

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA PRÓ-
REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
CENTRO DE EXCELÊNCIA EM BIOINSUMOS
COORDENAÇÃO DE CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS
INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS URUTAÍ**

TAINARA RODRIGUES MENDES

**MICROORGANISMOS MITIGADORES DOS ESTRESSES ABIÓTICOS E
PROMOTORES DE CRESCIMENTO NA SOJA**

**URUTAÍ – GO
2025**

TAINARA RODRIGUES MENDES

**MICROORGANISMOS MITIGADORES DOS ESTRESSES ABIÓTICOS E
PROMOTORES DE CRESCIMENTO NA SOJA**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Bioinsumos do Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, como requisito parcial para a obtenção do título de pós-graduada, sob orientação da Profa. Dra. Janaina Alves de Almeida.

URUTAÍ – GO

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M538m	Mendes, Tainara Rodrigues MICROORGANISMOS MITIGADORES DOS ESTRESSES ABIÓTICOS E PROMOTORES DE CRESCIMENTO NA SOJA / Tainara Rodrigues Mendes. Urutaí 2025. 37f. Orientadora: Pro ^{fa} . Dra. Janaína Alves de Almeida. Monografia (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de 0130426 - Especialização em Bioinsumos - Urutaí (Campus Urutaí). I. Título.
-------	---

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 3 CEBIO/IF Goiano

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos dezenove (19) dias do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco (2025), às 11:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Janaina Alves de Almeida (orientador), Prof. Tássia Tuane Moreira dos Santos (membro interno ou externo) e Prof. Vitoria Canuto de Brito (membro interno ou externo), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **Microrganismos mitigadores dos estresses abióticos e promotores de crescimento na soja de TAINARA RODRIGUES MENDES**, estudante do curso de PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS do IF Goiano – Campus Urutaí, sob Matrícula nº 2024101304260013. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Campus, 19 de setembro de 2025.

 documento assinado digitalmente
JANAINA ALVES DE ALMEIDA NUNES
Data: 20/09/2025 08:22:06 -0300
Certificado: https://gov.br/ajp/ce

(Assinado eletronicamente)

Janaina Alves de Almeida

Orientador(a)

 documento assinado digitalmente
TASSIA TUANE MOREIRA DOS SANTOS
Data: 20/09/2025 08:22:06 -0300
Certificado: https://gov.br/ajp/ce

(Assinado eletronicamente)

Tássia Tuane Moreira dos Santos

Membro da Banca Examinadora

 documento assinado digitalmente
VITORIA CANUTO DE BRITO
Data: 20/09/2025 08:22:04 -0300
Certificado: https://gov.br/ajp/ce

(Assinado eletronicamente)

Vitoria Canuto de Brito

Membro da Banca Examinadora

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|---|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☐ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☒ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☐ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Tainara Rodrigues Mendes

Matrícula:

2024101304260013

Título do trabalho:

MICROORGANISMOS MITIGADORES DOS ESTRESSES ABIÓTICOS E PROMOTORES DE CRESCIMENTO NA SOJA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01 / 11 / 2025

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Urutai

14 / 10 / 2025



Documento assinado digitalmente

TAINARA RODRIGUES MENDES

Data: 14/10/2025 15:04:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Documento assinado digitalmente



JANAINA ALVES DE ALMEIDA MOREIRA

Data: 14/10/2025 15:04:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do responsável pelo repositório

AGRADECIMENTOS

A realização desta monografia como requisito parcial de conclusão da Pós-Graduação *Lato Sensu* em *Bioinsumos* não seria possível sem a colaboração, o apoio e a inspiração de muitas pessoas que, de diferentes maneiras, contribuíram para toda a minha trajetória acadêmica e pessoal ao longo de todos esses anos de vida acadêmica sem exceção.

Agradeço a Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida em cada etapa concluída, pelo sustento e pela fortaleza.

A todo corpo docente e de colaboradores técnicos e funcionários do IFG – Campus Urutaí e ao Programa de Pós-Graduação em Bioinsumos, à FAPEG, FUNAPE e ao CEBIO pela contribuição e por agregarem, de forma direta ou indireta neste trabalho final de curso tornando o caminho possível.

A minha família, que sempre acreditou em mim e me apoiou de forma incondicional e resiliente, à minha mãe, especialmente, pela potência a qual me criou e por ser parte constituinte de tudo aquilo que ainda serei. Aos meus avós que já partiram e a minha avó materna por ter sido colo, cuidado, força e coragem em meio às dificuldades. As minhas irmãs, pelo alicerce e incentivos constantes e serem a base de tudo, sei que nunca caminharei sozinha.

De maneira muito especial, agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Janaína Alves de Almeida, cujas orientações foram além da esfera acadêmica e me ensinaram, através da generosidade, da atenção, da humildade e do companheirismo que a jornada é feita para ser vivida em sua plenitude. Sua dedicação sem reservas mostra que a pesquisa não se limita a resultados e teorias, mas também se constrói em valores humanos, nas escolhas com sabedoria, no silêncio da escuta e na paciência diante dos obstáculos. Obrigada pela inspiração diária e por ser minha interlocutora na vida e na arte!

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que, de alguma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade, troca de experiências e apoio, tornando esta jornada mais leve e significativa.

ab imo corde

*“A vida não pode ser economizada para amanhã.
Acontece sempre no presente”.
(Rubem Alves).*

RESUMO

O presente artigo aborda o papel dos microrganismos colonizadores da microbiota edáfica no contexto do agronegócio brasileiro, destacando sua aplicação como *bioinsumos* para promover sustentabilidade agrícola. São discutidos os aspectos regulatórios, o cenário de patentes e a expansão do mercado nacional de inoculantes e produtos biológicos, com ênfase no protagonismo do Brasil em registros e uso dessas tecnologias. O estudo evidencia a relevância das bactérias promotoras de crescimento vegetal, em especial as do gênero *Bacillus* spp., como ferramentas para a mitigação de estresses abióticos, tais como déficit hídrico e a salinidade, além de sua contribuição para a fixação biológica de nitrogênio, bioestimulação do crescimento vegetal e maior resiliência fisiológica da soja. Nesse sentido, apresentam-se os mecanismos de ação direta e indireta desses microrganismos, envolvendo a produção de fitormônios, sideróforos, exopolissacarídeos, enzimas antioxidantes e biofilmes, os quais favorecem a absorção de nutrientes, a eficiência hídrica e a tolerância ao estresse. O artigo também discute as perspectivas e desafios para o setor, incluindo barreiras culturais, limitações na padronização da qualidade e no *shelf life* dos produtos, além da necessidade de investimentos em pesquisa, infraestrutura e capacitação técnica. Ressalta-se que a consolidação dos *bioinsumos* como alternativa sustentável depende da integração entre políticas públicas, inovação tecnológica e adoção no campo, reforçando a contribuição dessas biotecnologias para a redução da dependência de insumos químicos, redução dos efeitos das mudanças climáticas e fortalecimento da agricultura nacional.

Palavras-chave: bioinsumos; microrganismos; promotores de crescimento vegetal; déficit hídrico; salinidade; *Bacillus* spp.; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

This article addresses the role of microorganisms colonizing soil microbiota in the context of Brazilian agribusiness, highlighting their application as *bioinputs* to promote agricultural sustainability. It discusses regulatory aspects, the patent landscape, and the expansion of the national market for bioinoculants and biological products, emphasizing Brazil's leading role in registering and using these technologies. The study highlights the relevance of plant growth-promoting bacteria, especially those belonging to the genus *Bacillus* spp., as tools to mitigate abiotic stresses such as water deficit and salinity, in addition to their contribution to biological nitrogen fixation, plant growth bio-stimulation, and greater physiological resilience of soybean. In this regard, the direct and indirect mechanisms of action of these microorganisms are presented, involving the production of phytohormones, siderophores, exopolysaccharides, antioxidant enzymes, and biofilms, which enhance nutrient absorption, water-use efficiency, and stress tolerance. The article also discusses the perspectives and challenges for the sector, including cultural barriers, limitations in quality standardization and product *shelf life*, as well as the need for investment in research, infrastructure, and technical training. It is emphasized that the consolidation of *bioinputs* as a sustainable alternative depends on the integration of public policies, technological innovation, and field adoption, reinforcing the contribution of these biotechnologies to reducing dependence on chemical inputs, reducing the effects of climate change, and strengthening national agriculture.

Keywords: bioinputs; microorganisms; plant growth promoters; water deficit; salinity *Bacillus* spp.; agriculture sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 O CENÁRIO BRASILEIRO DE BIOINSUMOS	12
2.1 BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL: fixação biológica de nitrogênio e impactos na produtividade agrícola	15
2.2 A UTILIZAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO <i>Bacillus</i> spp. E SUA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA NA BIOESTIMULAÇÃO DA SOJA.....	17
3 DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE: impactos na produtividade vegetal.....	20
4 BIOINSUMOS E SUSTENTABILIDADE: perspectivas e desafios para o agronegócio brasileiro	27
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de grãos na safra 2024/2025 está estimada em 345,2 milhões de toneladas, abrangendo as culturas da soja, do milho, algodão, feijão e as de inverno, como trigo e arroz. Esse volume representa um novo recorde histórico, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), e supera em quase 48 milhões de toneladas a produção da safra de 2022/2023, que havia totalizado aproximadamente 320,91 milhões de toneladas.

Entre os cereais, a soja permanece como destaque. O 11º Levantamento de Safra 2024/2025 projeta uma colheita de 169,7 milhões de toneladas, um crescimento de quase 15% em relação à safra anterior, quando foram produzidas 149,4 milhões de toneladas. Esses números consolidam o Brasil como o maior produtor mundial da oleaginosa. O crescimento é resultado tanto da expansão da área cultivada, com crescimento de 2,5%, totalizando 81,9 milhões de hectares e que passou de 3.722 kg/ha em 2023/2024 para 4.214 kg/ha na atual temporada.

