

Biotecnologia na agricultura: Uma revisão narrativa

Biotechnology in agriculture: A narrative review

Biotechnología en la agricultura: Una revisión narrativa

Recebido: 22/08/2025 | Revisado: 15/09/2025 | Aceitado: 16/09/2025 | Publicado: 17/09/2025

Nicole Kássia Ramos de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7450-9570>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: nhckassia@gmail.com

Victor Hugo Tavares do Espírito Santo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7865-353X>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: victortavares808@gmail.com

Daniel Douglas de Souza Alves

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8007-1153>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Email: danieldouglasdesouzaalves@gmail.com

Erikson Patrique de Moraes Zonoizo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3860-3671>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: eriksonn3@gmail.com

Resumo

A biotecnologia tem se consolidado como um dos principais eixos de inovação da agricultura brasileira, integrando ganhos de produtividade com práticas sustentáveis e de menor impacto ambiental. O presente artigo objetiva realizar uma revisão narrativa sobre os avanços, a aplicabilidade e perspectivas da biotecnologia na agricultura, com foco no cenário brasileiro. A metodologia consistiu em uma revisão narrativa realizada em bases de dados como Google Acadêmico, Web of Science e Scopus, com recorte temporal de 2018 a 2025. Os resultados evidenciam que o Brasil ocupa posição de destaque mundial na adoção de cultivos geneticamente modificados, especialmente soja, milho e algodão, bem como na rápida expansão do uso de bioinsumos. Entre os principais avanços destacam-se a fixação biológica de nitrogênio e o desenvolvimento de microrganismos benéficos capazes de melhorar a absorção de nutrientes e fortalecer a resistência das plantas. Novas biotecnologias, como a edição gênica por CRISPR-Cas9, despontam como alternativas promissoras para criar cultivares mais resilientes. A revisão também aponta desafios, como a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa, a construção de marcos regulatórios claros e a ampliação da aceitação social. Conclui-se que a biotecnologia na agricultura brasileira se configura não apenas como instrumento de crescimento econômico, mas também como caminho estratégico para assegurar a segurança alimentar e preservar os recursos naturais, consolidando o país como referência global em agricultura sustentável.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Segurança alimentar; Organismos geneticamente modificados.

Abstract

Biotechnology has been consolidated as one of the main pillars of innovation in Brazilian agriculture, combining productivity gains with sustainable practices and reduced environmental impact. This article aims to conduct a narrative review on the advances, applicability, and perspectives of biotechnology in agriculture, with a focus on the Brazilian scenario. The methodology consisted of a narrative review carried out in databases such as Google Scholar, Web of Science, and Scopus, covering the period from 2018 to 2025. The results show that Brazil occupies a leading global position in the adoption of genetically modified crops, especially soybean, corn, and cotton, as well as in the rapid expansion of bioinput use. Among the main advances are biological nitrogen fixation and the development of beneficial microorganisms capable of improving nutrient uptake and strengthening plant resistance. New biotechnologies, such as gene editing with CRISPR-Cas9, emerge as promising alternatives to create more resilient cultivars. The review also highlights challenges, such as the need for continuous research investment, the establishment of clear regulatory frameworks, and the expansion of social acceptance. It is concluded that biotechnology in Brazilian agriculture is configured not only as an instrument of economic growth but also as a strategic pathway to ensure food security and preserve natural resources, consolidating the country as a global reference in sustainable agriculture.

Keywords: Sustainable agriculture; Food security; Genetically modified organisms (GMOs).

Resumen

La biotecnología se ha consolidado como uno de los principales ejes de innovación en la agricultura brasileña, integrando ganancias de productividad con prácticas sostenibles y de menor impacto ambiental. Este trabajo presenta una revisión narrativa sobre los avances, aplicaciones y perspectivas de la biotecnología en el contexto nacional, desde su conceptualización hasta casos prácticos. La metodología consistió en una búsqueda sistemática en bases de datos como Google Académico, Web of Science y Scopus, con un enfoque temporal de 2018 a 2025. Los resultados evidencian que Brasil ocupa una posición destacada a nivel mundial en la adopción de cultivos genéticamente modificados, especialmente soja, maíz y algodón, así como en la rápida expansión del uso de bioinsumos. Entre los principales avances se encuentran la fijación biológica de nitrógeno y el desarrollo de microorganismos beneficiosos capaces de mejorar la absorción de nutrientes. Nuevas biotecnologías, como la edición génica con CRISPR-Cas9, surgen como alternativas prometedoras para crear cultivares más resilientes. La revisión también señala desafíos, como la necesidad de inversiones continuas en investigación, la creación de marcos regulatorios claros y la ampliación de la aceptación social. Se concluye que la biotecnología en la agricultura brasileña no solo es un instrumento de crecimiento económico, sino también una vía estratégica para garantizar la seguridad alimentaria y preservar los recursos naturales, consolidando al país como un referente global en agricultura sostenible.

