

CAPÍTULO 4

Bioquímica dos Bioinsumos: Ação de Microrganismos na Agricultura Sustentável

Ayla Rodrigues Trindade

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c4>

Resumo

O aumento da demanda global por alimentos estabelece a necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis e eficientes. O modelo convencional, baseado no uso intensivo de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos, embora tenha ampliado a produtividade, tem causado impactos ambientais negativos e comprometido a saúde do solo. Nesse cenário, a biotecnologia e a bioquímica do solo surgem como alternativas promissoras para a segurança alimentar. Este trabalho aborda o papel da microbiota do solo nos processos bioquímicos essenciais à fertilidade e à nutrição vegetal. São discutidas as interações entre plantas e microrganismos na rizosfera, que favorecem o crescimento vegetal, aumentam a resistência a estresses ambientais e reduzem a dependência de insumos químicos. Além disso, são apresentados os bioinsumos como tecnologias sustentáveis capazes de promover a economia circular e a conservação ambiental. Conclui-se que a valorização da atividade microbiana do solo é fundamental para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais produtivos e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Microrganismo; Bioformulação; Simbiose.

Abstract

The increase in global food demand establishes the need for more sustainable and efficient agricultural systems. The conventional model, based on the intensive use of synthetic fertilizers and chemical pesticides, although having increased productivity, has caused negative environmental impacts and compromised soil health. In this scenario, biotechnology and soil biochemistry emerge as promising alternatives for food security. This work addresses the role of soil microbiota in the biochemical processes essential for fertility and plant nutrition. It discusses the interactions between plants and microorganisms in the rhizosphere, which favor plant growth, increase resistance to environmental stresses, and reduce dependence on chemical inputs. Furthermore, bioinputs are presented as sustainable technologies capable of promoting the circular economy and environmental conservation. It is concluded that valuing soil microbial activity is fundamental for the development of more productive and environmentally responsible agricultural systems.

Keywords: Sustainable agriculture; Microorganism; Bioformulation; Symbiosis.

1. A Produção Agrícola

O grande desafio global do século XXI consiste em implementar práticas agrícolas sustentáveis capazes de alimentar uma população estimada entre 9,5 e 10 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (ALOO et al., 2022; KUMAR et al., 2022). Projeções indicam que a demanda mundial por alimentos deverá crescer cerca de 70%, impondo uma pressão sem precedentes sobre os recursos naturais e os ecossistemas agrícolas (BOUHZAM et al., 2025; HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ et al., 2023).

Historicamente, o aumento da produtividade agrícola foi alcançado por meio da intensificação do uso da terra, associada à aplicação massiva de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos. Embora esse modelo tenha promovido expressivos ganhos produtivos, também resultou em impactos ambientais relevantes e em riscos à saúde humana (ALOO et al., 2022; BOTELHO et al., 2020). Diante das limitações de expansão das áreas cultiváveis e dos efeitos das mudanças climáticas, a ciência passou a buscar, na biotecnologia e na bioquímica, alternativas capazes de garantir a segurança alimentar de forma regenerativa e sustentável (FLORENCIO et al., 2022; MIRANDA et al., 2024).

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma acessível e cientificamente fundamentada, os principais mecanismos bioquímicos envolvidos na ação dos microrganismos no solo agrícola. Ao aproximar a ciência do cotidiano, busca-se evidenciar que a saúde das plantas e a segurança alimentar futura dependem diretamente da compreensão e da preservação das reações químicas invisíveis que ocorrem no solo.

2. Agricultura Convencional e seus Impactos

O modelo agrícola convencional, consolidado após a Segunda Guerra Mundial e impulsionado pela Revolução Verde, baseia-se no uso intensivo de fertilizantes minerais e agrotóxicos (BOTELHO et al., 2020; SANTOS et al., 2024). Embora tenha contribuído para o aumento expressivo da produção de alimentos, esse sistema atingiu um ponto crítico de saturação ambiental. Estima-se que apenas 30% a 40% dos nutrientes aplicados por meio da fertilização

química sejam efetivamente absorvidos pelas plantas, enquanto o restante é perdido para o ambiente (KUMAR et al., 2022; MIRANDA et al., 2024).