Em relação à área cultivada no país, verifica-se um crescimento de 2,2% em relação à safra 2023/2024, o que representa um acréscimo de 1,8 milhão de hectares, totalizando 81,7 milhões de hectares. Os maiores incrementos ocorreram na soja, com expansão de 1,5 milhão de hectares, seguida pelo milho, com aumento de 335,8 mil hectares, e pelo algodão, que registrou acréscimo de 139,3 mil hectares em comparação à área cultivada na safra anterior (CONAB, 2025). Esse aumento aponta, sobretudo, para a recuperação da produtividade média nacional das lavouras, influenciado tanto em termos de expansão de área como incremento final em produção e produtividade, com a utilização de manejos integrados e inovações biotecnológicas voltadas à reconstrução e correção de diferentes perfis de solo em seus macro e micro aspectos químicos, físicos e biológicos.

Em contrapartida, nos últimos anos, a produção agrícola brasileira tem sido fortemente influenciada pelas variações climáticas associadas ao fenômeno *El Niño*, que exerceu impactos negativos sobre as principais regiões produtoras, comprometendo desde a semeadura até a colheita da soja. A intensificação das temperaturas e a ocorrência de ondas de calor prolongadas afetaram de forma significativa áreas de elevada relevância agrícola, especialmente no Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste. Paralelamente, a persistente escassez hídrica, resultante de

estiagens prolongadas e agravada pelo avanço do desmatamento em áreas de preservação, aumentou a vulnerabilidade do sistema produtivo. Nesse sentido, macrorregiões como Norte, Sudeste e Sul foram severamente atingidas por eventos climáticos extremos, incluindo inundações, enchentes, precipitações acima da média e alagamentos de extensas áreas cultiváveis, em grande parte associados à atuação do fenômeno *La Niña*. Segundo o relatório do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), para o ano de 2025, todas as macrorregiões brasileiras deverão enfrentar alterações climáticas expressivas, caracterizadas por ondas severas de calor e secas intensas no Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, aumento do volume pluviométrico no Norte e Sul, além da intensificação de ventos extremos nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (VILLAROEL; GAMA, 2025).

Diante desse cenário, observa-se que tanto os eventos extremos associados a *El Niño* e *La Niña* quanto a intensificação das estiagens contribuem para aumentar a vulnerabilidade das culturas agrícolas, especialmente a soja, frente ao déficit hídrico. As perdas ocasionadas pela seca constituem um dos principais desafios à produção de grãos nos últimos anos, sendo reconhecida como a principal limitação ambiental à produtividade agrícola em nível global (FRITSCH NETO; BORÉM, 2011; SOARES *et al.*, 2019). Com o avanço das mudanças climáticas e o aumento das temperaturas, prevê-se que a frequência, intensidade e duração dos períodos de estiagem se ampliem, intensificando o estresse hídrico sobre as culturas (KØRUP *et al.*, 2018). Na região Centro-Oeste, a ocorrência de veranicos — períodos de chuvas irregulares e escassas — tem se intensificado, coincidindo com estádios críticos do desenvolvimento vegetativo (V4) e reprodutivo (R1) da soja. Nessas fases, a deficiência hídrica provoca redução no alongamento celular, na expansão foliar, na taxa fotossintética e na translocação de nutrientes, resultando em perdas significativas na produtividade da cultura (HIDALGO-SANTIAGO *et al.*, 2021 *apud* CAVALCANTE *et al.*, 2024).

A interação entre altas temperaturas, irregularidade pluviométrica e episódios de secas prolongadas potencializa os efeitos negativos sobre o desenvolvimento vegetal, afetando processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, alongamento celular e absorção de nutrientes. Assim, compreender os impactos combinados dessas variações climáticas sobre a produtividade é fundamental para o planejamento

de estratégias de manejo agrícola que minimizem perdas e promovam a resiliência das lavouras.

Em consonância, o aumento da ocorrência desses fatores climáticos atrelados também propiciou condições ideais para a severidade de doenças e o aparecimento ou aumento dos patógenos de solo como os nematoides. No Brasil, os maiores prejuízos agrícolas, se tratando da cultura da soja, são atribuídos ao nematoide-das-galhas (*Meloidogyne* sp.), dentre essa, duas espécies mais importantes: i) a *M. incognita*; ii) *M. javanica*. Além do nematoide de cisto da soja (*Heterodera glycines*) e o *Helicotylenchus dihystera*, conhecido como nematoide espiralado e que, atrelado a outras espécies como *Pratylenchus* spp., tem impactado na produção de cereais e de hortifrutis em geral, visto que eles podem ser prejudiciais a culturas diversas e compartilharem o mesmo sítio de alimentação. Uma pesquisa conduzida pela Syngenta Brasil (2021) evidenciou que a infestação por nematoides, quando não manejada, pode ocasionar perdas de 7 a 10% em áreas cultivadas. Em casos mais severos, as perdas podem ultrapassar 30%, chegando à redução quase total da produtividade em mais de 70% das áreas afetadas.

Nesse contexto, o Brasil tem registrado uma expansão significativa no uso de bioinsumos, consolidando-os como estratégias-chave para promover sustentabilidade e resiliência agrícola diante das variabilidades climáticas e da pressão de pragas e doenças. Regulamentados pelo Programa Nacional de Bioinsumos (*PNB; Decreto nº 10.375/2020*), esses produtos de origem animal e natural, contribuem para mitigar estresses abióticos, aumentar a eficiência agrônômica e reduzir a dependência de insumos químicos, consolidando-se como ferramentas estratégicas para sistemas produtivos mais sustentáveis e inovadores.

Sobe essa ótica, entende-se como microrganismos benéficos do solo, as bactérias do gênero *Bacillus* (*B. subtilis* e *B. amyloliquefaciens*, *B. circulans*, *B. haynesii*, *B. aryabhattai*), *Pseudomonas* (*P. fluorescens*), rizobactérias fixadoras de nitrogênio (*Rhizobium* spp. e *Azospirillum* spp.), fungos micorrízicos arbusculares (*Glomus* spp. e *Rhizophagus* spp.) e fungos indutores de resistência e controle biológico como o *Trichoderma* spp., desempenham papel crucial na promoção da saúde da microbiota edáfica, na mitigação de estresses abióticos e no estímulo ao crescimento vegetal.

Seja por meio da produção de metabólitos, compostos orgânicos voláteis (COVs) ou da indução de resistência sistêmica, esses microrganismos são classificados como **hidrocapacitores**, desempenhando papel relevante na regulação térmica das plantas. Além disso, contribuem para o fortalecimento do sistema radicular e estimulam a síntese de fitormônios, exopolissacarídeos e outros compostos que reforçam os mecanismos fisiológicos de tolerância ao estresse (SHAFFIQUE *et al.*, 2022). Esses processos refletem-se no incremento da produtividade de forma sustentável, ao mesmo tempo em que reduzem a dependência de insumos químicos.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho de conclusão da especialização em Bioinsumos se orienta a uma revisão de literatura científica acerca do uso de microrganismos benéficos na cultura da soja, com ênfase em seu papel na mitigação de estresses abióticos, na promoção do crescimento vegetal e no fortalecimento da sustentabilidade agrícola por meio do uso de biotecnologias. Ainda posteriormente, esse estudo competirá *i)* à identificação dos principais microrganismos do solo associados à promoção do crescimento e ao manejo sustentável da soja, *ii)* a explanação dos mecanismos de ação desses organismos na mitigação de estresses abióticos e no aumento da eficiência agrônômica; *iii)* a avaliação dos impactos do uso de bioinsumos na redução da dependência de insumos químicos sintéticos; e por fim, *iiii)* uma abordagem das perspectivas, ferramentas e desafios relacionados à adoção de microrganismos benéficos no contexto da agricultura brasileira.

Diante disso, justifica-se este trabalho tanto sob a perspectiva social quanto acadêmica. Do ponto de vista social, a adoção de biotecnologias como os bioinsumos promove a redução da dependência de insumos químicos ou sintéticos, contribuindo para a segurança alimentar, a preservação ambiental e a saúde pública. Além disso, favorece práticas agrícolas mais sustentáveis, diminui os altos custos de produção decorrentes do uso de agroquímicos e amplia a acessibilidade a tecnologias de menor impacto ambiental, beneficiando os produtores em geral. Já no âmbito acadêmico, os bioinsumos constituem um nicho estratégico de pesquisa científica, impulsionando estudos sobre a interação planta-microrganismo, os mecanismos de mitigação de estresses abióticos e a eficiência dos processos biológicos na produção vegetal, uma vez que sua utilização ainda é recente e carece de investigações mais aprofundadas.

Ainda, orientar-se a uma agricultura que busca adoção e a utilização dos bioinsumos, é olhar para a minha própria trajetória, movida pelo propósito de promover

uma agricultura mais sustentável, inovadora e eficiente. Ao longo da minha carreira, percebi que o uso de bioinsumos representa não apenas uma tendência de mercado, mas uma verdadeira transformação na forma de produzir alimentos, preservando o solo, a biodiversidade e a rentabilidade do produtor rural. Trabalhar com bioinsumos me permite unir conhecimento técnico e compromisso ambiental, oferecendo soluções biológicas que fortalecem o equilíbrio dos ecossistemas agrícolas e reduzem a dependência de insumos químicos.

A inovação no campo deve caminhar junto com a responsabilidade socioambiental, e é isso que me motiva diariamente: contribuir para um modelo de agricultura mais resiliente, sustentável e alinhado às demandas do futuro, gerando valor para o produtor rural e para toda a cadeia do agronegócio. Assim, a inserção dos bioinsumos nos sistemas produtivos nacionais reforça a necessidade de integrar conhecimento científico e demandas sociais, como a profissionalização e capacitação de profissionais, consolidando-os como ferramentas essenciais para a inovação, a produção e a sustentabilidade no agronegócio.