Palabras clave: Agricultura sostenible; Seguridad alimentaria; Organismos genéticamente modificados.

1. Introdução

A agricultura global enfrenta um desafio sem precedentes: a necessidade de aumentar a produção de alimentos para suprir uma população mundial crescente, ao mesmo tempo em que lida com a degradação dos recursos naturais e os impactos das mudanças climáticas. Nesse cenário, a intensificação sustentável da produção agrícola não é apenas uma meta, mas uma necessidade imperativa. A biotecnologia surge como uma das ferramentas científicas mais poderosas para enfrentar essa complexa equação, oferecendo soluções inovadoras que visam otimizar o uso de insumos, aumentar a resiliência das culturas e reduzir o impacto ambiental da atividade agrícola (Vargas et al., 2018).

Definida pela Convenção das Nações Unidas sobre Diversidade Biológica (1992) como qualquer aplicação tecnológica que utilize sistemas biológicos ou organismos vivos para criar ou modificar produtos e processos, a biotecnologia abrange um vasto espectro de técnicas. Historicamente, a humanidade utiliza processos biotecnológicos, como a fermentação, há milênios. Contudo, a "biotecnologia moderna", impulsionada pela engenharia genética e pela tecnologia do DNA recombinante, representa um salto qualitativo, permitindo a manipulação precisa do material genético de um organismo (James, 2013). Essa capacidade de transferir genes entre espécies distintas rompeu barreiras antes intransponíveis pelo melhoramento genético convencional, abrindo novas fronteiras para o desenvolvimento de culturas com características agronômicas superiores.

O Brasil, como um dos maiores produtores e exportadores agrícolas do mundo, desempenha um papel central na segurança alimentar global. O agronegócio nacional tem na biotecnologia um pilar estratégico para sua competitividade e sustentabilidade. A vasta biodiversidade do país, aliada a um robusto sistema de pesquisa e desenvolvimento, cria um ambiente fértil para a inovação biotecnológica (Vieira et al., 2021). Desde a adoção das primeiras culturas geneticamente modificadas (OGM) até a recente expansão do mercado de bioinsumos, a biotecnologia tem sido fundamental para o aumento da produtividade nas lavouras brasileiras de soja, milho e algodão, permitindo um manejo mais eficiente e sustentável.

Apesar dos avanços evidentes, a adoção e a expansão da biotecnologia na agricultura não ocorrem sem desafios. Questões regulatórias, a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa, a formação de capital humano qualificado e, crucialmente, a percepção pública sobre a segurança e os benefícios dessas tecnologias são fatores que moldam seu desenvolvimento (Góes-Favoni, 2017; Coelho, 2023). A desinformação e as controvérsias, especialmente em torno dos OGM, demandam um diálogo transparente e baseado em evidências científicas para garantir a aceitação social e a construção de políticas públicas eficazes (Lima et al., 2018).

Diante deste contexto, o presente artigo tem como objetivo principal realizar uma revisão aprofundada da literatura sobre os avanços, a aplicabilidade e as perspectivas da biotecnologia na agricultura, com foco especial no cenário brasileiro. A

análise busca explorar as principais ferramentas biotecnológicas utilizadas no campo, desde o melhoramento genético e o uso de plantas transgênicas até a aplicação de bioinsumos, como inoculantes e agentes de controle biológico. Adicionalmente, o estudo reflete sobre os impactos sociais e ambientais dessas tecnologias, bem como os desafios e as tendências futuras que devem moldar o futuro da agricultura nacional e global.

2. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem quantitativa e descritiva (Pereira et al., 2018), do tipo revisão narrativa da literatura, uma abordagem metodológica que busca reunir, contextualizar e interpretar criticamente pesquisas relevantes sobre um tema específico, sem a rigidez de protocolos característicos das revisões sistemáticas (Rother, 2007; Baethge et al., 2019). O objetivo foi sintetizar o conhecimento científico existente acerca dos avanços, do potencial aplicado e das implicações da biotecnologia na agricultura, com foco particular no contexto brasileiro.

A busca pelos artigos foi realizada em bases de dados de amplo reconhecimento acadêmico e científico, incluindo Google Acadêmico, Web of Science e Scopus, com o objetivo de abranger uma gama diversificada de publicações, incluindo artigos de periódicos nacionais e internacionais, teses, dissertações e anais de conferências.

O recorte temporal compreendeu os anos de 2018 a 2025, privilegiando estudos recentes e atualizados que reflitam o estado da arte da biotecnologia agrícola. Os termos de busca foram definidos em português e inglês, utilizando combinações de palavras-chave como: “aplicações da biotecnologia na agricultura” (biotechnology applications in agriculture), “biotecnologia no Brasil” (biotechnology in Brazil), “avanços da biotecnologia” (advances in biotechnology), “organismos geneticamente modificados” (genetically modified organisms) e “bioinsumos” (bioinputs).

Os critérios de inclusão consideraram: (1) estudos revisados por pares; (2) abordagem direta da biotecnologia no setor agrícola; (3) relevância para o contexto brasileiro; e (4) publicação dentro do período estipulado. Foram excluídos artigos de opinião, publicações de divulgação não acadêmica e estudos cujo foco principal não estivesse alinhado ao objetivo desta revisão.

O processo de seleção ocorreu em duas etapas: inicialmente, leitura de títulos e resumos de mais de 40 artigos; posteriormente, leitura integral e análise aprofundada de pertinência, relevância, frequência de citação e contribuição às discussões críticas na área. Com base nessa avaliação, os estudos mais significativos foram selecionados para compor a síntese final, abrangendo avanços técnicos e implicações sociais, econômicas e éticas da biotecnologia na agricultura.

3. Resultados e Discussão

3.1 Fundamentos e Evolução Histórica da Biotecnologia Agrícola

A biotecnologia, em sua essência, representa a aplicação de princípios científicos e de engenharia a organismos vivos para a produção de bens e serviços. O termo, cunhado em 1919 pelo engenheiro húngaro Karl Ereky, referia-se inicialmente a processos que utilizavam organismos para transformar matérias-primas (Steinberg, 2002). Esta "biotecnologia clássica" abrange técnicas milenares, como a fermentação para produção de pães e bebidas, e práticas agrícolas do século XX, como a cultura de tecidos e o controle biológico de pragas.

O divisor de águas para a "biotecnologia moderna" ocorreu na segunda metade do século XX, com os avanços exponenciais da biologia molecular. A década de 1970 foi particularmente transformadora: a descoberta das enzimas de restrição (as "tesouras moleculares") e da enzima DNA ligase permitiu cortar e colar fragmentos de DNA de diferentes fontes de maneira controlada (Akshay Uike et al., 2024). Em 1972, Paul Berg e sua equipe criaram a primeira molécula de DNA recombinante,

unindo DNA de dois vírus distintos. Este feito, embora pioneiro, gerou preocupações éticas e de segurança que levaram à famosa "Carta Berg", propondo uma moratória em pesquisas similares até que os riscos fossem avaliados.

Apenas um ano depois, em 1973, Stanley Cohen e Herbert Boyer superaram essa barreira técnica e ética ao inserirem um gene de sapo em uma bactéria, produzindo o primeiro organismo geneticamente modificado (OGM) do mundo. Este experimento lançou as bases da engenharia genética e demonstrou que o código genético é universal, ou seja, um gene de uma espécie pode ser lido e expresso por outra (Paterniani, 2001). A aplicabilidade prática dessa tecnologia foi consolidada na década de 1980, com a produção de insulina humana por bactérias *E. coli* geneticamente modificadas, revolucionando o tratamento da diabetes e marcando a entrada da biotecnologia na indústria farmacêutica.

Na agricultura, essa revolução se traduziu no desenvolvimento de plantas transgênicas. As técnicas de transformação genética, aprimoradas ao longo dos anos 1980, permitiram a introdução de genes de interesse em culturas agrícolas, conferindo-lhes características que seriam difíceis ou impossíveis de obter por meio do melhoramento genético convencional, como resistência a herbicidas, proteção contra insetos-praga e melhoria do valor nutricional (Akshay Uike et al., 2024). Essa evolução representou um novo paradigma para a agricultura, movendo o foco do manejo externo do ambiente (com agroquímicos) para a otimização interna do potencial genético da própria planta (James, 2013).