As consequências dessas perdas são significativas. A lixiviação de nitrogênio e fósforo contribui para a eutrofização de corpos d'água, enquanto a volatilização da ureia resulta na liberação de óxido nitroso, um gás de efeito estufa com elevado potencial de aquecimento global (ALOO et al., 2022; FLORENCIO et al., 2022).

Junto a isso, o uso prolongado de insumos químicos altera o pH do solo, reduz a biodiversidade microbiana e compromete a ciclagem natural de nutrientes (ALOO et al., 2022; DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024). No contexto da saúde humana, a exposição crônica a agrotóxicos está associada ao desenvolvimento de doenças como câncer, distúrbios endócrinos e malformações congênitas (BOTELHO et al., 2020; MENEZES et al., 2021).

3. Importância da Saúde e da Microbiota do Solo

O solo não atua apenas como suporte físico para as plantas, mas constitui um dos ecossistemas mais complexos e biodiversos do planeta, abrigando mais de 50.000 espécies de microrganismos por grama de solo (JESUS et al., 2024). Esse ambiente integra minerais, matéria orgânica, água e ar, funcionando como um sistema essencial de suporte à vida. A microbiota do solo é responsável pela decomposição da matéria orgânica e pela regulação dos ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

A atividade microbiana é fundamental para a manutenção da fertilidade e da estrutura física do solo. Enzimas como desidrogenases, ureases e fosfatases atuam como bioindicadores da vitalidade do ecossistema. Quando preservada, a microbiota contribui para a melhoria da porosidade, da capacidade de retenção de água e da resistência das culturas a estresses ambientais, como seca e salinidade (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024; KHOSRAVI et al., 2024).

No ciclo do nitrogênio, bactérias como *Rhizobium*, *Azotobacter* e outros microrganismos convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3),

forma assimilável pelas plantas. Esse processo ocorre por meio da enzima nitrogenase, podendo estabelecer-se de forma simbiótica, associativa ou livre no solo (FLORENCIO et al., 2022; REYES et al., 2024).

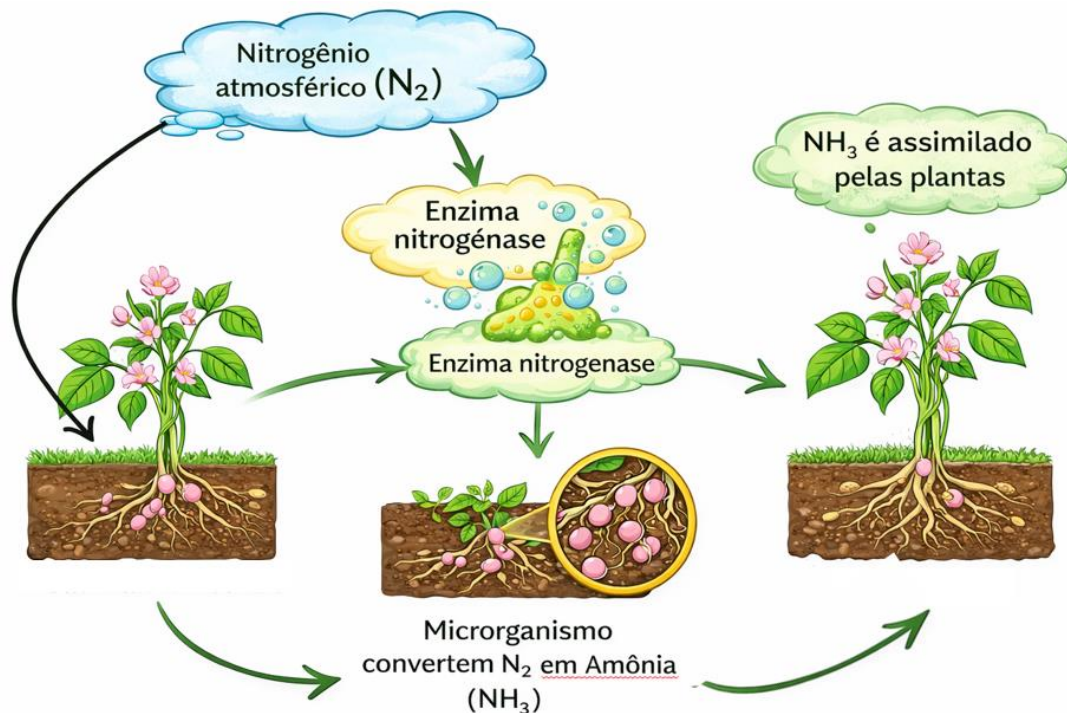


Figura 1. Fixação do nitrogênio por microrganismos. Fonte: adaptado de SAMANTARAY et al., 2024.