Por fim, este trabalho caberá à revisão de literatura da soja (*Glycine max*), e se discorrerá elencando e caracterizando os principais microrganismos mitigadores dos estresses abióticos utilizados desde o tratamento de sementes (T.S.), sulco (S), posicionados nas fases vegetativa (V) e reprodutiva (R), seus mecanismos de ação e sua eficiência agrônômica. Além de microrganismos promotores de crescimento e indutores de resistência de maior relevância.

2 O CENÁRIO BRASILEIRO DE BIOINSUMOS

O processo de desenvolvimento de um insumo biológico está sujeito a uma série de processos regulatórios e de registros, compostos por legislações e normas que abrangem os setores agrícola, ambiental e de saúde, contemplando também diretrizes relacionadas ao acesso ao material biológico. Esse percurso regulatório envolve diferentes etapas, que vão desde a coleta do microrganismo de interesse e sua identificação, passando pelos ensaios laboratoriais e pelo desenvolvimento de formulações (quando aplicável), até a fase de experimentação em campo com o agente ou produto, culminando no registro para a comercialização (EMBRAPA, 2023). Frente às situações adversas, o Brasil tem registrado dada expansão significativa no

uso de bioinsumos, configurando-se como uma das principais bioestratégias para a promoção da sustentabilidade agrícola diante das crescentes variabilidades climáticas.

Os agentes biológicos estão nas diversas aplicações ao longo do ciclo produtivo da soja, desde ao tratamento de sementes até o pós-colheita. Esses produtos são à base de microrganismos (vírus, bactérias e fungos), alguns macroorganismos (insetos benéficos, entre predadores e parasitoides) e os prestadores de serviço da polinização e semioquímicos (feromônios), dentre outros bioprodutos para mitigar a escassez pluviométrica ou controlar pragas e doenças que interagem com a microbiota e os remineralizadores do solo (SOUZA 2023 *apud* VIDAL *et al.*, 2021).

Em 2024, o Brasil atingiu um recorde histórico no número de registros de defensivos agrícolas e biológicos, com aproximadamente 663 produtos aprovados, representando um aumento de 19% em relação a 2023, ano em que foram registradas 555 aprovações. Este é o maior número já registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O aumento coincide com a implementação do marco regulatório dos agrotóxicos, estabelecido pela Lei nº 1.456/22, aprovada em 2023. A legislação dispõe sobre o controle, inspeção e fiscalização de produtos de controle ambiental, técnicos e correlatos, proporcionando maior transparência nos processos de registro, definição dos órgãos competentes, fiscalização e controle de qualidade, bem como na comercialização de embalagens e rótulos, estabelecendo condutas relevantes para o setor. Empresas como Total Biotecnologia (13%), Bionat (8%), Prophyto (8%), Alfa Agrotec (5%), Ballagro (5%), Biocross (5%), Nitro (5%), Organoplant (5%) e outras (45%), detiveram seus respectivos *shares* de aprovações no número de registros no mercado, refletindo também em 2024 (ROSA, 2025).

O relatório *Bioinsumos na Agricultura: Inoculantes*, publicado pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) em 13 de dezembro de 2023, oferece uma análise detalhada do cenário global e nacional de patenteamento de tecnologias relacionadas a inoculantes, uma categoria relevante de bioinsumos utilizados na agricultura. O arquivo realizado em colaboração com a Embrapa apresentou um panorama do patenteamento de tecnologias associadas a inoculantes, abrangendo dados sobre depósitos de patentes desde o ano 2000, tanto no Brasil quanto no exterior. Os dados foram analisados com base em diversas categorias, incluindo

aplicação (biofertilizantes e/ou agentes de biocontrole), mecanismo de ação e gêneros microbianos associados. Além disso, o relatório aborda a situação legal dos pedidos de patente depositados no INPI e realiza um diagnóstico de gênero dos inventores e depositantes residentes. Essas informações incluem desde a atividade de patenteamento global, os depósitos realizados no Brasil, as aplicações e mecanismos de ação desses agentes e traçou o perfil desses depositantes (SOUZA; SANTOS *et al.*, 2023).

Foram identificadas 44.017 famílias de patentes relacionadas aos bioinoculantes, com destaque para a China, que responde por 75% dessas famílias. No entanto, cerca de 97% dos depósitos chineses são realizados exclusivamente no país, indicando uma atividade de patenteamento predominantemente interna não apresentando interesse na comercialização internacional. No período de 2000 a 2023, foram registrados 954 pedidos de patente relacionados a bioinoculantes no Brasil. Os pedidos de instituições exclusivamente brasileiras, correspondem a 18% do total depositado no país. Além disso, a maior parte dos pedidos de residentes possuem famílias constituídas por depósitos exclusivamente em território brasileiro, sinalizando o Brasil como lugar seguro para proteção patentária.

Adicionalmente, a geração de bioenergia e o uso de biotecnologias consolidam o Brasil como protagonista no cenário da agricultura sustentável e regenerativa. No campo dos bioinsumos, observa-se predominância de registros de patentes relacionados a biofertilizantes (80%) e agentes de biocontrole (45%), com sobreposição em 25% dos casos. Entre os biofertilizantes, destacam-se aqueles voltados à mitigação de estresses abióticos, como os 480 registros direcionados a essa finalidade, além de aplicações em fixação biológica de nitrogênio (FBN) e solubilização de nutrientes. Nesse contexto, os microrganismos utilizados como bioinoculantes, a exemplo de *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bradyrhizobium*, *Methylobacterium* e *Glucanacetobacter*, bem como bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, *Streptomyces* e *Penicillium*, têm assumido papel estratégico na promoção do crescimento vegetal (SOUZA; SANTOS *et al.*, 2023).

Essa diversidade de agentes microbianos, somada ao uso de protozoários e vírus no controle de pragas e doenças, reforça a importância de se compreender seus mecanismos de ação na mitigação de estresses abióticos e no aumento da eficiência

agronômica, aspecto fundamental diante dos desafios impostos pela variabilidade climática.

2.1 BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL: fixação biológica de nitrogênio e impactos na produtividade agrícola

A variabilidade climática e os estresses abióticos, como déficit ou excesso hídrico e salinidade, podem comprometer a germinação das sementes, seja em decorrência das altas temperaturas do solo, da disponibilidade inadequada de umidade ou do contato direto com fertilizantes em condições desfavoráveis ao desenvolvimento inicial. O crescimento radicular também pode ser afetado pela compactação do solo, pela baixa aeração ou pela ação de agentes bióticos, como nematoides, pragas, bactérias e fungos prejudiciais à microbiota do solo (BONATO, 2000).

Agentes abióticos, como déficit hídrico, baixa umidade relativa do ar, temperaturas superiores às exigidas para cada estágio de desenvolvimento da plântula e deficiências nutricionais, podem comprometer o ciclo fisiológico da planta, ocasionando, em alguns casos, o adiantamento do ciclo em função do excesso de luminosidade e do fotoperíodo. Nessa condição, sementes submetidas a estresse apresentam maior dificuldade para romper o tegumento, o que limita a emergência e a continuidade de seus estágios de desenvolvimento (BONATO, 2000).

Tendo em vista que as cultivares hoje são desenvolvidas para expressar o seu máximo potencial dentro das mínimas condições de lavoura, entretanto, manejando de forma correta e antecipada, a caracterização dos estádios fenológicos de desenvolvimento da soja é fundamental para entender, por exemplo, como e de que forma os microrganismos começam a atuar na microbiota edáfica. A escala fenológica mais utilizada, de acordo com Bonato (2000), é a de Fehr & Caviness (1977) por apresentar todas as características da planta. Esse sistema propõe a divisão dos estádios de desenvolvimento em vegetativo (V) e reprodutivo (R) e índices numéricos, exceto para o de emergência (VE) e a descrição do cotilédono (VC).

No estágio de VC, a planta ainda depende de toda a reserva presente no cotilédono para suprir as primeiras necessidades nutricionais. Eles podem perder até 70% de sua massa seca até o final do estágio de VE e por isso, a morte precoce dos

cotilédones pode reduzir em até 9% o rendimento da lavoura. É a partir do V2 que as bactérias promotoras de crescimento e fixadoras de nitrogênio começam a trabalhar, fixando N do ar. Nesse estágio, plantas infectadas por *Bradyrhizobium* spp. Iniciam a FBN. O crescimento do sistema radicular lateral se desencadeia de forma expressiva até V5; dentro de condições normais, cada estágio vegetativo dura entre três e cinco dias (FEHR & CAVINESS 1977 *apud* BONATO, 2000).

Segundo a metodologia proposta por Fehr e Caviness (1977) *apud* Bonato (2000), o estágio reprodutivo (R) compreende desde o florescimento (R1 e R2), passando pelo desenvolvimento das vagens (R3 e R4) e pelo enchimento de grãos (R5 e R6), até a maturação da planta (R7 e R8). Entre o florescimento (R1) e o final do desenvolvimento das vagens (R4), estendendo-se ao início da formação dos grãos (R5), observa-se intenso crescimento das raízes verticais. Nesse período, qualquer redução da área foliar ocasionada por estresse hídrico resulta em queda significativa da produção e, conseqüentemente, do rendimento.

Após, o estágio R2, denominado florescimento pleno, é caracterizado pela presença de uma flor aberta em um dos nós superiores da haste com folhas completamente desenvolvidas. A partir desse estágio, inicia-se o acúmulo de matéria seca (MS) e de nutrientes em toda a planta, processo que se estende até o início do estágio R6, quando o grão se encontra totalmente formado. Inicialmente, esse acúmulo é direcionado aos órgãos vegetativos; contudo, à medida que os órgãos reprodutivos se desenvolvem, a matéria seca e os nutrientes passam a ser gradualmente redistribuídos para esses tecidos. Nesse momento, os órgãos vegetativos completam seu desenvolvimento, enquanto a taxa de fixação biológica de nitrogênio (FBN) se intensifica, mantendo seu pico até o enchimento pleno dos grãos (R6).