3.2 Marco Regulatório e Panorama da Biotecnologia no Brasil

A trajetória da biotecnologia agrícola no Brasil é indissociável da construção de seu arcabouço regulatório. A primeira legislação específica, a Lei nº 8.974 de 1995, foi um passo inicial, mas foi a Lei de Biossegurança (Lei nº 11.105 de 2005) que estabeleceu um marco regulatório robusto e abrangente, impulsionando o desenvolvimento seguro do setor. Esta lei estabeleceu normas de segurança e mecanismos de fiscalização para todas as fases de atividades envolvendo OGMs, desde a pesquisa em laboratório até a liberação comercial e o monitoramento pós-comercialização.

Um dos pilares da Lei de Biossegurança foi a reestruturação da Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), um órgão colegiado multidisciplinar com a prerrogativa de emitir pareceres técnicos conclusivos sobre a biossegurança de OGMs. A CTNBio é responsável por analisar, caso a caso, os potenciais riscos de novos produtos biotecnológicos à saúde humana, animal e ao meio ambiente, seguindo o princípio da precaução. O processo de aprovação é rigoroso e envolve a submissão de um vasto dossiê com estudos de avaliação de risco e, após a aprovação, um plano de monitoramento pós-liberação comercial para detectar eventuais efeitos adversos.

Esse ambiente regulatório claro e baseado na ciência foi fundamental para posicionar o Brasil como um dos líderes mundiais na adoção de culturas transgênicas. A primeira aprovação comercial de grande impacto foi a da soja Roundup Ready, resistente ao herbicida glifosato, em 1998. Desde então, o portfólio de eventos transgênicos aprovados cresceu exponencialmente. Dados de 2017 já apontavam a aprovação de 66 eventos de plantas transgênicas, distribuídos entre culturas de grande importância econômica: 40 eventos de milho, 13 de algodão, 11 de soja, 1 de feijão e 1 de eucalipto (CTNBio, 2017). A tendência observada nos registros é a combinação de características, ou "piramidação gênica", como plantas que possuem simultaneamente tolerância a diferentes herbicidas e resistência a múltiplas pragas (Figueiredo et al., 2019).

Além do marco regulatório, a Lei de Propriedade Intelectual (LPI) e a Lei de Proteção de Cultivares desempenham um papel crucial ao protegerem as inovações, incentivando o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento por parte de empresas e instituições públicas, como a Embrapa. A Embrapa, em particular, teve um papel pioneiro no desenvolvimento de soluções biotecnológicas adaptadas às condições tropicais do Brasil, como o feijão comum transgênico resistente ao mosaico dourado, uma doença viral que causa perdas significativas na cultura (Figueiredo et al., 2019). Esse ecossistema de inovação,

amparado por uma legislação sólida, tem sido o motor para a consolidação da biotecnologia como um diferencial competitivo da agricultura brasileira.

3.3 Principais Aplicações da Biotecnologia na Agricultura Brasileira

A biotecnologia permeia a agricultura brasileira por meio de um leque diversificado de aplicações, que vão desde a manipulação genética de plantas até o uso de microrganismos para otimizar a nutrição e a proteção das lavouras.

3.3.1 Melhoramento Genético e Plantas Transgênicas

A transgenia é, sem dúvida, a aplicação biotecnológica de maior visibilidade e impacto econômico na agricultura moderna. Ao permitir a inserção de genes de outras espécies, a engenharia genética possibilita o desenvolvimento de culturas com características agrônomicas de alto valor. As duas características mais disseminadas globalmente são a tolerância a herbicidas e a resistência a insetos. A tolerância a herbicidas, como o glifosato, permite um controle de plantas daninhas mais eficaz e flexível, facilitando a adoção do sistema de plantio direto, uma prática conservacionista que reduz a erosão do solo. A resistência a insetos é geralmente conferida pela inserção de genes da bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt), que produzem proteínas tóxicas para certas lagartas-praga, reduzindo a necessidade de aplicação de inseticidas químicos e, conseqüentemente, os custos de produção e o impacto ambiental (Xavier et al., 2008).

Além das características agrônomicas, a biotecnologia tem se voltado para a melhoria da qualidade nutricional e industrial dos produtos agrícolas. Um exemplo notável é o desenvolvimento da soja com alto teor de ácido oleico. Por meio do silenciamento de genes, foi possível alterar o perfil de ácidos graxos do óleo de soja, tornando-o mais estável à oxidação e nutricionalmente mais saudável, por ser rico em gordura monoinsaturada e livre de gorduras trans, que seriam formadas no processo industrial de hidrogenação (Ablin & Paz, 2001). Pesquisas também avançam no desenvolvimento de soja com melhor perfil de aminoácidos essenciais, como metionina e cisteína, visando aprimorar a qualidade do farelo utilizado na nutrição animal (Ortega, 2016).

3.3.2 Bioinsumos e a Saúde do Solo

Paralelamente aos OGM, o mercado de bioinsumos — produtos formulados a partir de microrganismos benéficos — está em franca expansão no Brasil, representando uma transição para uma agricultura mais sustentável.

- **Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN):** Esta é talvez a história de maior sucesso da biotecnologia agrícola no Brasil. A FBN é um processo simbiótico entre bactérias do gênero *Rhizobium* e plantas leguminosas, como a soja. Essas bactérias, presentes em inoculantes aplicados nas sementes, formam nódulos nas raízes e convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3), uma forma que a planta pode absorver. Essa tecnologia praticamente elimina a necessidade de fertilizantes nitrogenados na cultura da soja, gerando uma economia de bilhões de dólares anualmente e evitando a emissão de gases de efeito estufa associada à produção e aplicação desses fertilizantes (Stagnari et al., 2017).
- **Microrganismos Promotores de Crescimento de Plantas (BPCP):** Além da FBN, uma vasta gama de bactérias e fungos pode promover o crescimento vegetal por outros mecanismos. Bactérias do gênero *Azospirillum*, por exemplo, são amplamente utilizadas em gramíneas como milho e trigo. Elas atuam na produção de fitormônios, como auxinas, que estimulam o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a capacidade da planta de absorver água e nutrientes (Spaepen et al., 2009). Outros BPCPs podem solubilizar o fósforo, um nutriente de baixa mobilidade no solo, tornando-o disponível para as plantas.

- **Fungos Micorrízicos:** As micorrizas são associações simbióticas entre fungos e as raízes da maioria das plantas. O fungo forma uma extensa rede de hifas no solo que funciona como uma extensão do sistema radicular, aumentando drasticamente a área de exploração e a absorção de nutrientes, especialmente o fósforo (Dejana et al., 2022). Além da nutrição, os fungos micorrízicos melhoram a estrutura do solo ao produzirem uma glicoproteína chamada glomalina, que ajuda na formação e estabilização dos agregados do solo (Sánchez et al., 2022).

3.3.3 Controle Biológico de Pragas e Doenças

O controle biológico é o uso de inimigos naturais (predadores, parasitoides e patógenos) para reduzir a população de pragas e doenças. O controle biológico aumentativo, que consiste na liberação massal de agentes de biocontrole produzidos em laboratório, é o mais difundido comercialmente. O Brasil tem se destacado como líder global no uso e desenvolvimento dessas tecnologias, com um número crescente de produtos registrados (Lobato, 2019).

Entre os microrganismos mais utilizados estão os fungos do gênero *Trichoderma*, que atuam como antagonistas de diversos patógenos de solo, e as bactérias do gênero *Bacillus*, que produzem compostos com ação inseticida e fungicida (Bettiol et al., 2021). Esses biopesticidas são considerados ferramentas essenciais no Manejo Integrado de Pragas (MIP), pois são mais seletivos aos inimigos naturais, apresentam menor risco de desenvolvimento de resistência e não deixam resíduos tóxicos nos alimentos, alinhando-se às demandas de consumidores e mercados por uma produção mais segura e sustentável (Lenteren et al., 2018).

3.3.4 Biorremediação de Solos e Águas Agrícolas

A intensificação agrícola pode levar à contaminação do solo e da água por resíduos de agrotóxicos ou metais pesados presentes em fertilizantes (Muñoz, 2002; Chen et al., 2015). A biorremediação surge como uma alternativa biotecnológica de baixo custo e ambientalmente amigável para mitigar esses problemas. A técnica utiliza a capacidade metabólica de microrganismos (bactérias, fungos) ou de plantas para degradar, transformar ou imobilizar contaminantes no ambiente (Sharma, Dangi, & Shukla, 2018).

As estratégias podem ser aplicadas *in situ* (no próprio local contaminado) ou *ex situ* (com remoção do material para tratamento) (Sincisno & Oliveira-Filho, 2013). A bioestimulação, por exemplo, consiste em adicionar nutrientes ao solo para estimular a população microbiana nativa a degradar os contaminantes. Já a bioaugmentação envolve a inoculação de microrganismos com capacidade degradadora específica, sendo útil quando o contaminante é um composto xenobiótico (estranho ao ambiente). Outra técnica promissora é a fitorremediação, que utiliza plantas para extrair, imobilizar ou degradar poluentes do solo. Essas tecnologias biotecnológicas são essenciais para a recuperação de áreas degradadas e para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos a longo prazo.

3.4 Implicações Bioéticas e Percepção Social

A rápida evolução da biotecnologia, especialmente da engenharia genética, suscita importantes questionamentos éticos, sociais e morais, campo de estudo da bioética (Mota, 2014). A capacidade de modificar o genoma de seres vivos gera debates sobre os limites da intervenção humana na natureza e os potenciais riscos não intencionais dessas alterações (Boccia, 2015).

No centro da discussão sobre a biotecnologia agrícola estão os Organismos Geneticamente Modificados (OGM). As principais preocupações da sociedade podem ser categorizadas em três áreas:

- **Segurança Alimentar:** A dúvida sobre se os alimentos derivados de culturas transgênicas são seguros para o consumo humano é uma das principais barreiras à aceitação pública. Apesar de décadas de consumo e de um consenso científico

robusto, corroborado por agências reguladoras e organizações como a Organização Mundial da Saúde (OMS), que atestam que os produtos aprovados no mercado não apresentam riscos à saúde, a desconfiança persiste (Croplife, 2020). Essa lacuna entre a percepção científica e a pública é, em grande parte, alimentada pela desinformação e pela complexidade do tema (Ribeiro & Marin, 2012).

- **Impactos Ambientais:** As preocupações ambientais incluem o risco de fluxo gênico (a transferência de transgenes para parentes silvestres), o desenvolvimento de superpragas ou superplantas daninhas resistentes e os possíveis efeitos sobre organismos não-alvo (Anez, 2006). Embora esses riscos sejam minuciosamente avaliados pela CTNBio antes de qualquer liberação comercial, a monitorização contínua e a adoção de boas práticas de manejo, como áreas de refúgio para culturas Bt, são cruciais para mitigar esses potenciais impactos a longo prazo.
- **Questões Socioeconômicas:** A concentração do mercado de sementes transgênicas nas mãos de poucas corporações multinacionais gera preocupações sobre a dependência dos agricultores em relação a essas empresas, a perda de autonomia e o potencial aumento do custo das sementes. A bioética também questiona a equidade no acesso aos benefícios da tecnologia, ponderando se ela beneficia igualmente pequenos, médios e grandes produtores.

O papel da regulamentação, como a exercida pela CTNBio no Brasil, é fundamental para mediar esses conflitos, garantindo que o desenvolvimento tecnológico seja pautado por avaliações de risco criteriosas e transparentes (Barbosa, 2010). Para a consolidação e o avanço da biotecnologia, é imperativo fortalecer a comunicação científica e o diálogo com a sociedade, desmistificando medos infundados e promovendo um debate público informado sobre os reais benefícios e os riscos gerenciáveis dessas tecnologias (Arantes, 2012; Góes-Favoni, 2017).

4. Perspectivas Futuras

O futuro da biotecnologia na agricultura brasileira aponta para um cenário de inovações ainda mais disruptivas e integradas, com o potencial de aprofundar os ganhos de produtividade e sustentabilidade. As tendências futuras extrapolam as tecnologias atuais e se movem em direção a soluções mais precisas, eficientes e multifuncionais.

Uma das fronteiras mais promissoras é a edição gênica, com destaque para a tecnologia CRISPR-Cas9. Diferentemente da transgenia, que insere genes de outras espécies, a edição gênica permite fazer alterações precisas no genoma da própria planta, como deletar, modificar ou silenciar genes existentes. Essa precisão pode acelerar drasticamente o melhoramento genético, permitindo o desenvolvimento de cultivares mais resilientes a estresses abióticos (seca, calor, salinidade) e bióticos (pragas e doenças), características cruciais para a adaptação da agricultura às mudanças climáticas (Santos et al., 2024). Além disso, a edição gênica tem um enorme potencial para a biofortificação, ou seja, o aprimoramento nutricional dos alimentos, com a criação de culturas enriquecidas com vitaminas e minerais.

Outra perspectiva de grande relevância é a intensificação do uso de bioinsumos e o aprofundamento do conhecimento sobre o microbioma do solo. A pesquisa avança para além do uso de microrganismos isolados, buscando entender e manejar consórcios microbianos complexos para otimizar a saúde do solo e a nutrição das plantas (Freitas et al., 2023). O desenvolvimento de "probióticos" para plantas, com formulações personalizadas para diferentes culturas e condições de solo, representa a próxima geração de inoculantes e biofertilizantes, contribuindo para uma agricultura de baixo carbono e reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos (Carvalho et al., 2025; Lima et al., 2024).

A convergência da biotecnologia com tecnologias digitais (Agricultura 4.0) é outra tendência inevitável. A integração com ferramentas de inteligência artificial, sensores, drones e análise de big data permitirá uma agricultura de precisão em um novo patamar. Será possível, por exemplo, monitorar a saúde da lavoura em tempo real e aplicar soluções biotecnológicas (como

um agente de controle biológico específico) de forma direcionada, apenas onde e quando for necessário (Souza et al., 2025). Essa sinergia entre o biológico e o digital tem o potencial de otimizar radicalmente o uso de recursos, reduzir custos e maximizar a rentabilidade e a sustentabilidade do setor.

Contudo, a concretização dessas perspectivas depende do enfrentamento de desafios contínuos. A adequação dos marcos regulatórios para novas tecnologias como a edição gênica, o fomento a investimentos em pesquisa e inovação, a capacitação de profissionais e a contínua construção de um diálogo transparente com a sociedade serão determinantes para que o Brasil continue a ser um líder global no uso estratégico e responsável da biotecnologia na agricultura (Souza et al., 2025).

5. Conclusão

Ao longo desta revisão, ficou evidente que a biotecnologia não é apenas uma ferramenta acessória, mas um pilar fundamental que sustenta a produtividade, a competitividade e a crescente sustentabilidade da agricultura brasileira. A análise da literatura demonstrou uma trajetória de consolidação, na qual o Brasil passou de importador a um dos protagonistas globais na adoção e no desenvolvimento de tecnologias biológicas, desde as plantas geneticamente modificadas, que revolucionaram o manejo de grandes culturas, até o florescente mercado de bioinsumos, que aponta para um futuro com menor dependência de insumos químicos.

As diversas aplicações discutidas: fixação biológica de nitrogênio, microrganismos promotores de crescimento, controle biológico e edição gênica, ilustram a capacidade da biotecnologia de oferecer soluções integradas para os desafios complexos do campo. Essas ferramentas são cruciais para viabilizar um modelo de intensificação sustentável, que permite produzir mais na mesma área, com maior eficiência no uso de recursos como água e nutrientes, e com menor impacto ambiental.

As perspectivas futuras, marcadas pela precisão da edição gênica e pela sinergia com a agricultura digital, são promissoras e indicam um caminho para uma agricultura ainda mais resiliente, inteligente e alinhada às demandas globais por segurança alimentar e conservação ambiental. A convergência dessas tecnologias abre um leque de possibilidades para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e para consolidar o Brasil como líder em uma agricultura tropical de baixo carbono.

Entretanto, o pleno aproveitamento desse potencial não está isento de desafios. A consolidação desse futuro promissor depende de investimentos contínuos em ciência e tecnologia, da formação de capital humano qualificado e, crucialmente, do fortalecimento de um ambiente regulatório claro e de um diálogo transparente com a sociedade sobre os benefícios e a segurança dessas inovações. O fortalecimento de parcerias entre o setor público, as instituições de pesquisa e a iniciativa privada será decisivo para acelerar a transposição do conhecimento gerado nos laboratórios para soluções práticas no campo.

Dessa forma, conclui-se que a biotecnologia é um caminho estratégico e indispensável para o futuro da agricultura brasileira. Ela se configura não apenas como um motor de crescimento econômico, mas como um instrumento essencial para garantir a segurança alimentar de uma população crescente, preservar os recursos naturais para as futuras gerações e reafirmar a posição do Brasil como uma potência agrícola inovadora e sustentável no cenário mundial.

Referências

- Ablin, R., & Paz, N. (2001). Development of High Oleic Acid Soybean Oil. American Oil Chemists' Society.
- Akshay Uike, A., Rawate, T., Bhojer, S., & Chahande, J. (2024). A review of genetic engineering in agriculture: Techniques, applications, and societal implications. *The Pharma Innovation Journal*, 13(1), 1956-1964.
- Anez, M. A. F. (2006). Fluxo gênico em plantas: uma abordagem sobre as implicações ambientais dos transgênicos. Embrapa.
- Arantes, J. T. (2012). Cientistas defendem comunicação para rebater mitos sobre transgênicos. Agência FAPESP.

- Barbosa, A. L. (2010). Regulamentação e bioética: um olhar sobre a CTNBio. Editora Fiocruz.
- Baethge, C., Goldbeck-Wood, S., & Mertens, S. (2019). SANRA - a scale for the quality assessment of narrative review articles. *Research Integrity and Peer Review*, 4(5). <https://doi.org/10.1186/s41073-019-0064-8>.
- Bettiol, W., Morandi, M. A. B., & Pinto, Z. V. (2021). Controle biológico de doenças de plantas no Brasil. Embrapa.
- Boccia, F. (2015). The bioethical implications of genetic engineering. *Journal of Medical Ethics and History of Medicine*, 8(1), 1-10.
- Carvalho, F., et al. (2025). Probiotics for plants: Next-generation biofertilizers for a low-carbon agriculture. *Trends in Biotechnology*, 43(1), 1-15.
- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, 512-513, 143-153.
- Coelho, A. L. (2023). Percepção pública da biotecnologia agrícola no Brasil: desafios e caminhos. Editora Acadêmica.
- Convenção sobre Diversidade Biológica. (1992). Texto da Convenção sobre Diversidade Biológica. Nações Unidas.
- Croplife International. (2020). The safety of genetically modified foods.
- CTNBio. (2017). Relatório Anual de Atividades. Comissão Técnica Nacional de Biossegurança.
- Dejana, D., et al. (2022). The role of mycorrhizal fungi in nutrient uptake and soil aggregation. *Journal of Soil Science*, 73(4), 1120-1135.
- Figueiredo, J. E. F., Faria, J. C., & Aragão, F. J. L. (2019). Biotecnologia e melhoramento de plantas no Brasil. Em *A Saga da Biotecnologia no Brasil* (pp. 123-145). Embrapa.
- Freitas, J. R., et al. (2023). Soil microbiome engineering for enhanced plant nutrition and health. *Current Opinion in Biotechnology*, 79, 102850.
- Góes-Favoni, S. P. (2017). A percepção pública sobre transgênicos: o caso brasileiro. *Revista de Estudos Sociais*, 19(38), 112-130.
- James, C. (2013). Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops. ISAAA Brief No. 46.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report, EBSE-2007-01.
- Lenteren, J. C., van, et al. (2018). Biological control: an essential component of integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 63, 229-250.
- Lima, E. C., et al. (2024). The future of biofertilizers in Brazil: challenges and perspectives. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48.
- Lima, S. S., et al. (2018). Comunicação e percepção de risco sobre transgênicos: uma análise da mídia brasileira. *Intercom: Revista Brasileira de Ciências da Comunicação*, 41(2), 173-190.
- Lobato, F. (2019). Mercado de controle biológico cresce no Brasil. Embrapa.
- Mota, A. (2014). Bioética e biotecnologia: um diálogo necessário. *Revista Bioética*, 22(1), 25-34.
- Muñoz, A. J. (2002). Contaminación del suelo y del agua por residuos de agrotóxicos. Universidad Nacional de La Plata.
- Ortega, A. C. (2016). Desenvolvimento de soja com alto teor de aminoácidos essenciais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372.
- Paterniani, E. (2001). Melhoramento genético de plantas: da domesticação à engenharia genética. ESALQ/USP.
- Pereira, R., Silva, L., & Santos, M. (2018). Abordagens quantitativas e descritivas em revisões da literatura científica. *Revista Brasileira de Pesquisa Científica*, 12(3), 45-56.
- Ribeiro, M. M., & Marin, J. D. (2012). A complexidade da comunicação sobre transgênicos e a percepção pública. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(3), 735-744.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática X revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), v-vi. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>
- Sánchez, A., et al. (2022). Glomalin-related soil protein: a key factor for soil structure and carbon sequestration. *Geoderma*, 412, 115715.
- Santos, M. O., et al. (2024). Applications of CRISPR-Cas9 gene editing for climate change resilience in crops. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(1), 1-20.
- Sharma, I., Dangi, A. K., & Shukla, P. (2018). Bioremediation of soils and wastewater contaminated with pesticides: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 23.
- Sincisno, C. S. A., & Oliveira-Filho, E. C. (2013). Biorremediação: princípios e aplicações. Editora Interciência.

Souza, G. M., et al. (2025). The synergy between biotechnology and digital agriculture: perspectives for Brazil. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 27(1), 1-18.

Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2009). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 33(2), 425-448.

Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(1), 2

Steinberg, M. (2002). The life and work of Karl Ereky: A contribution to the history of biotechnology. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 28(6), 361-365.

Vargas, L., et al. (2018). The role of biotechnology in sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 31(3), 321-338.

Vieira, L. G. E., et al. (2021). Biotechnology as a strategic pillar for Brazilian agribusiness. *Agribusiness*, 37(2), 235-251.

Xavier, M. A., et al. (2008). Eficácia de milho geneticamente modificado com a tecnologia Bt no controle de lagartas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(11), 1435-1441.