De forma semelhante, o ciclo do fósforo é regulado pela ação microbiana. Microrganismos solubilizadores de fosfato, como espécies dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*, secretam ácidos orgânicos e enzimas que promovem a liberação de fósforo mineral e orgânico, ampliando sua disponibilidade para as raízes (KUMAR et al., 2022; ALOO et al., 2022; SAMANTARAY et al., 2024).

Além disso, os microrganismos regulam a disponibilidade de micronutrientes, como o ferro, por meio da produção de sideróforos. Essas moléculas facilitam a absorção do elemento pelas plantas e restringem o acesso de patógenos, contribuindo para o crescimento vegetal (KUMAR et al., 2022; FLORENCIO et al., 2022).

A atividade dos microrganismos também é fundamental para manter a qualidade física do solo. Ao produzirem substâncias naturais, como os

exopolissacarídeos e a glomalina esses organismos ajudam a unir as partículas do solo, melhorando sua estrutura. Esse processo favorece a aeração, aumenta a porosidade e amplia a capacidade do solo de reter água, condições essenciais para o bom desenvolvimento das plantas. Além disso, a presença e a atividade de enzimas microbianas, como desidrogenases, ureases e fosfatases, são amplamente utilizadas como indicadores biológicos da fertilidade e da saúde do solo (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

Esses mesmos processos bioquímicos tornam as plantas mais resistentes a situações ambientais desfavoráveis, como a presença de metais pesados no solo. Além disso, certos microrganismos são capazes de degradar agroquímicos persistentes, contribuindo para a redução da contaminação do solo e da água e para a recuperação ambiental (SZPYRKA et al., 2025).

Nesse contexto, a atividade bioquímica dos microrganismos é o que faz os bioinsumos funcionarem, regulando a saúde das plantas através da produção de enzimas e hormônios naturais. Essas substâncias funcionam como mensagens químicas que orientam o crescimento, a nutrição e a proteção vegetal. O solo, portanto, deixa de ser apenas uma base e se torna um meio ativo de comunicação e trocas vitais entre a terra e a planta. (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

4. Interação Planta–Microrganismo: Comunicação Química no Solo

A rizosfera constitui o principal ambiente de interação entre plantas e microrganismos, mediado por um sofisticado diálogo bioquímico. As plantas liberam composto radiculares ricos em açúcares, aminoácidos e flavonoides, que atuam como sinais químicos capazes de atrair microrganismos benéficos, processo conhecido como quimiotaxia (HASHE; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019; KUMAR et al., 2022).

Microrganismos associados às raízes podem formar biofilmes que aumentam a eficiência da troca de nutrientes e protegem as plantas contra patógenos. Além disso, esses organismos ativam mecanismos de defesa vegetal, como a resistência sistêmica induzida, preparando as plantas para

enfrentar estresses bióticos futuros (HASHE; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019; ZEHRA et al., 2021).

5. Bioinsumos: Uma Tecnologia da Natureza

Os bioinsumos representam uma alternativa sustentável ao modelo agrícola convencional. São definidos como produtos ou processos derivados de recursos biológicos, como microrganismos, enzimas ou extratos naturais, destinados a promover o desenvolvimento e a produtividade das plantas (REYES et al., 2024; PIMENTA et al., 2025). Diferentemente dos insumos químicos, os bioinsumos são biodegradáveis e contribuem para a restauração do equilíbrio biológico do solo (ALOO et al., 2022; BOTELHO et al., 2020).

O desenvolvimento de bioinsumos envolve etapas técnicas rigorosas, que incluem a bioprospecção, o isolamento e a seleção de microrganismos, seguidos de testes laboratoriais, validações em casa de vegetação e ensaios agrônômicos em campo. Em escala industrial, os processos de produção englobam fases de cultivo, formulação e aplicação, com o desafio de manter a viabilidade e a eficácia dos microrganismos até o momento do uso (FLORENCIO et al., 2022; KUMAR et al., 2022).