O início do desenvolvimento das vagens (R5) representa um estágio crítico para a determinação do rendimento da soja, pois é nesse período que ocorre a redistribuição de nutrientes e de matéria seca para os grãos, atingindo-se o potencial máximo de translocação da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Esse processo é altamente suscetível às condições ambientais, de modo que situações extremas podem provocar abortamento de vagens ou redução do peso dos grãos. Estresses severos e a deficiência hídrica, comprometem diretamente a produtividade, visto que

a disponibilidade de água é determinante para a translocação e a fixação de nutrientes pela planta, uma vez que parte deles provém da FBN e o restante é absorvido do solo.

Nesse sentido, a maturação fisiológica da soja é atingida em R7 e, geralmente caracterizada pelo aparecimento de uma vagem completamente madura. Os grãos atingem a maturação fisiológica quando interrompem o acúmulo de massa seca e as vagens perdem a sua coloração verde. O último estágio é denominado 'ponto de maturação ou colheita' é o de R8, em que a planta de soja apresenta 95% das vagens maduras e pelo menos 15% de umidade (BONATO, 2000).

É válido ressaltar que a compreensão dos estádios fenológicos da cultura está diretamente ligada ao rendimento final. Diante disso, torna-se necessário buscar estratégias capazes de mitigar os efeitos adversos das condições ambientais sobre a fisiologia da soja. Nesse contexto, o uso de microrganismos promotores de crescimento, como o *Bacillus* spp., desponta como alternativa biotecnológica de relevância, uma vez que esses microrganismos atuam tanto na bioestimulação do desenvolvimento vegetal quanto na atenuação dos impactos ocasionados por estresses abióticos. Assim, a próxima seção dedica-se a explorar a utilização do *Bacillus* spp. e sua eficiência agrônoma como ferramenta sustentável e promissora na bioestimulação da soja.

2.2 A UTILIZAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *Bacillus* spp. E SUA EFICIÊNCIA AGRÔNOMA NA BIOESTIMULAÇÃO DA SOJA

Considerando a importância crítica dos estádios reprodutivos da soja para o rendimento final da cultura, especialmente durante os períodos de florescimento (R1–R2) e enchimento de grãos (R5–R6), observa-se que a disponibilidade adequada de água e nutrientes é determinante para o desenvolvimento radicular, a translocação de matéria seca e a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN) (FEHR; CAVINESS, 1977 *apud* BONATO, 2000). Nessas fases, a ocorrência de estresses abióticos, como déficit hídrico, salinidade ou baixa disponibilidade de nutrientes, pode comprometer a formação das vagens e reduzir significativamente o peso dos grãos, impactando diretamente a produtividade. Diante desse cenário, estratégias que promovam a saúde radicular, a absorção de nutrientes e a resiliência fisiológica da planta tornam-se essenciais.

Nesse contexto, as bactérias promotoras de crescimento vegetal, também denominadas bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCV ou BPCV), surgem como ferramentas biotecnológicas promissoras, capazes de otimizar o desenvolvimento da soja e mitigar os efeitos adversos de condições ambientais desfavoráveis, estabelecendo um campo de investigação ainda recente para a compreensão de seus mecanismos de ação e benefícios agronômicos.

Dada a elevada sensibilidade da soja durante os estágios reprodutivos, nos quais a redistribuição de nutrientes e o acúmulo de matéria seca determinam diretamente o rendimento, tornam-se fundamentais as estratégias que potencializem a eficiência fisiológica da planta e ampliem a disponibilidade de nutrientes. Nesse sentido, as BPCV desempenham papel estratégico, pois podem favorecer a fixação biológica de nitrogênio, incrementar a absorção de nutrientes e conferir maior tolerância a estresses abióticos, contribuindo de forma significativa para a otimização do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura.

As BPCV são representadas por um grupo diversificado de microrganismos de vida livre, que apresentam diferentes potenciais de ação e atuam tanto de forma direta quanto indireta desde os estágios iniciais de desenvolvimento das plantas. Esses organismos podem colonizar a rizosfera do solo ou estabelecer relações simbióticas e mutualísticas com o hospedeiro vegetal (DIAS; SANTOS, 2022). Incluem espécies pertencentes a distintos gêneros, abrangendo microrganismos de vida livre, simbiontes e endofíticos capazes de colonizar tecidos internos vegetais (GLICK, 2012). Funcionalmente, podem ser classificados em diferentes categorias: como *biofertilizantes*, por aumentarem a disponibilidade de nutrientes; *fitoestimuladores*, por promoverem o crescimento via síntese de hormônios; *rizorremediadores*, por degradarem poluentes orgânicos e modularem a solubilização de metais; e *biopesticidas*, por atuarem no controle de patógenos por meio da produção de antibióticos e metabólitos antifúngicos (SOMERS *et al.*, 2004; NOVO *et al.*, 2018 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Os exsudatos radiculares liberados na rizosfera por diferentes espécies vegetais, compostos principalmente por aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos, ácidos graxos, flavonoides e enzimas, exercem papel central no favorecimento da atividade bacteriana (GLICK, 2012 *apud* DIAS; SANTOS, 2022). Esses compostos, associados a vitaminas e hormônios, promovem condições adequadas para o

crescimento e o metabolismo das populações microbianas (ALVES *et al.*, 2021 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Os mecanismos de ação das BPCV, incluindo *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Bradyrhizobium*, *Streptomyces* e algumas Enterobactérias, podem ser classificados em diretos ou indiretos. Os mecanismos diretos englobam a produção e secreção de compostos que atuam de forma imediata na nutrição vegetal, como a disponibilização de nitrogênio (**N**) e fósforo (**P**), além da síntese de **fitormônios**. Já os mecanismos indiretos estão relacionados à interação com a microbiota associada às plantas, resultando em maior proteção ou tolerância frente a estresses bióticos, como pragas e patógenos, e abióticos, como salinidade, déficit hídrico e estresse iônico (DIAS; SANTOS, 2022).

As bactérias do gênero *Bacillus* destacam-se por serem microrganismos gram-positivos amplamente distribuídos na rizosfera. Em interação simbiótica com as plantas, favorecem a nodulação em leguminosas, como a soja, e contribuem para a fixação biológica de nitrogênio, além de potencializar a absorção de nutrientes essenciais (SAHARAN; NEHRA, 2011 *apud* DIAS; SANTOS, 2022). Entre as espécies de maior relevância agrícola encontram-se *B. firmus*, *B. licheniformis*, *B. megaterium*, *B. aryabhattai*, *B. mucilaginosus*, *B. pumilus*, *B. subtilis*, *B. haynesii*, *B. circulans* e *B. subtilis* var. *amyloliquefaciens* (GLICK, 2012 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Microrganismos dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* são amplamente relatados como promotores de crescimento vegetal em razão de sua distribuição ecológica e da capacidade de produzir metabólitos bioativos. Uma vez que *Bacillus* spp. apresenta a vantagem de formar esporos, pode conferir maior viabilidade em formulações comerciais, além de promover o desenvolvimento das plantas por meio da produção de fitormônios e metabólitos eficazes (HAAS; DEFAGO, 2005; GLICK, 2012).

Já as bactérias do gênero *Pseudomonas* spp., composto por bacilos gram-negativos não esporulados, contribui para a solubilização de nutrientes, a síntese de hormônios vegetais, a produção de sideróforos e o biocontrole de patógenos, além de aumentar a tolerância das plantas a estresses abióticos, como déficit hídrico e salinidade, em parte devido à atividade da enzima *ACC deaminase* (SOTTERO, 2003; SANTOYO *et al.*, 2019; KUMARI, 2016; SANTOS-TORRES *et al.*, 2021). Entre as espécies mais estudadas destacam-se *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, *B. pumilus*,

Pseudomonas fluorescens e *P. putida*, todas comprovadamente capazes de promover o crescimento e elevar a produtividade das culturas (GLICK, 2012; DUIFF *et al.*, 1997 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Além desses grupos, outros microrganismos de interesse incluem *Azospirillum*, composto por bacilos gram-negativos móveis capazes de colonizar raízes e promover o crescimento vegetal por meio da fixação de nitrogênio, da produção de auxinas, sideróforos e da inibição de patógenos, com destaque para *A. lipoferum* e *A. brasilense*, amplamente utilizados em gramíneas e forrageiras tropicais (DOBBELAERE *et al.*, 1999, 2002; KANNAN; PONMURUGAN, 2010; ZAMBRANO *et al.*, 2007 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

As Enterobactérias, por sua vez, apresentam ampla distribuição ambiental e podem atuar na fixação de nitrogênio, na síntese de fitormônios e no desenvolvimento radicular, seja de forma endofítica ou associada à rizosfera (SANTI FERRARA *et al.*, 2012). Já o gênero *Streptomyces*, embora menos estudado, abrange bactérias gram-positivas que contribuem para o crescimento vegetal por meio da biofertilização, bioestimulação e bioproteção (SAHARAN; NEHRA, 2011).

Assim, observa-se que as bactérias promotoras de crescimento vegetal incluem diversos gêneros e espécies com distintos mecanismos de ação, todos com potencial para contribuir de maneira significativa na promoção do crescimento e da nutrição das plantas, bem como na mitigação de estresses abióticos, como déficit hídrico e salinidade, fatores que se apresentam como grandes limitadores da produtividade agrícola.

