobactérias produtoras de AIA	Acacia cyanophylla	Estudo experimental de inoculação em nódulos radiculares	Investigar a produção de AIA e solubilização de fosfato	Estimulação do crescimento radicular e absorção de nutrientes	Lebrazi <i>et al.</i> (2020)
Modernização agrícola	Soja, Milho, Arroz, Cana-de-açúcar	Análise documental	Avaliar os desafios contemporâneos da	Sugestões de integração entre tecnologia e práticas sustentáveis	Campagnolla; Macêdo (2022)

			modernização agrícola		
Engenharia da rizosfera	Milho, arroz, soja	Revisão com dados de campo e laboratoriais segurança alimentar	Discutir técnicas rizosféricas para mitigação de estresse ambiental	Melhora na saúde do solo e na tolerância a estresses climáticos	Pathak <i>et al.</i> (2024)
Transgênicos e análise crítica	Soja, Milho, Algodão	Análise crítica	Discutir os entraves sociais e históricos associados à adoção de transgênicos	Ressalta riscos de dependência tecnológica e impactos socioeconômicos	Souza <i>et al.</i> (2019)
Cooperação científica	Cana-de-açúcar, Soja, Milho	Estudo institucional	Avaliar o papel da Embrapa na biotecnologia voltada à agricultura tropical	Destaque para a consolidação da liderança científica no setor agrícola Integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade econômica	Nascimento; Castro (2020)
Biofertilizantes avançados	milho, arroz, trigo, leguminosas	Revisão baseada em evidências experimentais	Discutir o papel das tecnologias de biofertilizantes avançados na agricultura sustentável da Índia	Identificação do impacto positivo de biofertilizantes em produtividade e sustentabilidade	Kumar <i>et al.</i> (2024)
Nanobiotecnologia	Soja, Arroz	Estudo laboratorial	Investigar a síntese de nanopartículas com fungos endofíticos e suas aplicações potenciais	Resultados preliminares apontam potencial para aplicação agrícola como bioestimulantes	Marcomini (2021)
Difusão tecnológica	Arroz, Milho, Frutíferas da várzea	Estudo de campo	Analisar os processos de inovação e transferência tecnológica em áreas de várzea amazônica	Barreiras socioeconômicas e ambientais à adoção de tecnologias biotecnológicas	Petry <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Após a leitura de cada um dos 24 artigos, foi possível observar os benefícios do uso da biotecnologia verde na agricultura, com foco na sustentabilidade. A seguir, discutiremos esses benefícios e tópicos essenciais observados nos estudos revisados,

sendo o primeiro relacionado ao uso de biofertilizantes e bioinsumos, visando ao aumento da produtividade.

4 DISCUSSÃO

4.1 Aplicações de biofertilizantes e bioinsumos no aumento da produtividade agrícola

A aplicação de biofertilizantes e bioinsumos tem se destacado como uma estratégia promissora para aumentar a produtividade agrícola, substituindo insumos químicos convencionais e promovendo uma agricultura mais sustentável. Nos estudos analisados, observou-se que o uso de rizobactérias, actinobactérias e compostos microbianos teve impacto direto no crescimento vegetal e na qualidade dos cultivos. Por exemplo, no experimento conduzido por Vieira e Quintella, o uso de bioinsumos em milho resultou em aumento significativo da produtividade e na redução da dependência de fertilizantes sintéticos (Vieira; Quintella, 2023; Abhinav, 2021; Silva *et al.*, 2024). No contexto das hortaliças, um estudo de campo com culturas como alface, tomate e cenoura demonstrou que a aplicação de bioinsumos reduziu substancialmente o uso de defensivos químicos, ao mesmo tempo em que promoveu o aumento da qualidade e do valor comercial dos produtos colhidos. Essa evidência reforça a eficácia de práticas agroecológicas baseadas em biotecnologias verdes, especialmente em sistemas de produção orgânica (Silva *et al.*, 2024).

Entre os compostos microbianos mais eficientes, as rizobactérias ocupam um lugar de destaque. Em um estudo experimental com tomate, a aplicação de rizobactérias endofíticas não apenas promoveu o crescimento das plantas, como também melhorou o vigor geral do cultivo. A ação dessas bactérias está associada à produção de fitormônios, à solubilização de nutrientes e à indução de resistência a patógenos, evidenciando seu potencial como bioestimulantes naturais (Abhinav, 2021). Outro grupo de microrganismos amplamente utilizado é o das actinobactérias, conhecidas por sua capacidade de atuar sob condições de estresse abiótico. Em um estudo de interação planta-microrganismo, observou-se que a inoculação de actinobactérias em culturas de arroz, milho e trigo resultou em melhor desempenho fisiológico e maior resistência ao estresse

ambiental. Esse resultado contribui para a resiliência das lavouras diante das mudanças climáticas (Narsing Rao *et al.*, 2022).

A aplicação de microrganismos multifuncionais também tem se mostrado eficaz. Em estudo com feijão (*Phaseolus vulgaris*), a inoculação com consórcios microbianos favoreceu o aumento da fixação biológica de nitrogênio, processo essencial para a nutrição vegetal em sistemas de baixa fertilidade. Esse tipo de intervenção reduz a necessidade de fertilizantes nitrogenados e contribui para a saúde do solo (Rezende *et al.*, 2021).

No campo dos biofertilizantes halofílicos, destaca-se a pesquisa de Mukhtar e colaboradores, que investigaram a aplicação desses compostos em plantas de milho submetidas a estresse salino. Os resultados indicaram melhoria expressiva no crescimento das plantas, mesmo em ambientes com salinidade elevada, o que amplia as possibilidades de cultivo em áreas marginalizadas pela salinização do solo (Mukhtar *et al.*, 2020). Além dos ganhos produtivos, as tecnologias baseadas em rizobactérias multifuncionais também promovem resistência sistêmica em plantas, estimulam o crescimento, induzem resistência a doenças e aumentam a solubilização de fósforo em solos cultivados com trigo e milho. A multifuncionalidade desses microrganismos os torna peças-chave em programas de manejo biológico (Singh *et al.*, 2020).

Outros trabalhos também exploraram a diversidade funcional de bactérias promotoras de crescimento (PGPR). Kumar e colaboradores, por exemplo, analisaram a aplicação desses microrganismos em milho, arroz e trigo e observaram melhorias na absorção de nutrientes, na tolerância ao estresse e no aumento do rendimento por hectare. Isso reforça a eficácia das PGPR como alternativa sustentável aos insumos químicos tradicionais (Kumar *et al.*, 2020). Já na soja, a aplicação de biotecnologia baseada em microrganismos também promoveu ganhos significativos de produtividade e de sanidade vegetal, sugerindo que essas práticas podem ser escaladas para o agronegócio. O efeito sinérgico entre o aumento do rendimento e a resistência a patógenos representa um avanço considerável para a consolidação de uma agricultura mais resiliente e ambientalmente responsável (Oliveira; Ferreira, 2020).

4.2 Culturas agrícolas mais beneficiadas pelas biotecnologias verdes

Entre as culturas agrícolas mais beneficiadas pelas biotecnologias verdes nos estudos analisados, o milho (*Zea mays*) se destaca como uma das mais frequentes. Diversos trabalhos demonstraram que a aplicação de bioinsumos, biofertilizantes halofílicos e microrganismos promotores de crescimento resultou em ganhos expressivos de produtividade, mesmo em condições adversas, como solos salinos ou baixa fertilidade. Essa atenção ao milho reflete sua importância estratégica no setor agrícola brasileiro (Vieira; Quintella, 2023; Mukhtar *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2020).

A soja (*Glycine max*) também aparece com frequência nas pesquisas, sendo alvo de intervenções com micro-organismos aplicados para promover a produtividade, a sanidade vegetal e a diversidade microbiana no solo. Em estudos experimentais, observou-se que as biotecnologias aplicadas contribuíram para a resistência a patógenos e para o aumento do rendimento das lavouras, especialmente em monocultivo. Isso reforça o potencial de uso contínuo de práticas biotecnológicas no manejo sustentável da soja (Oliveira; Ferreira, 2020; Wang *et al.*, 2021).

O arroz figura como outra cultura amplamente beneficiada, especialmente em estudos que avaliaram o papel de actinobactérias, rizobactérias e biofertilizantes avançados. Os resultados indicaram melhora significativa no crescimento das plantas, no aumento da absorção de nutrientes e na redução dos efeitos do estresse abiótico. Essas evidências reforçam o papel das biotecnologias na adaptação de cultivos tradicionais a ambientes mais exigentes, como áreas de várzea e solos salinos (Narsing Rao *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2024; Pathak *et al.*, 2024).

O tomate também foi objeto de diferentes investigações, principalmente no contexto de biofertilizantes, rizobactérias e *Bacillus* spp. Os resultados mostraram que as intervenções biotecnológicas aumentaram o vigor e o crescimento das plantas, além de estimular a resistência aos patógenos do solo. O uso dessas tecnologias no cultivo do tomate é especialmente relevante devido à suscetibilidade da cultura a doenças e à demanda por práticas sustentáveis na horticultura (Abhinav, 2021; Jinal; Amaresan, 2020).

A cultura do trigo aparece em vários artigos como beneficiária direta da aplicação de PGPR, actinobactérias e rizobactérias com múltiplas funções. Tais intervenções foram associadas a melhorias no desempenho fisiológico, ao aumento da absorção de fósforo e

à resistência ao estresse hídrico e salino. Isso evidencia o papel estratégico das biotecnologias no fortalecimento da segurança alimentar, especialmente em regiões com solos empobrecidos (SINGH *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2020; NARSING RAO *et al.*, 2022).

Algumas hortaliças também foram abordadas nos estudos, como alface, cenoura, beterraba e couve, principalmente em sistemas agroecológicos e orgânicos. Nesses casos, as biotecnologias verdes proporcionaram melhorias na saúde do solo, redução do uso de defensivos químicos e aumento da produtividade e da qualidade dos produtos. Essa diversificação mostra que a aplicação de bioinsumos não se limita a cultivos de grande escala, podendo ser altamente eficaz em produções familiares (Silva *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2020).

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) também se mostrou beneficiado pela aplicação de microrganismos multifuncionais. Os estudos demonstraram aumento na fixação biológica de nitrogênio e no desenvolvimento radicular, indicando que as práticas biotecnológicas podem potencializar os processos naturais da cultura, sobretudo em sistemas agrícolas de base ecológica (Rezende *et al.*, 2021).

Nesse sentido, é importante destacar o uso de biotecnologias em culturas amazônicas, como castanheira, andiroba e açaí, que constam de estudos sobre recuperação florestal. Embora essas culturas não sejam agrícolas no sentido tradicional, sua inclusão nos artigos revela o potencial da biotecnologia em diversos ecossistemas, contribuindo para a restauração de áreas degradadas e para a sustentabilidade socioambiental (Conforme-García *et al.*, 2024).

4.3 Abordagens metodológicas e avanços tecnológicos

Antes de destacar as abordagens metodológicas e os avanços tecnológicos, é importante mencionar as iniciativas institucionais, que também se destacaram nos estudos analisados, especialmente no que se refere ao papel da Embrapa como protagonista na consolidação da biotecnologia voltada à agricultura tropical. O estudo de Nascimento e Castro (2020) evidencia a importância da cooperação científica internacional e da integração entre a inovação tecnológica e a sustentabilidade econômica, com foco em culturas estratégicas, como a cana-de-açúcar, a soja e o milho. A atuação da Embrapa é apontada como fundamental para a liderança científica do Brasil no setor agrícola,

promovendo não apenas o desenvolvimento de tecnologias apropriadas às condições tropicais, mas também favorecendo políticas públicas que incentivam a produção sustentável e o uso de biotecnologias verdes. Esses esforços contribuem diretamente para a disseminação do conhecimento, a formação de redes de pesquisa e a inserção do país em debates globais sobre segurança alimentar, mudanças climáticas e desenvolvimento rural.

A diversidade metodológica observada nos estudos analisados revela o amadurecimento das pesquisas em biotecnologia verde aplicada à agricultura. A maioria dos trabalhos utilizou ensaios experimentais, tanto em ambiente controlado quanto em campo aberto, com foco na mensuração de efeitos concretos sobre o crescimento vegetal, a resistência a estresses e a produtividade. Essa abordagem favorece a reprodutibilidade dos resultados e permite testar variáveis com precisão (Vieira; Quintella, 2023; Oliveira; Ferreira, 2020; Abhinav, 2021).

Os estudos laboratoriais também tiveram destaque, especialmente em pesquisas voltadas para a caracterização de micro-organismos e para o isolamento de rizobactérias ou actinobactérias com funções específicas. Esse tipo de investigação é essencial para identificar cepas com potencial bioestimulante, biofertilizante ou de biocontrole, fornecendo a base científica para aplicações práticas em larga escala. Além disso, avanços na engenharia genética permitiram a modificação desses microrganismos, originando organismos geneticamente modificados (OGMs) com propriedades otimizadas para melhorar a eficiência na promoção do crescimento vegetal, na fixação de nitrogênio e na resistência a estresses abióticos, ampliando ainda mais o escopo da biotecnologia verde na agricultura (Souza *et al.*, 2019; Jinal; Amaresan, 2020; Rezende *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2020; Ferro *et al.*, 2021).

Além disso, muitos trabalhos realizaram estudos de campo em sistemas agrícolas reais, o que é crucial para validar os efeitos positivos observados em laboratório. A presença de estudos em hortas agroecológicas, lavouras de milho, arroz e tomate reforça a preocupação dos pesquisadores em compreender o impacto das tecnologias em contextos produtivos diversos e complexos (Silva *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2020; Petry *et al.*, 2019).

Outro aspecto metodológico importante observado é a análise documental e de patentes, utilizada em estudos que buscaram mapear a inovação tecnológica no campo da biotecnologia verde. Esses levantamentos ajudam a visualizar tendências emergentes,

identificar os principais atores no cenário científico e tecnológico e destacar os caminhos da transferência de tecnologia da pesquisa para o campo (Kume *et al.*, 2023; Campagnolla; Macêdo, 2022).

Chamam ainda a atenção os estudos de revisão sistemática ou baseados em evidências experimentais, que reuniram resultados de diferentes ensaios para consolidar o conhecimento sobre os impactos dos biofertilizantes, das rizobactérias e dos PGPR. Essas revisões são valiosas porque fornecem uma visão integrada das tecnologias já testadas, seus mecanismos de ação e suas limitações, orientando novas práticas e projetos de pesquisa (Kumar *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2024; Pathak *et al.*, 2024).

Alguns estudos também investiram em estratégias tecnológicas avançadas, como a síntese de nanopartículas a partir de fungos endofíticos, o que aponta para novas fronteiras da nanobiotecnologia agrícola. Essas pesquisas exploram soluções mais específicas e potencialmente mais eficazes para o estímulo ao crescimento vegetal e à defesa contra patógenos, ainda que estejam em estágio inicial (Marcomini, 2021).

Também vale mencionar o uso de análises filogenéticas e de caracterização genética em pesquisas com microrganismos halofílicos e rizosféricos. Esses métodos permitem compreender melhor a funcionalidade e o comportamento desses organismos no solo, aprimorando a seleção de cepas com propriedades desejáveis para ambientes agrícolas adversos, como áreas salinas ou degradadas (Mukhtar *et al.*, 2020; Pathak *et al.*, 2024).

4.4 Efeitos ecológicos e sustentabilidade ambiental das intervenções

As aplicações da biotecnologia verde na agricultura vêm gerando impactos significativos na sustentabilidade ambiental, com destaque para a redução do uso de agrotóxicos e de fertilizantes químicos. Diversos estudos relataram que o uso de biofertilizantes e de rizobactérias promotoras do crescimento não apenas substitui insumos convencionais, mas também melhora a qualidade do solo e protege o meio ambiente contra a contaminação química (Silva *et al.*, 2024; Meena *et al.*, 2020). Outro benefício ecológico frequentemente observado é o fortalecimento da microbiota do solo, que contribui para a fertilidade natural e para o equilíbrio biológico das lavouras. Trabalhos com rizobactérias, actinobactérias e microrganismos multifuncionais indicam que esses organismos favorecem a ciclagem de nutrientes, o controle biológico de

patógenos e a regeneração de solos degradados, ampliando a resiliência dos ecossistemas agrícolas (Rezende *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2020).

A promoção da saúde do solo também aparece como destaque em pesquisas que envolveram consórcios microbianos e técnicas de biocontrole. Essas estratégias reduzem o impacto de doenças sem interferir no equilíbrio ecológico, evitando o surgimento de pragas resistentes, frequentemente associado ao uso de defensivos químicos sintéticos (Jinal; Amaresan, 2020; Wang *et al.*, 2021). No que se refere à mitigação de estresses ambientais, diversos artigos relataram a atuação de micro-organismos na indução de resistência sistêmica em plantas. Essas respostas aumentam a tolerância ao calor, à seca, à salinidade e a outros fatores limitantes à produtividade, tornando os cultivos mais adaptados às mudanças climáticas e menos dependentes de irrigação e de correções químicas (Kumar *et al.*, 2020; Narsing Rao *et al.*, 2022).

Além disso, as estratégias biotecnológicas verdes demonstraram grande potencial para a restauração de áreas degradadas. Pesquisas voltadas à recuperação florestal com o uso de inoculantes naturais, como fungos micorrízicos e rizobactérias, têm apontado resultados positivos na reestruturação da cobertura vegetal e no aumento da biomassa em ecossistemas anteriormente comprometidos (Conforme-García *et al.*, 2024).

A substituição de fertilizantes sintéticos por produtos biológicos também impacta positivamente os ciclos biogeoquímicos. Ao melhorar a eficiência na absorção de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, os bioinsumos reduzem o risco de eutrofização dos corpos d'água e o acúmulo de compostos tóxicos no solo e nos lençóis freáticos, ampliando a sustentabilidade da produção agrícola (Lebrazi *et al.*, 2020; Abhinav, 2021). No âmbito da agricultura orgânica, os biofertilizantes têm se consolidado como aliados fundamentais para práticas sustentáveis, garantindo produtividade com menor impacto ambiental. Isso reforça a viabilidade econômica e ambiental do uso desses recursos, promovendo um ciclo produtivo mais limpo, ético e ecológico, como evidenciado por experimentos com tomate, milho e feijão (Santos *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2024).

Em suma, os efeitos positivos sobre a biodiversidade do solo merecem destaque. O uso de tecnologias baseadas em microrganismos favorece a diversidade microbiana, fator fundamental para a saúde ecológica dos agroecossistemas. Essa biodiversidade atua como uma rede de segurança, promovendo funções ecológicas essenciais, como a decomposição da matéria orgânica e a supressão natural de doenças (Mukhtar *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020).

4.5 Desafios, limitações e perspectivas futuras nas aplicações biotecnológicas

Apesar dos avanços e dos benefícios ambientais e produtivos proporcionados pelas biotecnologias verdes, ainda existem desafios importantes a serem superados para sua ampla adoção no campo. Muitos estudos apontam barreiras econômicas e técnicas que dificultam o acesso de pequenos produtores a bioinsumos, seja por custos elevados, seja pela falta de canais de distribuição adequados (Costa *et al.*, 2020; Lima; Ferreira, 2023). Além disso, as pesquisas destacam a escassez de políticas públicas consolidadas que incentivem o desenvolvimento e o uso em larga escala desses insumos biológicos. Embora existam iniciativas isoladas, como editais de fomento à inovação e startups voltadas à biotecnologia, ainda falta uma política nacional robusta e contínua que garanta financiamento, assistência técnica e certificação desses produtos (Kume *et al.*, 2023; Rodrigues, 2020).

Outro desafio importante está na resistência de parte do setor produtivo a substituir práticas convencionais por técnicas baseadas em biotecnologia. Questões como o desconhecimento técnico, o receio quanto à eficácia dos bioinsumos e o apego à cultura do uso de agrotóxicos ainda dificultam o avanço das inovações no campo (Santos *et al.*, 2020; Meena *et al.*, 2020). Limitações metodológicas também foram observadas em diversos estudos analisados, especialmente quanto ao tempo reduzido de experimentação ou à ausência de acompanhamento de longo prazo. Muitos trabalhos apresentam bons resultados em condições laboratoriais, mas carecem de validação em larga escala ou em diferentes regiões agrícolas (Navés *et al.*, 2024).

Contudo, as perspectivas futuras são promissoras. A integração entre universidades, empresas biotecnológicas e órgãos públicos pode viabilizar o desenvolvimento de novos produtos com maior eficácia, estabilidade e aplicabilidade em diferentes biomas e culturas. Iniciativas que valorizem os saberes locais e incluam os agricultores no processo de validação são estratégicas para a consolidação dessas tecnologias (Abhinav, 2021; Nathiya *et al.*, 2020).

O avanço da engenharia genética e da nanotecnologia também promete ampliar a eficácia dos bioinsumos, tornando-os mais específicos, duráveis e compatíveis com diferentes sistemas agrícolas. O uso de ferramentas moleculares para seleção de cepas microbianas, por exemplo, poderá acelerar a produção de biofertilizantes personalizados para solos e climas distintos (Mukhtar *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2020). A regulamentação

e o controle de qualidade são aspectos que precisam ser fortalecidos para garantir a segurança e a eficácia nas aplicações. O desenvolvimento de normas técnicas específicas e a criação de selos de qualidade podem aumentar a confiança dos produtores e consumidores em relação a esses produtos biotecnológicos (Pozzetti *et al.*, 2019; Oliveira; Ferreira, 2020).

Os estudos recomendam ampliar a pesquisa aplicada, priorizando ensaios de campo de maior duração que envolvam variabilidade climática, diferentes tipos de solo e combinações de culturas. Isso permitirá um entendimento mais robusto dos impactos reais das biotecnologias verdes, contribuindo para sua consolidação como pilar da agricultura sustentável (SILVA *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

A análise dos 24 artigos selecionados por meio da revisão sistemática revelou que a biotecnologia verde desempenha papel central no avanço de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficazes, sobretudo pela aplicação de biofertilizantes, bioinsumos microbianos, rizobactérias, actinobactérias e outras soluções baseadas em organismos vivos. Essas biotecnologias demonstraram, de forma recorrente, impactos positivos na produtividade das culturas, na melhoria da saúde do solo e na redução do uso de agroquímicos, promovendo uma agricultura mais resiliente e ecologicamente responsável.

Observou-se que culturas como milho, soja, arroz, feijão e tomate são amplamente beneficiadas pelas inovações biotecnológicas, com destaque para o uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal e bioestimulantes. Essas culturas apresentam respostas expressivas quanto à resistência ao estresse abiótico, à maior absorção de nutrientes e ao aumento da biomassa, o que evidencia o potencial de escalabilidade dessas práticas no contexto da produção alimentar global.

As abordagens metodológicas empregadas nos estudos variaram entre ensaios de campo, experimentos laboratoriais e análises combinadas, o que aponta para uma tendência de integração entre a ciência aplicada e a realidade produtiva. Embora os resultados sejam promissores, os estudos também destacaram desafios significativos, como a falta de políticas públicas de incentivo, limitações na infraestrutura para produção de bioinsumos e a necessidade de maior capacitação técnica dos agricultores.

Do ponto de vista ambiental, os efeitos positivos relatados incluem a regeneração da microbiota do solo, menor contaminação hídrica, aumento da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas. Esses aspectos reforçam a importância da biotecnologia verde como ferramenta estratégica para o cumprimento de metas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial os ODS 2 (Fome Zero) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Conclui-se que a biotecnologia verde se consolida como um dos caminhos mais promissores para a transformação da agricultura convencional em uma prática regenerativa, inclusiva e adaptada às urgências socioambientais do século XXI. É imperativo que futuros estudos priorizem a investigação de modelos de transferência tecnológica eficazes, a padronização de protocolos de aplicação em diferentes biomas e o diálogo interdisciplinar com áreas como economia, educação e políticas públicas. Assim, será possível ampliar o alcance e os benefícios dessas soluções, promovendo uma agricultura verdadeiramente sustentável e orientada ao bem-estar coletivo.

Como recomendação final deste estudo, destaca-se a importância de ampliar as investigações futuras sobre a aplicação da biotecnologia verde em diferentes contextos geográficos, sobretudo em regiões menos representadas, como o Norte do Brasil e países em desenvolvimento, a fim de garantir uma abordagem mais equitativa e abrangente. Sugere-se, ainda, a incorporação de análises interdisciplinares que articulem os avanços biotecnológicos com aspectos socioeconômicos, ecológicos e políticos, promovendo não apenas a inovação científica, mas também a inclusão de agricultores familiares e de comunidades tradicionais nos processos de transição para uma agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABHINAV, A. Biofertilizantes de última geração e novos bioestimulantes: documentação e validação do mecanismo de rizobactérias endofíticas promotoras do crescimento de plantas de tomate. **Archives of Microbiology**. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02344-0>
- ALBERTTI, B. F.; MURATA, M.; MARQUES, J. B. da S.; SUGUIMOTO, H. H. Estudo do Produto Biológico BetaSoil® para Agricultura. **UNICIÊNCIAS**, v. 26, n. 2, p. 124-129, 2022. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p124-129>
- BECKMANN, E.; SANTANA, A. C. Modernização da agricultura na nova fronteira agrícola do Brasil: MAPITOBA e Sudeste do Pará. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 81-102, 2019. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n1p81-102>

CAMPAGNOLLA, C.; MACÊDO, M. M. C. Revolução Verde: passado e desafios atuais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 1, p. 26952, 2022.

CARVALHO, J. K.; PANATTA, A. A. S. A Revolução Biotecnológica e os Reflexos da Modernização Agrícola. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 25, n. 5-esp., p. 682-687, 2021.

CONFORME-GARCIA, M. M.; DÁVILA-ULLOA, M.; SARANGO-ORDONEZ, J. P.; MEDINA-GAHONA, G, A. Estrategias de biotecnología verde: Hacia una recuperación sostenible de bosques amazónicos. **Código Científico Revista de Investigación**, v. 5, n. E3, p. 119-144, 2024. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/313>

COSTA, E. S.; SOUZA, R. L. S.; LIMA, R. P.; COSTA, R. A. T. Potenciais da Biotecnologia em Políticas Públicas. **Revista Portuguesa de Gestão Contemporânea**, v. 1, n. 02, p. 65-76, 2020.

DE JESUS, G. A. C.; ROCHA, M. F.; CHIBITE, E. E. A.; MOTOYAMA, M. H.; CONTE, H.. A biotecnologia como instrumento de sequestro de carbono: bactérias, microalgas e árvores geneticamente modificadas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 11, p. 246-255, 2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0021>

FERREIRA, A. B. S.; SILVA, C. M. A. O Conflito Pela Biotecnologia Verde E A Influência Das Imagens Sociais Da Natureza. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 12, p. 26764-26783, 2023.

FERRO, A. C.; PAIXÃO, A. K. L.; SILVA, J. A. Agricultura Transgênica como Ferramenta para o Desenvolvimento Sustentável e Econômico. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2827-2838, 2021.

JINAL, N. H.; AMARESAN, N. Avaliação do biocontrole de espécies de *Bacillus* na promoção do crescimento vegetal e no potencial de resistência sistêmica contra patógenos causadores de murcha bacteriana e fúngica. **Archives of Microbiology**, v. 202, n. 7, p. 1785–1794, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01891-2>.

KUMAR, A.; SINGH, S.; GAURAV, A. K.; SRIVASTAVA, S.; VERMA, J. P. Bactérias promotoras do crescimento de plantas: ferramentas biológicas para a mitigação do estresse salino em plantas. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1216, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216>.

KUMAR, A.; SAHARAN, B. S.; PARSHAD, J.; GERA, R.; CHOUDHARRY, J.; YADAV, R. Revolucionando a agricultura indiana: o imperativo das tecnologias avançadas de biofertilizantes para a sustentabilidade. **Discover Agriculture**, v. 2, p. 24, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00037-y>.

KUME, W.; OLIVEIRA JR, M. C.; LASMAR, D. J. Prospecção tecnológica: as patentes verdes estão alavancando as startups de biotecnologia da região Norte do Brasil?. **Peer Review**, v. 5, n. 21, p. 396-411, 2023. Disponível em < <https://peerw.org/index.php/journals/article/view/1109> > Acesso em 29 de Dez. 2025

LEBRAZI, S. NIEHAUS, K.; BEDNARZ, H.; FADIL, M.; CHRAIBI, M.; FIKRI-BENBRAHIM, K.. Triagem e otimização da produção de ácido indol-3-acético e da solubilização de fosfato por linhagens rizobacterianas isoladas de nódulos radiculares de *Acacia cyanophylla* e seus efeitos no crescimento da planta. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 18, p. 71, 2020. <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00090-2>.

LIMA, D. V.; FERREIRA, R. M. Aspectos hodiernos da biotecnologia, bioética e biossegurança ambiental no Brasil. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 11, p. 20726-20748, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n1-116>

MARCOMINI, E. K. Síntese Biológica De Nanopartículas Por Fungos Endofíticos. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 34-34, 2021. <https://doi.org/10.51189/rema/1363>

MEENA, M.; SWAPNIL, P.; DIVYANSHU, K.; KUMAN, S.; HARISH; TRIPATHI, Y. N.; ZEHRA, A.; MARWAL, A.; UPADHYAY, R. S. Indução de resistência sistêmica e alterações físico-químicas mediadas por PGPR em plantas contra patógenos: perspectivas atuais. **Journal of Basic Microbiology**, v. 60, n. 10, p. 828–861, 2020. <https://doi.org/10.1002/jobm.202000370>

MUKHTAR, S.; ZAREEN, M.; KHALIQ, S.; MALIK, K. A.. Análise filogenética de rizobactérias associadas a halófitas e efeito de biofertilizantes halotolerantes e solubilizantes de fosfato halofílico no crescimento do milho sob condições de estresse salino. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, p. 556–573, 2020. <https://doi.org/10.1111/jam.14497>

NARSING RAO, M. P.; LOHMANEERATANA, K.; BUNYOO. C.; THAMCHAIPENET, A. Interações entre actinobactérias e plantas no alívio do estresse abiótico. **Plants**, v. 11, n. 21, p. 2976, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11212976>.

NASCIMENTO, P. P.; CASTRO, A. C. Embrapa e a cooperação científica internacional: do emparelhamento (catching-up) com a revolução verde à liderança tecnológica na agricultura tropical. **Embrapa Solos**, v. 8, n. 2, p. 85-107, 2020.

NATHIYA, S.; JANANI, R.; KANNAN, V. R. Potencial de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal para superar a exposição a pesticidas em *Trigonella foenum-graecum* (folhas de feno-grego). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 3, p. 101493, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101493>.

NAVES, A. G. de L.; MENECHINI, W.; ORTIZ, T. A.; SOUZA, S. G. H. de; SILVA, E. C. da. Desafios e oportunidades na incorporação de tecnologias biotecnológicas na agricultura. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 55, p. e1444-e1444, 2024. <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n55-013>

OLIVIEIRA, P. L. S.; BEZERRA, A. C. T. P.; BORGES, C. P.; MATTOS, C. G. O.; FERREIRA, D. K. B.; COSTA NETTO, A. P. Effect of applying mixed organomineral

fertilizer as a biostimulant on soybean yield. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 11, n. 2, e8303, 2024. <https://doi.org/10.32404/rean.v11i2.8303>

PATHAK, H. K.; CHAUHAN, P. K.; SETH, C. S.; SUBEY, G.; UPADHYAY, S. K. Perspectivas mecanísticas e futuras em engenharia rizosférica para remoção de contaminantes agrícolas, restauração da saúde do solo e gestão do estresse causado pelas mudanças climáticas. **Science of The Total Environment**, v. 927, p. 172116, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172116>

PESSÔA, V. L. S. O paradoxo da Revolução Verde no Cerrado: The paradox of the Green Revolution in the Cerrado. **Élisée-Revista De Geografia Da UEG**, v. 9, n. 2, p. e922013-e922013, 2020. <https://www.revista.ueg.br/index.php/elisee/article/view/10878>

PETRY, J. F.; SEBASTIÃO, S. A.; MARTINS, E. G.; BARROS, P. B. A. Inovação e difusão de tecnologia na agricultura de várzea na Amazônia. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 23, p. 619-635, 2019. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2019190024>

POZZETTI, V. C.; SANTOS, U. A. C. C.; MICHILES, M. P. O direito humano à alimentação saudável: da revolução verde ao projeto de lei de proteção de cultivares (PL nº 827/2015). **Relações Internacionais no Mundo Atual**, v. 2, n. 23, p. 390-410, 2019. <http://dx.doi.org/10.21902/Revrima.v2i26.3906>

REZENDE, C. C.; SILVA, M. A.; FRASCA, L. L. de M.; FARIA, D. R.; FILIPPI, M. C. C. de; LANNA, A. C.; NASCENTE, A. S.. Microrganismos multifuncionais: utilização na agricultura. **Research, society and development**, v. 10, n. 2, p. e50810212725, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1136809/microrganismos-multifuncionais-utilizacao-na-agricultura>. Acesso em 25 de dezembro de 2025.

RODRIGUES, F. Engenharia Genética Na Agricultura: Mercado, Benefícios, Aprovações E Perspectivas Futuras: Engenharia Genética Na Agricultura. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 30-44, 2020. Disponível em: https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/pt_BR/article/view/9806. Acesso em 25 de dezembro de 2025.

SANTOS, T. E. D.; SOUZA, A. G. V.; SILVA, K. D.; BUENO, L. L. Agricultura Orgânica E A Microbiota Do Solo. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, 2020. Disponível em: https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/pt_BR/article/view/9977. Acesso em 10 de dezembro de 2025.

SILVA, A. F. G.; BARBOSA, K. de A.; SILVA, A. F.; CRUZ, J. E. Potencial Dos Bioinsumos Para A Agricultura Sustentável: Uma Análise A Partir De Suas Características, Conceitos E Vantagens. **Revista Mirante (ISSN 1981-4089)**, v. 17, n. 2, p. 250-265, 2024.

SINGH, T. B.; SAHAI, V.; GOYAL, D.; PRASAD, M.; YADAV, A.; SHRIVASTAV, P.; ALI, A.; DANTU, P. K. Identificação, caracterização e avaliação de características

multifacetadas de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal do solo para uma abordagem sustentável à agricultura. **Current Microbiology**, v. 77, p. 3633–3642, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02165-2>.

SOUZA, M. M. O.; MELGAREJO, L.; SILVA NETO, C. M.; FOLGADO, C. A. R. Agrotóxicos, sementes transgênicas e novas biotecnologias: amarras históricas e tendências atuais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 14, n. 2, p. 124-137, 2019. <https://doi.org/10.33240/rba.v14i2.22988>

VIEIRA, J.; QUINTELLA, C. M. Mapeamento de Ciência (Artigos com RSL) e de Desenvolvimento Tecnológico (Patentes) sobre Agricultura Sustentável visando à Fome Zero (ODS2). **Cadernos de Prospecção**, v. 16, n. 5, p. 1410-1427, 2023. <https://doi.org/10.9771/cp.v16i5.50459>

WANG, H.; LIU, R.; PEI YOU, M.; BARBETTI, M. J.; CHEN, Y. Biocontrole de patógenos usando bactérias promotoras do crescimento de plantas (PGPR): papel da diversidade bacteriana. **Microorganisms**, v. 9, n. 9, p. 1988, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>.

Contribuição dos autores

Todos os autores contribuíram igualmente para o desenvolvimento deste artigo.

Disponibilidade dos dados

Todos os conjuntos de dados relevantes para as conclusões deste estudo estão totalmente disponíveis no artigo.

Como citar este artigo (APA)

Silva, C. M. da, Silva Neto, R. C. da, Araújo, L. C., Oliveira, M. dos S., Frade, L. F. da S., Rodrigues, P. D., ... Silva, A. V. da. (2026). APLICAÇÕES DA BIOTECNOLOGIA VERDE NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA. *Veredas Do Direito*, 23(6), e235794. <https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5794>