6. Impacto Ambiental e Economia Circular

O uso de bioinsumos contribui diretamente para a promoção da economia circular na agricultura, ao transformar resíduos agroindustriais, como esterco, camas de frango e cascas vegetais, em substratos para a produção de microrganismos benéficos. Essa estratégia permite que materiais antes considerados passivos ambientais sejam convertidos em insumos de alto valor agrônômico. Além disso, a reutilização desses resíduos contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e diminui o risco de contaminação de mananciais, promovendo sistemas agrícolas mais sustentáveis (BOUHZAM et al., 2025; GARRIDO et al., 2018).

Evidências científicas indicam que biofertilizantes formulados com microrganismos como *Bacillus subtilis*, são capazes de reduzir significativamente

as perdas de nitrogênio no solo, contribuindo para a mitigação da poluição química associada ao uso excessivo de fertilizantes sintéticos (CHENG et al., 2025; DING et al., 2025).

Apesar do elevado potencial agrônômico e ambiental, a adoção dos bioinsumos em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e institucionais que limitam sua consolidação como alternativas aos insumos químicos convencionais. Um dos principais obstáculos está relacionado à variabilidade de resultados em condições de campo. A eficiência dos bioinsumos pode variar consideravelmente em função de fatores como tipo de solo, pH, temperatura e disponibilidade hídrica, o que gera insegurança entre os agricultores, sobretudo quando comparada à resposta imediata e mais previsível dos fertilizantes e defensivos químicos (SAMANTARAY et al., 2024).

Outro desafio importante diz respeito à estabilidade e à vida de prateleira dos produtos biológicos. Por serem constituídos por microrganismos vivos ou células em estado dormente, os bioinsumos são mais sensíveis a condições adversas durante o armazenamento e o transporte, como altas temperaturas e exposição à radiação solar. Essas limitações podem comprometer a viabilidade microbiana e, conseqüentemente, a eficácia do produto no campo, tornando necessária a adoção de formulações mais estáveis e de sistemas logísticos adequados (KHOSRAVI et al., 2024).

Além disso, o investimento inicial exigido para a produção de bioinsumos em escala industrial ainda é elevado. A ausência de materiais carreadores de baixo custo e com ampla compatibilidade para diferentes cepas microbianas dificulta a padronização dos processos produtivos e contribui para o aumento do custo final do produto. Somam-se a esses fatores as barreiras relacionadas ao conhecimento técnico, uma vez que muitos agricultores e aplicadores ainda carecem de informações claras sobre o modo de ação, os benefícios e as condições ideais de uso dos bioinsumos. Em diversas regiões, marcos regulatórios lentos ou pouco adaptados às especificidades dos produtos biológicos também restringem sua difusão e adoção no setor agrícola (SAMANTARAY et al., 2024).

7. O Futuro dos Bioinsumos na Agricultura

O futuro dos bioinsumos na agricultura indica uma integração cada vez maior entre biologia, bioquímica e tecnologias avançadas, com o objetivo de tornar os resultados em campo mais eficientes, estáveis e previsíveis. Nesse contexto, a engenharia genética e a biotecnologia tendem a ocupar um papel central, permitindo o desenvolvimento de microrganismos mais eficientes na fixação de nutrientes, na produção de compostos benéficos às plantas e no controle de pragas e doenças (REYES et al., 2024). Associadas a ferramentas genômicas modernas, como o sequenciamento de nova geração, essas abordagens possibilitam a criação de bioinoculantes “sob medida”, adaptados às características específicas do solo, do clima e das culturas agrícolas (ALOO et al., 2022).

Paralelamente, a nanotecnologia surge como uma das fronteiras mais promissoras para o avanço dos bioinsumos. O desenvolvimento de nanobiofertilizantes, baseados em sistemas de nanoencapsulamento, permite a liberação lenta e controlada de nutrientes e microrganismos, aumentando a estabilidade das formulações e a eficiência de absorção pelas plantas. Como resultado, há redução das perdas por lixiviação e volatilização, o que diminui o desperdício e os impactos ambientais associados à fertilização convencional (BOTELHO et al., 2020).