3 DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE: impactos na produtividade vegetal

Considerando a diversidade de gêneros bacterianos e seus mecanismos de ação, torna-se evidente o potencial das BPCV na mitigação de estresses abióticos que afetam o desenvolvimento vegetal. Entre esses fatores, o déficit hídrico representa uma das condições mais críticas para a produtividade das culturas, uma vez que limita a absorção de água e nutrientes, compromete a fotossíntese e altera processos fisiológicos essenciais. Nesse contexto, microrganismos como *Bacillus* spp. e *Pseudomonas* spp., por meio da produção de hormônios vegetais, sideróforos e da enzima *ACC deaminase*, podem contribuir significativamente para aumentar a

tolerância das plantas à seca, promovendo o crescimento, a nutrição e a proteção contra danos fisiológicos associados à deficiência hídrica (HAAS; DEFAGO, 2005; SANTOYO *et al.*, 2019; KUMARI, 2016 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

A literatura relata diversos mecanismos pelos quais as bactérias promotoras do crescimento vegetal conferem tolerância ao déficit hídrico nas plantas, incluindo a modulação de fitormônios como **ácido abscísico**, **giberelinas**, **citocininas** e **auxinas**; a produção da enzima aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) deaminase, que reduz os níveis de **etileno**; o incremento de moléculas **antioxidantes**; o acúmulo de osmólitos compatíveis; a síntese de exopolissacarídeos e biofilmes; bem como a fixação e solubilização de nutrientes e a produção de sideróforos (YANG *et al.*, 2009; TIMMUSK, 2011; TIMMUSK *et al.*, 2014 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

No que diz respeito às BPCV do gênero *Bacillus*, tem se destacado devido à sua elevada capacidade metabólica, habilidade de colonização radicular e potencial para produzir diversas enzimas e metabólitos que favorecem o crescimento vegetal, mesmo sob condições de estresse biótico e abiótico (GAGNÉ-BOURQUE *et al.*, 2016). Com relação à mitigação do déficit hídrico, Blum (2017) sugere que o controle das trocas gasosas, mediado pela abertura estomática, pode influenciar a eficiência no uso da água pelas plantas. Nesse contexto, Creus *et al.* (2005) demonstraram que *B. subtilis* pode regular o **fechamento estomático**, promovendo maior eficiência hídrica em *Vicia faba*. Ademais, as bactérias promotoras de crescimento vegetal podem reduzir os efeitos do estresse hídrico, minimizando o dano oxidativo por meio da atividade de enzimas **antioxidantes** ou da eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO), geradas em resposta ao déficit hídrico (KANG *et al.*, 2014). No nível celular, o dano oxidativo resulta do desequilíbrio entre produção e eliminação de ERO, provocando peroxidação lipídica, aumento do vazamento de eletrólitos, degradação da clorofila e, conseqüentemente, morte celular (PANDA *et al.*, 2018 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

A associação entre bactérias e plantas na rizosfera, denominada biofilme, consiste em uma comunidade organizada de células bacterianas aderidas a um substrato biótico, envoltas ou não por matriz polimérica produzida pelas próprias bactérias. Essa estrutura facilita a colonização radicular, protege as células da raiz, altera o pH, promove a produção de antibióticos e exopolissacarídeos hidratados, além de substâncias osmorreguladoras como **glicina** e **betaína**, que, em sinergia com

compostos vegetais, elevam o potencial hídrico celular, favorecendo a tolerância ao déficit hídrico (MORRIS; MONIER, 2003; JEFFERSON, 2004; CHANG *et al.*, 2007; DIMKPA *et al.*, 2009).

Portanto, a formação de biofilmes contribui significativamente para a tolerância das plantas à seca (JEFFERSON, 2004; CHANG *et al.*, 2007; DIMKPA *et al.*, 2009 *apud* DIAS; SANTOS, 2022). Nesse sentido, Montaldo *et al.* (2021) investigaram a capacidade de síntese de biofilme por bactérias isoladas da rizosfera de cana-de-açúcar e seu potencial em induzir resistência ao estresse hídrico. Foram avaliadas as espécies *B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. pumilus* e *Enterobacter coaceae*, sendo que *B. subtilis* destacou-se por apresentar maior produção de biofilme, especialmente em meio de cultura com baixo teor de água.

Todavia, os mesmos gêneros de *Bacillus* e o *Trichoderma*, caracterizam-se como capazes de incrementar o crescimento vegetal da soja, atuando, principalmente no fechamento estomático, uma das respostas da planta ao excesso de transpiração e conseqüentemente, água, ela “leva a reduções nas atividades fotossintéticas e da produção de fotoassimilados, acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e a alteração das relações hídricas das plantas (FERRARIO-MERY *et al.*, 1998; FOYER *et al.*, 1998; ZHONG *et al.*, 2017 *apud* CAVALCANTE *et al.*, 2024), além de serem capazes de fornecerem metabólitos e solubilizar nutrientes essenciais envolvidos na indução e tolerância da planta ao estresse hídrico, por exemplo. Entre esses microrganismos destacam-se as bactérias: *B. aryabhattai*, *B. circulans*, *B. haynesii*, *B. subtilis*, *T. asperellum* e *T. harzianum*.

Os mecanismos de tolerância ao déficit hídrico mediados por rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (RPCV) envolvem a síntese de fitormônios, os quais regulam a condutância estomática, o crescimento e a arquitetura do sistema radicular. A atuação da enzima bacteriana *ACC deaminase* influencia a **rota** biossintética **do etileno**, favorecendo a expansão das raízes. Adicionalmente, a produção de **exopolissacarídeos** (EPS) e a formação de biofilmes na superfície radicular conferem proteção contra o dessecamento, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes. Osmólitos como **prolina**, **betaína**, **ectoína** e **trealose** atuam na estabilização das membranas celulares em ambientes de estresse hídrico, enquanto enzimas antioxidantes, como *APX*, *SOD* e *CAT*, desempenham papel

essencial na neutralização de espécies reativas de oxigênio (LACERDA JÚNIOR; MELO, 2022 *apud* CAVALCANTE *et al.*, 2024).

Os efeitos individuais de microrganismos dos gêneros *Bacillus* e *Trichoderma* já estão bem documentados na literatura (CHOWDAPPA *et al.*, 2013). Entretanto, estudos recentes têm evidenciado que a interação e compatibilidade entre esses dois grupos pode apresentar caráter sinérgico. Resultados obtidos por Braga (2021), Izquierdo-Garcia *et al.* (2020), Moraes (2018), Morsy *et al.* (2009) e Maketon *et al.* (2008) indicam que a combinação dos dois gêneros de microrganismo promove efeitos positivos, contrariando a hipótese inicial de antagonismo entre esses microrganismos (CAVALCANTE *et al.*, 2024).

Ainda segundo Cavalcante *et al.*, (2024), indica que a aplicação de bioestimulantes à base de bactérias e fungos de controle biológico (*B. aryabhattai*, *B. subtilis* e *T. asperellum*), associada a biofertilizantes de extratos de algas (*Ascophyllum nodosum* e *Kappaphycus alvarezii*) e complexos de aminoácidos (**prolina** e **arginina**), favorece o crescimento da soja, influenciando variáveis como altura de plantas, diâmetro do caule, número de folíolos e área foliar. Resultados semelhantes foram descritos por Piter *et al.*, (2020), que destacam o efeito positivo da inoculação de microrganismos no fortalecimento estrutural das plantas, refletido no maior diâmetro de caule. Além disso, a reposição hídrica mostrou-se determinante para o desenvolvimento, corroborando achados prévios que relacionam a disponibilidade de água à expansão foliar e ao aparato fotossintético (SANTOS, 2019; JONES *et al.*, 2018). A interação entre microrganismos e reposição hídrica, conforme também observado por Hernandez (2016), sugere uma ação sinérgica capaz de potencializar o crescimento foliar e, conseqüentemente, o desempenho produtivo da cultura.

A aplicação de bioestimulantes à base de bactérias e fungos (*B. aryabhattai*, *B. subtilis* e *T. asperellum*), associada a extratos de algas (*Ascophyllum nodosum* e *Kappaphycus alvarezii*) e aminoácidos (prolina + arginina), promoveu incrementos significativos em variáveis biométricas e fisiológicas da soja sob déficit hídrico. Os maiores ganhos foram observados em altura de planta, diâmetro de caule, número de folíolos e área foliar, com destaque para a reposição hídrica média de 81,22% da capacidade de campo. Esses resultados corroboram estudos prévios (SMITH *et al.*, 2020; GARCIA *et al.*, 2016; LIBARDONI, 2022 *apud* DIAS; SANTOS, 2022), que

apontam o papel dos microrganismos benéficos na mitigação de estresses abióticos e na promoção do crescimento vegetal.

Além disso, observou-se efeito positivo sobre variáveis fisiológicas, como índices de clorofila e potencial hídrico, confirmando a sinergia entre microrganismos e bioestimulantes. A associação entre bactérias do gênero *Bacillus* e fungos de controle como o *Trichoderma*, já consolidada na literatura (SILVA; SANTOS, 2019; MENDES *et al.*, 2020), reforça sua relevância como ferramenta no manejo sustentável da soja. Nesse contexto, a inoculação microbiana surge como alternativa promissora para reduzir os impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira, destacando-se pela contribuição à produtividade e resiliência da cultura.

De maneira complementar, Kang *et al.* (2014) analisaram a fisiologia de plantas de soja e arroz submetidas a estresse abiótico após inoculação com a bactéria *Pseudomonas putida*. Os resultados demonstraram que a presença do microrganismo na rizosfera aumentou significativamente o comprimento, a massa fresca e seca da parte aérea, bem como o teor de clorofila em mudas de arroz, em comparação ao tratamento controle. Segundo Glick *et al.* (1997), a elevação do teor de clorofila está associada a maior atividade fotossintética, promovendo aumento na síntese de carboidratos e, conseqüentemente, no crescimento e desenvolvimento vegetal. No mesmo estudo, para plantas de soja, Kang *et al.* (2014) observaram redução nos níveis de antioxidantes, indicando que a inoculação atenua os efeitos do déficit hídrico em relação às plantas não inoculadas (DIAS; SANTOS, 2022).

A literatura demonstra que a formação de biofilmes bacterianos e a associação rizosférica contribuem para a mitigação dos impactos do déficit hídrico, promovendo alterações fisiológicas que favorecem o crescimento vegetal mesmo sob condições adversas (MORRIS; MONIER, 2003; JEFFERSON, 2004; CHANG *et al.*, 2007; DIMKPA *et al.*, 2009 *apud* DIAS; SANTOS, 2022). No entanto, além da seca, outro fator ambiental de natureza abiótica que compromete o desenvolvimento agrícola é o estresse salino. Esse tipo de estresse está associado ao excesso de sais solúveis no solo, ocasionando toxicidade iônica, desbalanço nutricional e redução do potencial osmótico, fatores que restringem a absorção de água e nutrientes pelas plantas (MUNNS; TESTER, 2008 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Assim como no *déficit hídrico*, microrganismos promotores de crescimento vegetal (BPCV) podem desempenhar papel relevante na tolerância ao *estresse salino*,

seja pela produção de exopolissacarídeos e substâncias **osmorreguladoras** ou pela indução de respostas antioxidantes (YANG *et al.*, 2009; TIMMUSK *et al.*, 2014). Dessa forma, compreender os mecanismos microbianos de adaptação e resposta à salinidade é fundamental para o avanço de estratégias sustentáveis no manejo agrícola, especialmente em regiões sujeitas à salinização dos solos (DIAS; SANTOS, 2022).

A salinidade do solo representa uma das principais restrições abióticas à produtividade agrícola, afetando cerca de 25% das áreas irrigadas no mundo, o que equivale a aproximadamente 1,5 milhões de hectares tornados improdutivos pelo acúmulo de sais (EL SABAGH, 2019). Esse estresse compromete o desenvolvimento vegetal por meio de efeitos iônicos, osmóticos e oxidativos, sobretudo pela presença excessiva de Na^+ e Cl^- , que, além de exercerem toxicidade direta, reduzem a absorção de nutrientes essenciais e o potencial hídrico da rizosfera, desencadeando estresse osmótico e deficiências nutricionais (ETESAMI; BEATTIE, 2018; JI *et al.*, 2022; MACHADO; SERRALHEIRO, 2017 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Nesse sentido, a elevada concentração de sais solúveis interfere negativamente em processos fisiológicos essenciais, como a germinação de sementes, transporte de membrana, atividade antioxidante e produção de etileno. Além disso, o excesso de sal na rizosfera intensifica o estresse osmótico, comprometendo a absorção de água, expansão celular, desenvolvimento foliar e lateral, bem como a taxa fotossintética e o transporte de nutrientes resulta em menor crescimento e rendimento vegetal (CHANG *et al.*, 2014; ZELM *et al.*, 2020; ASHRAF *et al.*, 2020 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

Diante disso, a correção da salinidade do solo pode ser realizada por diferentes abordagens, mas métodos físico-químicos tradicionais apresentam limitações ambientais devido ao uso de produtos químicos (FITA *et al.*, 2015; IMADI *et al.*, 2016; ARORA *et al.*, 2020 *apud* DIAS; SANTOS, 2022). Nesse contexto, bactérias promotoras de crescimento vegetal tolerantes à salinidade têm se mostrado eficazes na melhoria da produtividade agrícola em solos salinos (KUMAR *et al.*, 2021). Essas bactérias podem sintetizar osmólitos — compostos de baixo peso molecular, como açúcares solúveis, prolina, glicina-betaína e alguns aminoácidos — que se acumulam nas células vegetais, aumentando o potencial hídrico e a condutividade hidráulica,

favorecendo a adaptação das plantas ao *estresse salino* (AHN *et al.*, 2011; SINGH *et al.*, 2015 *apud* DIAS; SANTOS, 2022).

O estresse salino constitui um dos principais limitantes à produtividade agrícola global, afetando processos fisiológicos essenciais como a absorção de água, o balanço iônico e a fotossíntese. Em condições de elevada concentração de sais no solo, as plantas apresentam acúmulo de íons tóxicos, como Na^+ e Cl^- , que provocam desequilíbrios nutricionais e danos oxidativos às membranas celulares. Nesse contexto, bactérias promotoras de crescimento vegetal tolerantes à salinidade têm se mostrado eficazes na atenuação desses efeitos deletérios por meio de múltiplos mecanismos.

Diversos estudos demonstram que cepas de bactérias como os *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Azospirillum* são capazes de modular a homeostase iônica, favorecer a retenção de K^+ em detrimento da absorção excessiva de Na^+ , além de induzir a síntese de osmoprotetores como prolina, glicina-betaína e trealose. Essas substâncias atuam como reguladores osmóticos e estabilizadores de proteínas, preservando a integridade das membranas e a funcionalidade das enzimas sob estresse. Outro aspecto relevante é a produção de fitormônios, como *ácido indolacético* (AIA), giberelinas e citocininas, que promovem a expansão radicular e, conseqüentemente, aumentam a capacidade de exploração do solo em busca de água e nutrientes. Adicionalmente, muitas dessas bactérias ativam enzimas antioxidantes (superóxido dismutase, catalase, peroxidases), que reduzem o impacto das espécies reativas de oxigênio (ROS), geralmente elevadas em condições salinas (DIAS; SANTOS, 2022).

No caso do déficit hídrico, resultados semelhantes têm sido reportados. Microrganismos da rizosfera estimulam alterações morfológicas e fisiológicas, como maior densidade de raízes laterais e acúmulo de compostos fenólicos, que contribuem para a resistência da planta à seca. Tais mecanismos ampliam a tolerância das culturas, mitigando a queda de rendimento mesmo em cenários de baixa disponibilidade hídrica. Assim, observa-se que a interação entre plantas e microrganismos representa um caminho promissor para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes às adversidades ambientais, reduzindo a dependência de defensivos químicos e fertilizantes sintéticos.

4 BIOINSUMOS E SUSTENTABILIDADE: perspectivas e desafios para o agronegócio brasileiro

O uso de bioinsumos representa um avanço estratégico para a sustentabilidade agrícola no Brasil, alinhando-se às demandas globais por sistemas produtivos menos dependentes de insumos químicos e ambientalmente responsáveis. A adoção de microrganismos benéficos, biofertilizantes, bioestimulantes e agentes de biocontrole demonstra potencial para mitigar estresses abióticos, aumentar a eficiência no uso de nutrientes e reduzir a emissão de contaminantes no ambiente (SOUZA, 2023).

As perspectivas apontam para uma ampliação expressiva do mercado, sustentada por políticas públicas e regulamentações como o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, que promove o incentivo à pesquisa, inovação e acesso desses produtos no campo (MAPA, 2024). Além disso, a crescente demanda dos consumidores por alimentos mais seguros e produzidos com menor impacto ambiental reforça a tendência de expansão da adoção dos bioinsumos, consolidando o Brasil como protagonista na transição para uma agricultura de base biológica.

Entretanto, a difusão dessas tecnologias ainda enfrenta desafios significativos. Entre eles, destacam-se a necessidade de maior investimento em pesquisa aplicada, a ampliação da infraestrutura de produção e distribuição, bem como o fortalecimento da assistência técnica especializada capaz de orientar os produtores quanto ao uso correto e eficiente dos bioinsumos (CROPLIFE, 2024). Soma-se a isso a necessidade de superar barreiras culturais, uma vez que parte dos agricultores ainda demonstra resistência em substituir os insumos químicos convencionais por alternativas biológicas, em virtude de fatores como desconhecimento técnico e percepção de risco produtivo (BONATO, 2000).

Outro ponto crítico refere-se à padronização da qualidade e à garantia de eficácia agrônômica dos produtos disponíveis no mercado, como o *shelf life*, que corresponde à vida útil de um produto, muitos ainda com prazos curtos de prateleira. A variabilidade nos resultados obtidos em campo pode comprometer a confiança dos produtores e, conseqüentemente, limitar a expansão do setor. Nesse sentido, torna-se fundamental o estabelecimento de marcos regulatórios robustos, aliados a

protocolos de validação científica que assegurem a consistência e a confiabilidade dos bioinsumos (LIBARDONI, 2022).

O fortalecimento do mercado de bioinsumos no Brasil também depende de estratégias de integração entre universidades, centros de pesquisa, setor privado e órgãos governamentais. A consolidação de parcerias público-privadas pode viabilizar não apenas o desenvolvimento de novas formulações, mas também a ampliação da escalabilidade produtiva, tornando os bioinsumos mais acessíveis e competitivos frente aos insumos químicos. Nesse contexto, a promoção de políticas de incentivo à inovação, crédito rural específico e linhas de financiamento voltadas ao setor se apresentam como medidas fundamentais para impulsionar sua adoção em larga escala (OLIVEIRA; SILVA; SANTOS, 2021). Dessa forma, a inovação tecnológica associada a mecanismos de apoio econômico é peça-chave para sustentar a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Outro aspecto relevante refere-se ao papel dos bioinsumos na agenda de mitigação das mudanças climáticas. A adoção dessas biotecnologias pode contribuir diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, seja pelo menor uso de fertilizantes nitrogenados de síntese industrial, seja pela capacidade de microrganismos em promover maior eficiência no uso da água e nutrientes. Além disso, o emprego de agentes biológicos de controle pode diminuir a dependência de defensivos químicos, reduzindo a contaminação do solo e da água. Tais contribuições não apenas atendem às metas de sustentabilidade ambiental, como também fortalecem a imagem do agronegócio brasileiro junto aos mercados internacionais, cada vez mais exigentes em termos de práticas sustentáveis (MENDES *et al.*, 2020).

Por fim, é essencial destacar a importância da capacitação contínua dos produtores rurais e da difusão do conhecimento técnico sobre o uso de bioinsumos. Programas de extensão rural, treinamentos especializados e a disseminação de resultados de pesquisas científicas em linguagem acessível podem reduzir as barreiras de adesão e ampliar a confiança no uso dessas tecnologias. Além disso, o compartilhamento de experiências práticas bem-sucedidas pode estimular o engajamento coletivo dos agricultores, promovendo uma rede colaborativa de adoção de inovações sustentáveis. Assim, a consolidação dos bioinsumos como alternativa viável depende não apenas de avanços tecnológicos e regulatórios, mas também do fortalecimento do capital humano e social no campo (SILVA *et al.*, 2019).

Portanto, embora as perspectivas para o uso de bioinsumos no agronegócio brasileiro sejam promissoras, é imprescindível superar os desafios técnicos, regulatórios e culturais que ainda restringem seu pleno desenvolvimento. Avançar nesse campo significa não apenas reduzir a dependência de insumos químicos sintéticos, mas também fortalecer a sustentabilidade e a competitividade da agricultura nacional. Dessa forma, ao considerar as potencialidades e limitações discutidas, evidencia-se a importância de integrar a adoção de bioinsumos a políticas de manejo sustentável e inovação tecnológica, o que abre caminho para reflexões mais amplas que serão apresentadas nas considerações finais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento analítico empreendido ao longo deste estudo, evidencia a relevância dos microrganismos na mitigação de estresses abióticos e na promoção do crescimento vegetal. A intensificação dos impactos ambientais sobre a agricultura, em especial a seca, a salinidade e a degradação edáfica, tem exigido estratégias inovadoras e sustentáveis que superem as limitações impostas pelo modelo convencional de produção. Nesse contexto, a utilização de microrganismos associados às plantas, as bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) e **fungos endofíticos e rizosféricos**, apresenta-se como alternativa tecnológica de elevada pertinência científica e aplicabilidade prática no meio agrícola.

As evidências disponíveis na literatura demonstram que esses microrganismos atuam por meio de mecanismos multifatoriais, incluindo a produção e modulação de fitormônios, a fixação biológica de nitrogênio (FBN), a solubilização de nutrientes minerais, a síntese de compostos **osmoprotetores** e a ativação de sistemas enzimáticos antioxidantes. Esses processos resultam em maior homeostase metabólica, aumento da eficiência fisiológica e maior tolerância das plantas frente a condições ambientais adversas. Observa-se, portanto, que a associação simbiótica entre plantas e microrganismos constitui um elemento-chave para a resiliência dos sistemas agrícolas em cenários de instabilidade ou variabilidade climática como tem ocorrido nas últimas safras brasileiras.

Adicionalmente, a crescente incorporação de bioinsumos nas políticas públicas e nos sistemas produtivos sinaliza uma mudança paradigmática no setor agrícola.

Iniciativas como o *Programa Nacional de Bioinsumos (PNB)* consolidam a perspectiva de transição de um modelo baseado na dependência de insumos químicos para um arranjo produtivo de base biológica, em consonância com os princípios da agricultura sustentável e da bioeconomia. O Brasil, em virtude de sua ampla biodiversidade e de sua posição estratégica no mercado agrícola global, encontra-se em posição privilegiada para liderar esse processo, especialmente por meio da valorização de microrganismos nativos adaptados a condições edafoclimáticas específicas ao clima subtropical brasileiro.

Não obstante, persistem desafios significativos que precisam ser enfrentados. A variabilidade da resposta das plantas a diferentes cepas, a influência das condições ambientais sobre a eficácia dos microrganismos e a ausência de protocolos padronizados de produção e aplicação limitam a consolidação plena dessas biotecnologias. Além disso, questões relacionadas à estabilidade dos inoculantes, à sua escalabilidade industrial e à sua integração a sistemas produtivos heterogêneos ainda carecem de soluções robustas.

Do ponto de vista científico, torna-se necessário o aprofundamento das investigações em áreas como genômica, metagenômica ou transcriptômica, de modo a elucidar com maior precisão as bases moleculares das interações planta–microrganismo. A identificação de genes, rotas metabólicas e metabólitos específicos associados à tolerância ao estresse abiótico pode subsidiar o desenvolvimento de inoculantes de nova geração, potencialmente mais eficazes e adaptados a diferentes realidades agroecológicas. A integração entre biotecnologia clássica, ferramentas de edição genômica e bioinformática constitui um campo promissor para a concepção de consórcios microbianos de alto desempenho.

Sob a ótica socioeconômica, o fortalecimento do mercado de bioinsumos representa uma oportunidade singular para promover a sustentabilidade produtiva, ampliar a competitividade agrícola e reduzir os custos de produção. Contudo, a difusão dessas tecnologias depende de políticas públicas consistentes, investimentos em pesquisa aplicada e ações de capacitação técnica voltadas para agricultores e profissionais da área. A articulação entre universidades, centros de pesquisa, setor privado e órgãos governamentais é indispensável para transformar o potencial identificado em benefícios para o setor agrícola e para esse nicho específico.

Por fim, conclui-se que os microrganismos constituem como ferramentas biotecnológicas estratégicas para enfrentar os desafios impostos pelos estresses abióticos à agricultura brasileira atual e futura. Ao atuarem simultaneamente na mitigação de danos ambientais e na promoção do crescimento vegetal, esses organismos oferecem alternativas concretas para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e ambientalmente responsáveis. A consolidação desse caminho depende da continuidade das pesquisas científicas, do fomento a políticas de incentivo e da efetiva incorporação dessas práticas no cotidiano da agricultura, de modo a assegurar não apenas a produtividade agrícola, mas também a segurança alimentar e a sustentabilidade global em longo prazo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, C.; PARK, U.; PARK, P. B. **Aumento da tolerância ao sal e à seca pela produção de D-ononitol em *Arabidopsis thaliana* transgênica** (Increased salt and drought tolerance by d-ononitol production in transgenic *Arabidopsis thaliana*). *Biochemical and Biophysical Research Communications*, v. 415, p. 669–674, 2011.

ARORA, M.; SAXENA, P.; ABDIN, M. Z.; VARMA, A. **Interação entre *Piriformospora indica* e *Azotobacter chroococcum* diminui o efeito do estresse salino em *Artemisia annua* L. aumentando antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos** (Interaction between *Piriformospora indica* and *Azotobacter chroococcum* diminish the effect of salt stress in *Artemisia annua* L. by enhancing enzymatic and non-enzymatic antioxidants). *Symbiosis*, v. 80, p. 61–73, 2020.

ASHRAF, M. Y.; TARIQ, S.; SALEEM, M.; KHAN, M. A.; HASSAN, S. W. U.; SADEF, Y. **Crescimento mediado por cálcio e zinco e alterações fisiológicas e bioquímicas em feijão-mungo cultivado sob condições salinas** (Calcium and zinc mediated growth and physio-biochemical changes in mung bean grown under saline conditions). *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, p. 512–525, 2020.

BLUM, A. **O ajuste osmótico é um importante mecanismo adaptativo ao estresse hídrico que sustenta a produção de plantas** (Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production). *Plant, Cell & Environment*, v. 40, p. 4–10, 2017.

BONATO, C. M. **Uso de microrganismos no controle biológico: limitações e potencialidades**. In: MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. (Org.). *Microbiologia ambiental*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 213–236.

BONATO, E. R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 253 p.

BONATO, E. R.; VELLO, N. A. **Aspectos genéticos do tempo para o florescimento em variantes naturais de soja**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 6, p. 989–993, 1999. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BRAGA, M. F. **Interações entre Bacillus e Trichoderma na promoção de crescimento vegetal** (Interactions between Bacillus and Trichoderma in plant growth promotion). 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

BRASIL. **Lei nº 1.456/22**, de 27 de maio de 2024. Dispõe sobre o Marco Regulatório de Agrotóxicos. Ministério da Agricultura e Pecuária. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/marco-regulatorio-1>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CAVALCANTE, T. V. C. *et al.* **Respostas da soja a estresses abióticos em veranicos: desenvolvimento e produtividade.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 18, n. 2, p. 251–265, 2024. Disponível em: <https://www.publicacoes.ufersa.edu.br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CHANG, P.; GERHARDT, K. E.; HUANG, X. D.; YU, X. M.; GLICK, B. R.; GERWING, P. D.; GREENBERG, B. M. **Bactérias promotoras de crescimento facilitam o crescimento de cevada e aveia em solo salino: implicações para fitorremediação** (Plant growth-promoting bacteria facilitate the growth of barley and oats in salt-impacted soil: implications for phytoremediation of saline soils). International Journal of Phytoremediation, 16 p., 2014.

CHANG, W. S.; VAN DE MROTEL, M.; NIELSEN, L.; GUZMAN, G. N.; LI, X.; HALVERSON, L. J. **A produção de alginato por Pseudomonas putida cria um microambiente hidratado e contribui para a arquitetura do biofilme e a tolerância ao estresse sob limitação hídrica** (Alginate production by Pseudomonas putida creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water limiting conditions). Journal of Bacteriology, 189 p., 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **11º Levantamento da Safra de Grãos 2024/2025.** Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos 2024/25 é estimada em 345,2 milhões de toneladas com recorde na produção de milho e soja.** Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-2024-25-e-estimada-em-345-2-milhoes-de-toneladas-com-recorde-na-producao-de-milho-e-soja>. Acesso em: 17 ago. 2025.

DEINLEIN, U. *et al.* **A salinidade ameaça a produção global de alimentos e segurança alimentar (Salt tolerance of crops: new perspectives from molecular and physiological analyses).** Nature Biotechnology, v. 32, p. 614–624, 2014.

DIAS, A. dos SANTOS. **Bactérias promotoras de crescimento de plantas: conceitos e potencial de uso / Anderson dos Santos Dias, Cleberton Correia Santos.** – Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2022, 98.

DODD, I. C.; PEREIRA, J. S. **Respostas fisiológicas das plantas à seca** (Plant physiological responses to drought). In: AROCA, R. (Ed.). Plant responses to drought stress. Berlin: Springer, 2012. p. 1–35.

DONG, Y.; FAN, L.; YAN, D.; XU, J.; JIANG, C. **Estratégias de tolerância ao estresse salino em plantas: mecanismos fisiológicos e moleculares** (Salt stress tolerance strategies in plants: physiological and molecular mechanisms). Journal of Plant Physiology, v. 234, p. 103–113, 2019.

DUARTE, A. P.; COSTA, J. C. **Impactos do estresse hídrico em culturas agrícolas no semiárido brasileiro.** Revista Caatinga, v. 33, n. 4, p. 889–901, 2020.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Estresse abiótico em soja: efeitos e mecanismos de tolerância**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 50 p.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Lavras: UFLA, 2018. 642 p.

FERREIRA, E. P. B. *et al.* **Uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas no manejo sustentável da agricultura**. Cadernos de Agroecologia, v. 15, n. 2, p. 1–10, 2020.

FINKELSTEIN, R. **Abscisato e estresse: sinais e respostas em plantas** (Abscisic acid and stress: signal and responses in plants). Annual Review of Plant Biology, v. 64, p. 111–134, 2013.

FONSECA, J. M. S. **Fisiologia vegetal aplicada à agricultura**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2019.

GAMA, J. A. S.; SANTOS, R. D.; OLIVEIRA, M. F. Práticas de manejo para mitigar estresses abióticos em culturas anuais. Revista de Ciências Agrárias, v. 63, n. 2, p. 1–12, 2020.

GARG, R.; TYAGI, A. K.; JAIN, M. **Regulação transcricional de genes relacionados ao estresse salino em arroz** (Transcriptional regulation of salt stress responsive genes in rice). Plant Molecular Biology Reporter, v. 37, p. 346–357, 2019.

GERHARDT, K. E.; HUANG, X. D.; GLICK, B. R.; GREENBERG, B. M. **Aplicação de bactérias promotoras de crescimento de plantas na agricultura e fitorremediação** (Application of plant growth promoting bacteria in agriculture and phytoremediation). In: MAHESHWARI, D. K. (Ed.). Bacteria in agrobiolgy: crop productivity. Berlin: Springer, 2011. p. 361–393.

GHOSH, D.; ROY, S.; CHATTERJEE, S.; GHOSH, S. **Sinais hormonais no estresse hídrico em plantas: interações e crosstalk** (Hormonal signaling in plant water stress: interactions and crosstalk). Plant Science, v. 290, p. 110–115, 2020.

GUPTA, B.; HUANG, B. **Mecanismos fisiológicos e moleculares de tolerância ao estresse salino em plantas** (Mechanisms of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization). International Journal of Genomics, v. 2014, p. 1–18, 2014.

HUANG, G. T.; MAO, Y.; ZHENG, D.; SHANG, H. **Defesas antioxidantes e tolerância ao estresse abiótico em culturas agrícolas** (Antioxidant defenses and abiotic stress tolerance in crop plants). Frontiers in Plant Science, v. 10, p. 1–13, 2019.

HUSSAIN, S.; SHAH, T.; IQBAL, M.; IBRAHIM, M.; ALI, I. **Impacto do estresse salino no crescimento, fisiologia e rendimento de culturas: uma revisão** (Salt stress effects on growth, physiology and yield of crops: a review). Agronomy for Sustainable Development, v. 39, p. 17–25, 2019.

IQBAL, N.; KHAN, N. A.; NAWAZ, A.; MAKHDOOM, A. H. **Mitigação do estresse salino em plantas por reguladores de crescimento** (Mitigation of salt stress in plants by growth regulators). Plant Growth Regulation, v. 93, p. 93–104, 2021.

JEFFERSON, K. K. **O que leva as bactérias a produzirem biofilme?** (What drives bacteria to produce biofilm?). FEMS Microbiology Letters, v. 236, p. 163–173, 2004.

Jl, C. *et al.* **Bacillus subtilis HG-15, uma bactéria halotolerante rizoplanar, promove crescimento e tolerância à salinidade em trigo** (*Triticum aestivum*) (*Bacillus subtilis* HG-15, a Halotolerant Rhizoplane Bacterium, Promotes Growth and Salinity Tolerance in Wheat). *BioMed Research International*, v. 7, e9506227, 2022.

KANG, S. M. *et al.* **Bactérias promotoras de crescimento reduzem efeitos adversos da salinidade e estresse osmótico em *Cucumis sativus*** (Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress in *Cucumis sativus*). *Journal of Plant Interactions*, v. 9, p. 673–682, 2014.

KANG, S. M. *et al.* **Rizobactérias secretoras de giberelina modulam a fisiologia do estresse em soja sob condições de salinidade e seca** (Gibberellin secreting rhizobacterium *Pseudomonas putida* H2-3 modulates stress physiology of soybean under saline and drought conditions). *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 84, p. 115–124, 2014.

KØRUP, K. *et al.* **Mecanismos de tolerância à seca em plantas: das respostas morfológicas às moleculares** (Drought tolerance mechanisms in plants: from morphological to molecular responses). *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 40, p. 1–15, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com>. Acesso em: 10 ago. 2025.

KUMAR, A. *et al.* **Estirpe de *Bacillus pumilus* tolerante à salinidade melhora atributos de crescimento do arroz e a saúde do solo sob estresse salino** (Salt-tolerant *Bacillus pumilus* strain enhances rice growth and soil health under salinity stress). *Microbiological Research*, v. 242, e126616, 2021.

KUMARI, S.; VAISHNAV, A.; JAIN, S.; VARMA, A.; CHOUDHARY, D. K. **Tolerância à seca induzida em feijão-mungo por cepas de *Pseudomonas simiae*** (Induced drought tolerance in mung bean by *Pseudomonas simiae*). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 32, p. 4–14, 2016.

LIBARDONI, D. **Potencial dos bioinsumos na agricultura brasileira: desafios e oportunidades**. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 17, n. 3, p. 245–261, 2022. MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Programa Nacional de Bioinsumos (PNB)**. Brasília: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MENDES, G. O.; DIAS, C. S.; SILVA, I. R.; JUNIOR, J. I. R.; PEREIRA, O. L.; COSTA, M. D. **Solubilização de fosfato de rocha por fungos utilizando bagaço de cana-de-açúcar** (Fungal rock phosphate solubilization using sugarcane bagasse). *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, v. 29, p. 43–50, 2013.

MENDES, R. *et al.* **Microrganismos benéficos e bioestimulantes: sinergia no manejo agrícola sustentável**. In: ALMEIDA, L. F.; COSTA, P. H. (org.). *Biotecnologia aplicada ao agronegócio*. São Paulo: Editora Acadêmica, 2020. p. 87-110.

MENDES, R. *et al.* **Produtos baseados em microbioma para a agricultura sustentável** (Microbiome-based products for sustainable agriculture). *Annual Review of Phytopathology*, v. 58, p. 1–23, 2020.

MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. **O microbioma da rizosfera: importância de microrganismos benéficos, patogênicos de plantas e patogênicos humanos** (The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms). *FEMS Microbiology Reviews*, v. 37, p. 634–663, 2013.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Relatório de projeções climáticas para o Brasil – 2025**. Brasília, DF: MCTI, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MONTALDO, Y.; SANTOS, T. M. C. dos; SILVA, J. M. da; CRISTO, C. C. N. de; RAMALHO NETO, C. E. **Produção de biofilme bacteriano e resistência ao estresse hídrico por rizobactérias associadas à cana-de-açúcar** (*Saccharum officinarum*) (Bacterial biofilm production and water stress resistance by rhizobacteria associated to sugarcane). *Diversitas Journal*, v. 6, p. 1899–1909, 2021.

MORRIS, C. E.; MONIER, J. M. **Significado ecológico da formação de biofilme por bactérias associadas a plantas** (The ecological significance of biofilm formation by plant-associated bacteria). *Annual Review of Phytopathology*, v. 41, p. 429–453, 2003.

OLIVEIRA, C. A. de; SILVA, F. M. da; SANTOS, R. A. dos. **Políticas públicas e inovação no setor de bioinsumos no Brasil**. *Revista de Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 2, p. 105–117, 2021.

PANDA, P. K. *et al.* **Mitofagia dependente de PUMA induzida por Abrus agglutinin contribui para apoptose via geração de ceramida** (PUMA dependent mitophagy by Abrus agglutinin contributes to apoptosis through ceramide generation). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Cell Research*, v. 1865, p. 480–495, 2018.

ROSA, J. **Liberação de agrotóxicos bate recorde em 2024**. CNN Brasil, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/politica/liberacao-de-agrotoxicos-bate-recorde-em-2024/>. Acesso em: 1 set. 2025.

SANTOS, M. F. dos. **Uso cíclico de água salina em amendoim associado a rizóbio**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/72422>. Acesso em: 9 set. 2025.

SCHROEDER, L. **Lula sanciona com vetos novo marco legal de agrotóxicos**. CNN Brasil, 28 dez. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/politica/lula-sanciona-com-vetos-novo-marco-legal-de-agrotoxicos/>. Acesso em: 1 set. 2025.

SHAFFIQUE, S. *et al.* **Papel das rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR) na mitigação do estresse abiótico: perspectivas atuais** (Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in the mitigation of abiotic stress in plants: current perspectives). *Environmental and Experimental Botany*, v. 194, 104695, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SILVA, E. A. da *et al.* **Capacitação rural e adoção de tecnologias sustentáveis: estudo em propriedades familiares**. *Cadernos de Extensão Rural*, v. 12, n. 1, p. 89–102, 2019.

SILVA, J. F.; SANTOS, A. R. **Associação de microrganismos na promoção do crescimento vegetal e indução de resistência sistêmica**. *Revista Brasileira de Microbiologia Aplicada*, v. 51, n. 2, p. 112–123, 2019.

SILVA, N. F. da; CAVALCANTE, W. S. da S.; MARTINS NETO, J. G.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SILVA, L. C. de M.; ROSA, M.; CABRAL, J. S. R.; CABRAL FILHO, F. R. **Manejo do déficit hídrico em plantas de soja via aplicação de microrganismos e bioestimulantes**. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 13, e12980, 2024.