Esses avanços científicos e tecnológicos refletem-se também no crescimento expressivo do mercado de bioinsumos. Estimativas indicam que o mercado global de biofertilizantes apresente taxas anuais de crescimento entre 12% e 15%, impulsionado pela expansão da agricultura orgânica, pela demanda por sistemas produtivos mais sustentáveis e pela implementação de políticas públicas voltadas à redução do uso de insumos químicos sintéticos (ALOO et al., 2022). Diante disso, a transição para uma agricultura baseada na biodiversidade microbiana não representa apenas uma inovação tecnológica, mas uma necessidade estratégica para assegurar que o motor invisível do solo continue sustentando a produção de alimentos de maneira ambientalmente responsável (PIMENTA et al., 2025).

8. Referências

- ALOO, B. N. et al. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-21, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1002448.
- BOTELHO, M. G. L. et al. Agrotóxicos na agricultura: agentes de danos ambientais e a busca pela agricultura sustentável. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e396985806, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5806.
- BOUHZAM, I. et al. Assessing environmental impacts of various biofertilizers in Europe: A step toward circular economy transition. **Sustainable Production and Consumption**, v. 56, p. 460-476, 2025. DOI: 10.1016/j.spc.2025.04.012.
- CHENG, X. et al. Biofertilizer has stronger mitigation effects on greenhouse gas emissions and C sequestration effects on ecosystems than chemical fertilizer. **Industrial Crops & Products**, v. 232, p. 121244, 2025. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121244.
- DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 85, p. 1-42, 2024. DOI: 10.3390/biology13020085.
- DING, B. et al. Biofertilizers improve cotton yield by regulating microbial communities and N cycling processes in cotton fields under irrigated water with different salinity levels. **Field Crops Research**, v. 331, p. 109998, 2025. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.109998.
- FLORENCIO, C. et al. Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável. **Química Nova**, v. 45, n. 9, p. 1133-1145, 2022.. DOI: 10.21577/0100-4042.20170909.
- GARRIDO, E. C. et al. Tecnologias para a Produção de Biofertilizantes: tendências e oportunidades. **Cadernos de Prospeção**, Salvador, v. 12, n. 3, p. 665, 2018. DOI: 10.9771/cp.v12n3p665.
- HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD_ALLAH, E. F. Bacillus subtilis: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, p. 1291-1297, 2019. DOI:10.1016/j.sjbs.2019.05.004.
- HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, C. et al. A study of microbial diversity in a biofertilizer consortium. **PLoS ONE**, v. 18, n. 8, p. e0286285, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0286285.
- JESUS, J. F. V. et al. Composição microbiológica e indicadores físicos e químicos de biofertilizantes líquidos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 28, p. 997-1018, 2024. DOI: 10.21438/rbgas(2024)112832.

KHOSRAVI, H. et al. Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects.

Current Research in Microbial Sciences, v. 7, p. 100268, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100268.

KUMAR, S. et al. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 3, p. 100094, 2022. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100094.

MENEZES, J. F. F. et al. Contaminação de águas superficiais por agrotóxicos: análise dos impactos causados na saúde humana e ambiental. **Perspectivas Online: Biológicas & Saúde**, v. 11, n. 37, p. 19-35, 2021. DOI: 10.25242/8868113720212259

MIRANDA, A. M. et al. Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. **Biology**, v. 13, n. 3, p. 199, 2024. DOI: 10.3390/biology13030199.

PIMENTA, R. M. B. et al. Conhecimento científico sobre biofertilizantes ao longo de 120 anos de pesquisa. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 9, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n9-341.

REYES, P. et al. Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. **Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales**, v. 10, p. 185-211, 2024. DOI: 10.53010/nys10.06.

SAMANTARAY, A. et al. Advances in microbial based bio-inoculum for amelioration of soil health and sustainable crop production. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, p. 100251, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100251.

SANTOS, E. L. et al. Impactos causados pelo uso excessivo de agroquímicos na agricultura familiar: uma revisão. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 3, p. 1-15, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n3-113.

SZPYRKA, E. et al. Effect of effective microorganisms on the bioremediation of acetonitrile contaminated soil. **Scientific Reports**, v. 15, p. 1-12, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-10351-0.

ZEHRA, A. et al. Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: A review. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 2, p. 100054, 2021. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100054.

Autores

Ayla Rodrigues Trindade

Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá