

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E AMBIENTAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO DE CEPAS MICROBIANAS ASSOCIADAS À ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS**

MARIANA CHAVES CANDIDO

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2025

MARIANA CHAVES CANDIDO

**AVALIAÇÃO DE CEPAS MICROBIANAS ASSOCIADAS À ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
bacharel em Biotecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liliam Silvia
Candido

Co-orientador: Dr. Alison Fernando
Nogueira

DOURADOS – MS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C217a Candido, Mariana Chaves

AVALIAÇÃO DE CEPAS MICROBIANAS ASSOCIADAS À ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS [recurso eletrônico] / Mariana Chaves Candido. -- 2025.
Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Liliam Silvia Candido.

Coorientador: Alison Fernando Nogueira.

TCC (Graduação em Biotecnologia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Herbaspirillum seropedicae. 2. Zea mays L.. 3. Nitrogênio. I. Candido, Liliam Silvia.
II. Nogueira, Alison Fernando. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

MARIANA CHAVES CANDIDO

**AVALIAÇÃO DE CEPAS MICRORGANISMOS ASSOCIADAS À ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado
pela Banca Examinadora como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Biotecnologia, da Universidade Federal
da Grande Dourados.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Liliam Silvia Candido

Aprovado em: 16/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LILIAM SILVIA CANDIDO**
Data: 18/12/2025 16:53:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Liliam Silvia Candido
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ALISON FERNANDO NOGUEIRA**
Data: 18/12/2025 11:33:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alison Fernando Nogueira
Membro

Documento assinado digitalmente
 **LILIANE SCISLOWSKI RUTHES**
Data: 17/12/2025 21:07:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Liliane Scislowski Ruthes
Membro

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELA PEREIRA DE OLIVEIRA**
Data: 18/12/2025 00:18:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriela Pereira de Oliveira
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, que me permitiu realizar esse sonho e viver todos esses anos com muita saúde, que direcionou pessoas importantes durante toda a trajetória e sempre escutou todos os meus pedidos e os realizou.

Aos meus pais, apenas um agradecimento não expressa o tamanho da gratidão que sinto por vocês. Sempre estiveram presentes em cada passo dessa caminhada, seja em momentos de aflição ou momentos de alegria como esse, se orgulhando de cada conquista. Sonharam todos os meus sonhos comigo e sempre me fizeram acreditar que era possível. Ao restante da família, por todo amor, carinho e suporte dados ao longo desses anos.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Liliam Silvia Candido, por me orientar e ensinar durante a execução dessa pesquisa e por se tornar uma inspiração profissional, por me desafiar e mostrar muitas vezes capacidades desconhecidas por mim. Aos membros do Grupo de Melhoramento e Biotecnologia Vegetal que foram suporte durante a implantação e avaliação dos experimentos conduzidos em Dourados. Em particular, agradeço a Amanda Rayani Cardoso Zavala, Rayan Alexandre Lopes da Silva e Roberto do Prado Machado.

À empresa BioInput, pelo sedimento do material e parceria. Principalmente ao Dr. Alison Fernando Nogueira, por todos os ensinamentos, ajuda e por aceitar ser meu co-orientador neste trabalho.

Ao meu namorado, Nycollas Rafael Pereira Lopes, você fez o trajeto ser mais leve. As amizades que cultivei durante esses anos, tanto dentro da universidade quanto fora, vocês exerceram um papel fundamental, em especial, Giovana de Souza Damiani, Amanda Rayani Cardoso Zavala, Rayan Alexandre Lopes da Silva, Ellen Beatriz Kanofre, Ana Beatriz Neves Moreira e Pamela Sampaio Penajo.

Aqueles que se disponibilizaram a fazer parte da avaliação final desse trabalho.

E por fim, sou imensamente grata a todos que de alguma forma participaram da realização desse trabalho.

CANDIDO, Mariana Chaves. **Avaliação de cepas microbianas associadas à adubação nitrogenada na cultura do milho em diferentes condições edafoclimáticas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biotecnologia) – Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2025.

RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas de maior relevância econômica no Brasil e apresenta elevada demanda por nitrogênio (N) para alcançar altos rendimentos. Entretanto, o uso intensivo de fertilizantes minerais tem elevado os custos de produção e provocando impactos ambientais significativos. Nesse contexto, a utilização de bactérias promotoras de crescimento e fixadoras de nitrogênio, como *Herbaspirillum seropedicae*, surge como alternativa sustentável para incrementar a eficiência de uso do N e reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos. Este trabalho avaliou o efeito da inoculação de diferentes cepas de *H. seropedicae*, isoladamente ou combinadas, associadas à adubação nitrogenada, sobre o desenvolvimento e a produtividade do milho nas condições edafoclimáticas de Guarapuava e Londrina, PR, durante a safra 2024/2025. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados com oito tratamentos, incluindo testemunhas, produtos comerciais e inoculantes experimentais. Foram avaliadas características morfoagronômicas, submetidas à ANOVA e ao teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As variáveis altura da planta e inserção da primeira espiga apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos no ambiente de Londrina, enquanto em Guarapuava não foram observadas alterações expressivas. Em relação à produtividade, houve resposta diferenciada entre os locais, sendo que em Guarapuava, o tratamento denominado Bac 3, contendo duas cepas de *H. seropedicae*, apresentou o maior rendimento, superando as testemunhas e os produtos comerciais. Já em Londrina, o tratamento Bac 2 (*Azospirillum* sp. + *Herbaspirillum* sp.) destacou-se, com desempenho semelhante aos controles comerciais. Estes resultados demonstram que a resposta à inoculação depende do ambiente e do manejo de nitrogênio, mas reforçam o potencial de *Herbaspirillum seropedicae* como promotor de crescimento e contribuinte complementar na fixação de nitrogênio do milho. Assim, os inoculantes avaliados representam uma alternativa promissora para tornar os sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

Palavra-Chave: *Herbaspirillum seropedicae*, *Zea mays* L., Nitrogênio.

CANDIDO, Mariana Chaves. **Evaluation of microbial strains associated with nitrogen fertilization in corn crops under different edaphoclimatic conditions.** Final Paper (Bachelor's Degree in Biotechnology) – Faculty of Biological and Environmental Sciences, Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2025.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most economically important crops in Brazil and has a high nitrogen (N) demand to achieve elevated yields. However, the intensive use of mineral fertilizers has increased production costs and caused significant environmental impacts. In this context, the use of plant growth-promoting and nitrogen-fixing bacteria, such as *Herbaspirillum seropedicae*, emerges as a sustainable alternative to improve N use efficiency and reduce dependence on synthetic fertilizers. This study evaluated the effect of inoculating different strains of *H. seropedicae*, alone or in combination, associated with nitrogen fertilization, on maize development and yield under the edaphoclimatic conditions of Guarapuava and Londrina, Paraná, during the 2024/2025 growing season. The experiment was conducted in a randomized block design with eight treatments, including controls, commercial products, and experimental inoculants. Morphological and agronomic traits were evaluated and subjected to ANOVA and the Scott–Knott test at 5% probability. Plant height and first ear insertion showed significant differences among treatments in Londrina, while no expressive changes were observed in Guarapuava. Regarding yield, responses varied between sites: in Guarapuava, the treatment Bac 3, containing two strains of *H. seropedicae*, showed the highest yield, surpassing the controls and commercial products. In Londrina, the Bac 2 treatment (*Azospirillum* sp. + *Herbaspirillum* sp.) stood out, with performance similar to commercial standards. These results demonstrate that the response to inoculation depends on environmental conditions and nitrogen management but reinforce the potential of *Herbaspirillum seropedicae* as a plant growth promoter and complementary contributor to biological nitrogen fixation in maize. Therefore, the evaluated inoculants represent a promising alternative to make production systems more efficient and sustainable.

Keywords: *Herbaspirillum seropedicae*, *Zea mays* L., Nitrogen.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição das áreas experimentais em Guarapuava, PR (A) e Londrina, PR (B).....	30
Figura 2- Climograma durante o período do experimento em Guarapuava, PR (A, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Guarapuava) e Londrina, PR (B, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Londrina). Onde T mín; Temperatura mínima (°C), T max; Temperatura máxima (°C).	33
Figura 3 - Modelo do croqui experimental do experimento instalado em Guarapuava, PR (A) e Londrina, PR (B).	34
Figura 4 - Médias das características Altura média de plantas (AP), Altura média da inserção da primeira espiga (AIE), Comprimento médio das espigas (CE), Diâmetro médio das espigas (DE), Número de fileiras por espiga (NF), Número de grãos por fileira (NGF), Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS em milho avaliados por três diferentes tratamentos. Guarapuava, PR, Out/2025.....	42
Figura 5 - Incremento de sacas/ha obtidas em cada tratamento em relação a testemunha A. Guarapuava, PR, Out/2025.....	43
Figura 6 – Médias das características Altura média de plantas (AP), Altura média da inserção da primeira espiga (AIE), Comprimento médio das espigas (CE), Diâmetro médio das espigas (DE), Número de fileiras por espiga (NF), Número de grãos por fileira (NGF), Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS em milho avaliados por três diferentes tratamentos. Londrina, PR, Out/2025.....	46
Figura 7 - Incremento de sacas/ha obtidas em cada tratamento em relação a testemunha A. Londrina, PR, Out/2025.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental em Guarapuava, PR e Londrina, PR, 2024.....	31
Tabela 2 - Tratamentos utilizados no experimento.....	33
Tabela 3 - Estimativas dos quadrados médios, médias e coeficientes de variação de nove caracteres, sendo eles, altura da planta (cm), altura da inserção da primeira espiga (cm), comprimento da espiga (cm), diâmetro da espiga (mm), número de fileiras (uni), número de grãos por fileira (uni), peso de mil grãos (g), produtividade (Kg.ha^{-1}) e sacas (sacas.ha). Guarapuava, PR, Out/2025. Londrina, PR, Out/2025.....	39
Tabela 4 - Resumo da Análise de variância conjunta de três componentes de produção avaliados em milho sob diferentes níveis de adubação de N e inoculações.	48
Tabela 5 - Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS avaliados em milho sob diferentes níveis de adubação de N e inoculações. Guarapuava, PR, Out/2025 (Gua) e Londrina, PR, Out/2025 (Lon).....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 HIPÓTESES ESTATÍSTICAS	14
4 REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1 Cultura do milho: Centro de origem, diversidade e morfologia.....	15
4.2 Importância socioeconômica e produtividade da cultura do milho	18
4.3 Fatores abióticos que afetam a cultura do milho	19
4.4 O nitrogênio e sua importância no desenvolvimento das plantas de milho	21
4.5 Preparo do solo e manejo de N.....	24
4.6 Bactérias promotoras de crescimento em plantas e fixadoras de N	25
4.6.1 <i>Herbaspirillum seropedicae</i>	27
4.6.2 Adubação nitrogenada associada com <i>Herbaspirillum seropedicae</i> em milho	28
5 MATERIAL E MÉTODOS	30
5.1 Caracterização dos locais de estudo	30
5.2 Tratamentos em avaliação	33
5.3 Preparo do inoculante	33
5.4 Delineamento experimental.....	34
5.5 Características avaliadas	35
5.6 Análises estatísticas.....	36
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Análise de variância	38
6.2 Teste de média	40
6.2.1 Guarapuava	40
6.2.2 Londrina.....	44
6.3 Interação Tratamentos X Ambientes para produtividade	48

7 CONCLUSÕES	52
8 REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é originário do México, seu ancestral silvestre, o teosinto (*Z. mays parviglumis*), era restrito ao vale do rio Balsas. Atualmente, o grão é amplamente utilizado como ingrediente principal em rações para suínos e aves (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). O milho se caracteriza por ser destinado tanto para o consumo humano quanto na alimentação de animais, como aves, bovinos e suínos (DUARTE, 2021). O Brasil ocupa a posição de terceiro maior produtor mundial (USDA, 2025), com produção total de 135 milhões de toneladas (2024/25), sendo 11% da produção global. O estado do Paraná é o segundo maior produtor de milho do Brasil, sendo responsável por 20.197,3 mil toneladas (CONAB, 2025).

Globalmente, a produção de milho mais do que dobrou nas últimas décadas, sustentada por ganhos de produtividade e expansão da área cultivada, isso só foi possível devido ao melhoramento genético, técnicas de manejo de culturas e ao uso de fertilizantes (ERENSTEIN et al., 2022; ZHANG et al., 2024). O milho, juntamente com a soja e cana-de-açúcar respondem por mais de 73% do consumo de fertilizantes no Brasil, segundo o Plano Nacional de Fertilizantes, (2022). Contudo, o uso excessivo e o manejo inadequado do solo são os principais agentes de degradação das áreas agrícolas, tornando o sistema produtivo insustentável, que já levou a graves problemas ambientais como, eutrofização de ambientes aquáticos, acidificação do solo e poluição do ar (PAIVA, 2011; BAVEYE, 2015; ZHANG et al., 2024).

O nitrogênio (N) é reconhecido como o macronutriente mais demandado pelas plantas, exigido em maior quantidade particularmente em culturas de alto rendimento, como o milho, influenciando diretamente a sua produtividade, porém é o que mais eleva o custo da produção (THANT et al., 2024). O nitrogênio, presente ou adicionado ao solo, está sujeito a diversas mudanças ou transformações, já que apenas 5% está na forma mineral assimilável pela planta, principalmente em forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) (RAIJ, 2011). No entanto, mesmo com adubação, a eficiência de uso do N pela planta pode ser baixa, porque grande parte do N aplicado ou mineralizado pode se perder do sistema por processos como lixiviação, volatilização de amônia, desnitrificação

ou imobilização no solo especialmente em solos tropicais, com manejo inadequado ou manejo intensivo (PAGLIARINI et al., 2023).

Tendo em vista os declínios ambientais em decorrência do uso descontrolado de fertilizantes químicos e a ampla necessidade de nitrogênio da cultura do milho, a aplicação de inoculantes microbianos surge como uma forma alternativa sustentável em relação ao uso de fertilizantes químicos tradicionais. Estes biofertilizantes, de baixo custo e fontes renováveis de nutrientes, oferecem uma solução viável para a agricultura e contribuem para a redução dos custos de produção (GOMES et al., 2011; SOUZA et al., 2015).

A *Herbaspirillum seropedicae* é uma bactéria aeróbica, endofítica e que pertence ao grupo das diazotróficas associativas, amplamente reconhecida por seu papel como promotor de crescimento vegetal e fixação biológica de nitrogênio (FBN). Em geral, a relevância agronômica de *Herbaspirillum seropedicae* está na combinação entre seu potencial fixador de nitrogênio e sua capacidade de atuar como promotora de crescimento, tornando-a um dos principais agentes biológicos estudados para o desenvolvimento de inoculantes aplicados à cultura do milho (PEDROSA et al., 2011; BALDANI et al., 1986; BALDANI; BALDANI, 2005).

Diante desta realidade, a utilização de inoculantes microbianos associada a adubação é um caminho alternativo e ecologicamente sustentável, para a diminuição do uso de fertilizantes químicos tradicionais, com baixo custo e fontes renováveis de nutrientes, oferecem uma solução viável para a agricultura, contribuindo para a redução dos custos de produção (GOMES et al., 2011; SOUZA et al., 2015)

2 OBJETIVOS

- 1) Avaliar se a inoculação com *Herbaspirillum seropedicae*, isolada ou combinada com *Azospirillum sp.*, associada à adubação nitrogenada, influencia o crescimento, a fixação de nitrogênio e a produtividade do milho em condições de campo.
- 2) A inoculação com *H. seropedicae* e a combinação com *Azospirillum sp.* promove alterações significativas no crescimento, aumenta a contribuição da FBN e pode manter ou aumentar a produtividade do milho, permitindo reduzir a dose de N mineral, com respostas dependentes do ambiente.

3 HIPÓTESES ESTATÍSTICAS

- 1) Hipótese Nula (H_0):

A inoculação com *Herbaspirillum seropedicae*, isolada ou combinada com *Azospirillum sp.*, associada à adubação nitrogenada, não promove alterações significativas no crescimento, no desenvolvimento, na fixação de nitrogênio e na produtividade do milho, nos ambientes de Guarapuava e Londrina, PR, em comparação aos tratamentos controle e testemunhas.

- 2) Hipótese Alternativa (H_1):

A inoculação com *H. seropedicae* e a combinação com *Azospirillum sp.*, associada à adubação nitrogenada, promove alterações significativas no crescimento, desenvolvimento, fixação de nitrogênio e produtividade do milho, e essa resposta pode variar entre os ambientes de Guarapuava e Londrina, PR.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cultura do milho: Centro de origem, diversidade e morfologia

O milho (*Zea mays L.*) é uma gramínea que inicialmente foi registrada em 1492, por Colombo, na costa norte de Cuba. Porém, de acordo com evidências arqueológicas, o milho é mais antigo no México. Seu ancestral silvestre, o teosinto (*Zea mays ssp. parviglumis*), era encontrado principalmente na região do vale do rio Balsas. A espécie vem sendo explorada desde os primórdios da agricultura, processo que culminou em sua domesticação e o transformou em uma das culturas agrícolas mais importantes para as civilizações antigas e atuais (BORÉM et al., 2015).

O melhoramento do milho ocorreu por meio da domesticação e da seleção de plantas originalmente selvagens, com o intuito de adaptar a espécie as demandas humanas. A cultura passou a depender dos cuidados humanos, pois os processos de cultivo tornaram-se mais complexos, a começar pelo preparo de solo, controle, competição e fotoperíodo. No Brasil, em meados de 1500 foram feitas as primeiras descrições de domesticação, na qual os relatos indicavam que o milho era composto por grãos brancos e duros, mas, sendo comumente encontrados amarelo claro, roxo e vermelhos. No Paraguai, na Colômbia e na Venezuela, as descrições são do cultivo de milho branco e milho-pipoca, milho-doce e milho pipoca pontudo, respectivamente, isso em meados de 1700, período em que também foram relatados, nos Estados Unidos sobre o milho-doce (SMITH et al., 2004).

Além de possuir um centro de origem bem definido, o milho destaca-se pela ampla diversidade genética e fenotípica acumulada ao longo de milhares de anos de domesticação e dispersão (PIPERNO & FLANNERY, 2001). Essa diversidade é resultado da seleção humana, do fluxo gênico contínuo entre variedades tradicionais e do próprio processo evolutivo. Existem centenas de raças locais de milho, cada uma adaptada a condições ambientais específicas, apresentando variações quanto ao ciclo, porte, formato e cor dos grãos, tipo de espiga e tolerância a estresses bióticos e abióticos. Atualmente, essa diversidade é complementada por programas de melhoramento que exploram grupos heteróticos, híbridos comerciais e materiais transgênicos, ampliando

ainda mais o conjunto de características disponíveis para diferentes sistemas de produção (HALLAUER et al., 2010).

O desenvolvimento da planta de milho é dividido em dois estádios principais: vegetativo (V) e reprodutivo (R). O estágio vegetativo no milho inicia-se pela germinação e emergência (estádio VE), momento em que ocorre o surgimento e abertura das folhas cotiledonares. No estágio V1, observa-se a abertura da primeira folha, assim, de V1 a Vn ocorre o desenvolvimento progressivo das folhas, acompanhado pela exposição das lígulas. Dessa forma, a numeração dos estádios aumenta conforme novas folhas emergem (BORÉM et al., 2015; MAGALHÃES & DURÕES, 2006).

Já o estágio reprodutivo do milho tem início com a aparição da inflorescência masculina, caracterizando a fase final vegetativa (VT). O estágio R1 é iniciado quando os estilos-estigmas estão visíveis, para fora das espigas (embonecamento). A polinização ocorre quando o grão de pólen liberado atinge um dos estilos-estigmas. Em R2, os estilos-estigmas escurecem e inicia-se o enchimento de grãos, que prossegue dos estádios R3 a R6, onde o estágio R6 considerado como a fase de maturidade fisiológica (MAGALHÃES & DURÕES, 2006).

O milho é uma planta monocotiledônea e monoica, pertencente à família Poaceae, ou seja, possui apenas uma folha embrionária dentro da semente e as flores femininas (espigas) e masculinas (pendão) estão presentes na mesma planta, mas em estruturas separadas. Morfologicamente é dividido em duas partes principais, uma caracterizada por apresentar colmo ereto, folhas alternadas e as inflorescências e outra área formada pelo sistema radicular (BORÉM et al., 2015; MAGALHÃES & DURÕES, 2006).

O colmo desempenha um papel essencial ao fornecer suporte às demais partes da planta que se encontram acima do solo. Formado por nós e entrenós e é responsável não só em sustentar as folhas e a espiga, como também para o armazenamento. A altura final da planta é dada pela elongação de seus internódios, altura essa que varia de acordo com o número de nós e o comprimento dos entrenós. Dessa forma, a altura das plantas de milho pode oscilar de cerca de um metro, em linhagens específicas, até quatro metros em híbridos mais antigos de maior porte. O colmo apresenta diâmetro entre 15 e 80

mm, diminuindo progressivamente ao se aproximar do ápice (BORÉM et al., 2015; MAGALHÃES & DURÕES, 2006).

As folhas são alternadas, lanceoladas, lisas e possuem cerosidade, podendo estar posicionadas horizontal ou verticalmente em relação ao colmo, possuem lâmina foliar alongada, bainha que envolve parcialmente o colmo e lígula, localizada na junção entre a bainha. Elas emergem em cada nó do caule do milho, onde normalmente tem-se entre 10 e 25 folhas por planta. O desenvolvimento das folhas é determinado no estágio V3 e completa-se no estágio V5. A folha mais alta, conhecida como folha bandeira, serve como ponto de referência para a medição da altura da planta (KIESSELBACH, 1949).

Entre os estádios V4 e V8 ocorre um dos períodos mais críticos do desenvolvimento do milho. Nessa fase, inicia-se a rápida expansão da área foliar e intensifica-se a taxa de crescimento vegetativo, etapa em que grande parte do potencial produtivo da cultura é definida. Esse intervalo corresponde ao momento em que o milho apresenta sua maior demanda inicial por nitrogênio (N), devido à elevada síntese proteica, formação dos primórdios reprodutivos e intenso acúmulo de biomassa. A adequada disponibilidade de N nesses estádios é essencial para garantir um dossel foliar vigoroso, maior taxa fotossintética e, conseqüentemente, maior potencial de rendimento, especialmente em híbridos de alto desempenho (SILVA et al., 2017; SONG et al., 2023).

O sistema radicular é fasciculado, composto por radícula, raízes primárias e adventícias. A radícula é a estrutura responsável pelo estabelecimento inicial, seu crescimento inicia-se diretamente da semente. O sistema radicular secundário se desenvolve no estágio V6, entre o 4º e o 6º nós abaixo da superfície do solo, a partir disso torna-se o principal responsável pela nutrição, já as raízes adventícias se originam dos nós basais do colmo, desenvolvem-se no final do ciclo vegetativo carregam a responsabilidade de sustentação (BORÉM et al., 2015; KIESSELBACH, 1949).

Na parte superior da planta localiza-se o pendão, que é constituído por uma haste central e suas ramificações. Essas ramificações são formadas por espiguetas, onde encontra-se duas flores, cada uma com três anteras, que posteriormente liberam os grãos de pólen (ANDERSON, 1951).

Na planta de milho a espiga é considerada um ramo lateral modificado e é composta por sabugo, grãos e palha. Ao longo do sabugo, encontra-se pares

de espiguetas que irão originar os grãos. Cada óvulo possui um estilo-estigma que quando evidente facilita a fertilização. Por fim, o grão do milho é do tipo cariopse, o peso varia de 0,25g a 0,3g. Pode ser dividido em quatro porções distintas: pedicelo, pericarpo, embrião e endosperma, sendo composto principalmente por amido (72%), proteínas (8 a 10%) e óleo (5%) (TAIZ et al., 2017).

4.2 Importância socioeconômica e produtividade da cultura do milho

A cultura do milho é uma das commodities de maior relevância no cenário agrícola global, destacando-se como um dos cereais mais importantes para a alimentação humana, animal e para diversos usos industriais. O milho é amplamente empregado como ingrediente principal de nutrição em rações para animais monogástricos, tendo sua demanda fortemente associada à expansão da produção de suínos e aves, (TANUMIHARDJO et al., 2020).

Sua principal utilização é como forma de energia, pois, seus grãos são formados por amido, porém, também é amplamente empregado como matéria-prima em diversos segmentos e produtos, com diversas formas de uso diretos e indiretos. O milho se consolida como uma espécie indispensável para a humanidade, pois indiretamente são inúmeros alimentos que apresentam esse grão na composição e aproximadamente 15% da produção mundial é destinada ao consumo direto (BORÉM et al., 2015).

As fases de crescimento e desenvolvimento das plantas de milho são condicionadas por fatores climáticos e ambientais, como a disponibilidade de água, temperatura e luminosidade. Como forma de atingir a expressão máximo de produção, a cultura do milho deve receber condições climáticas adequadas, em especial, manutenção de temperatura, boas condições de precipitação e fotoperíodo favorável para o desenvolvimento. Esses fatores combinados são de extrema importância para a otimização da produtividade do milho (CRUZ et al., 2006).

A época de plantio é realizada em função dos fatores citados anteriormente, onde os limites extremos variam em cada região agroclimática. No Brasil, o milho é cultivado ao longo de todo o ano e sua classificação é feita com base na época de plantio, assim, a primeira época é denominada milho

“safra”, com semeaduras realizadas entre setembro e novembro, variando entre regiões. O milho “safrinha” é a segunda época, semeado de janeiro a abril, após a cultura de verão, no qual refere-se ao milho de sequeiro. O plantio fora de época resulta em redução no ciclo da cultura e no rendimento de grãos e em relação ao milho safrinha, quanto mais tarde for o plantio, maior o risco de perdas por seca e/ou geadas (CRUZ et al., 2006).

De acordo com relatório publicado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em 2025, o consumo mundial de milho foi de 1,23 bilhão de toneladas para a safra 2024/2025. Neste cenário, o Brasil ocupa a posição de terceiro maior produtor mundial (USDA, 2025), com produção total de 135 milhões de toneladas (2024/25), sendo 11% da produção global, ficando atrás dos Estados Unidos, com produção total de 377,63 milhões de toneladas, 31% da produção global e China, com 294,92 milhões de toneladas, sendo 24% da produção global. Em nível nacional, o Mato Grosso é o maior produtor, sendo responsável pela produção de 55.103,3 mil toneladas, em seguida o Paraná com produção de 20.197,3 mil toneladas e em terceiro lugar, Goiás com 14.266,2 mil toneladas, (CONAB, 2025).

4.3 Fatores abióticos que afetam a cultura do milho

As plantas estão sujeitas a diversos tipos de estresse ao longo do seu desenvolvimento, os quais podem ser classificados como bióticos e abióticos. Na natureza, as plantas vivem em diversos ambientes complexos nos quais interagem com uma grande diversidade de organismos, tais interações são denominadas bióticas, pois estão ligadas ao sistema de defesa das plantas contra ataques de pragas e patógenos. Porém, as plantas também crescem e se reproduzem em meio a fatores adversos, que contêm uma multiplicidade de fatores abióticos, químicos e físicos, que variam conforme o tempo e a localização geográfica e afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas, reduzindo o potencial produtivo da cultura agrícola (TAIZ et al., 2017).

O vento é um fator abiótico que pode tanto beneficiar quanto prejudicar as plantas. No caso do milho, ele é essencial para a polinização, pois favorece a dispersão do pólen. No entanto, quando ocorre em intensidade excessiva ou associado a outros fatores desfavoráveis pode causar danos à cultura, como a

redução da produção de grãos e da biomassa. Essas condições ambientais adversas, que submetem o organismo a um estado de tensão, são denominadas estresse, podendo provocar alterações morfológicas e fisiológicas que, em alguns casos, resultam em prejuízos ao desenvolvimento da planta. (EMBRAPA, 2015).

Os principais estresses abióticos que influenciam no desenvolvimento do milho, são luz, falta ou excesso de água, conteúdo e disponibilidade de nutrientes no solo e temperatura extrema (calor e frio) (TAIZ et al., 2017). Esses fatores representam grandes desafios para a agricultura, tendo em vista que afetam os processos fisiológicos, como o ciclo da fotossíntese e a absorção de água e nutrientes (ZILLI et al., 2020).

Atualmente as mudanças climáticas tem transformado padrões de precipitações e temperaturas, que podem causar impactos devastadores sobre seres humanos, infraestrutura ou meio ambiente. Além disso, os efeitos das mudanças climáticas sobre os estresses abióticos não se limitam apenas à disponibilidade de água, mas também influenciam diretamente a fertilidade do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas. A influência das condições térmicas no milho ocorre em todo o ciclo fenológico, da germinação ao estágio de maturação, sendo que a intensidade desse efeito varia em conformidade com a fase da cultura. Temperaturas mais elevadas intensificam o estresse hídrico, aceleram o desenvolvimento das culturas e aumentam a variabilidade e o risco de perdas de produtividade. O florescimento do milho, por exemplo, ocorre mais rapidamente com temperaturas próximas de 25 graus, retardando à medida que a temperatura diminui. (MEDEIROS et al., 2022; REZAEI et al., 2023; PEREIRA FILHO & CRUZ, 1993).

Já a irregularidade das chuvas pode alterar a dinâmica do solo, reduzindo a umidade e comprometendo a atividade microbiana essencial. A falta de água no solo, constitui o principal fator de redução no rendimento das lavouras de milho. Em situações de cultivo de sequeiro, quando as chuvas são incertas, o risco de perdas é ainda maior, especialmente quando a deficiência hídrica ocorre durante a fase reprodutiva da cultura, período em que o milho é mais sensível ao estresse (MEDEIROS et al., 2022; REZAEI et al., 2023; PEREIRA FILHO & CRUZ, 1993).

Os estresses ambientais causam danos severos para o crescimento do milho, eles rompem ou alteram muitos processos fisiológicos vegetais, afetando a estabilidade de proteínas ou do RNA, o transporte iônico, o acoplamento de reações ou outras funções celulares. Tendo em vista que no campo as plantas estão sujeitas simultaneamente a uma combinação de estresses abióticos distintos, elas desenvolveram mecanismos coordenados para tolerar estresses abióticos, envolvendo sistemas de percepção, sinalização e respostas, auxiliando na minimização de danos celulares, garantindo a homeostase fisiológica, (TAIZ et al., 2017).

Os mecanismos iniciais sensores de estresse desencadeiam respostas que compreendem rotas de transdução de sinais. Uma onda autopropagante de produção de EROs alerta partes da planta até então não estressadas sobre a necessidade de uma resposta, a sinalização por cálcio (Ca^{2+}) ocorre por meio de um canal de cálcio que é sensível às alterações na temperatura e necessário para a aclimação ao estresse pelo calor, existem também sensores derivados de hormônios, como exemplo ácido abscísico (ABA), além de rotas que envolvem proteínas quinases, proteínas fosfatase, ativação de reguladores de transcrição, acumulação de hormônios vegetais, dentre outros, (TAIZ et al., 2017).

Outro importante mecanismo de percepção e resposta ao estresse envolve alterações epigenéticas, como a metilação do DNA e as modificações em histonas, que podem regular a expressão gênica sem alterar a sequência do DNA. Tais alterações, são responsáveis por regular a expressão gênica sem modificar a sequência de DNA, assim, é possível que as plantas produzam respostas de forma mais rápida e eficiente quando expostas novamente às mesmas condições adversas, (ZHANG et al., 2022).

4.4 O nitrogênio e sua importância no desenvolvimento das plantas de milho

No solo, o nitrogênio (N) encontra-se em sua maior parte na forma orgânica (95%), não assimilável pela planta, e somente 5% na forma mineral assimilável especialmente na forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+). As formas inorgânicas apresentadas derivam da transformação biológica do nitrogênio

orgânico. Essa transformação é denominada mineralização, que compreende os processos de amonização, amonificação e nitrificação (PAIVA, 2011; RAIJ, 2011).

O nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+) exercem funções fisiológicas contrastantes no metabolismo vegetal. Por ser uma forma oxidada, o nitrato, é convertido em uma forma mais energética (mais reduzida), o nitrito (NO_2^-), posteriormente, em uma forma ainda mais energética (mais reduzida ainda), o amônio (NH_4^+), e finalmente em nitrogênio amida da glutamina, processo que ocorre no citosol e principalmente nos cloroplastos, demandando elevado consumo de energia na forma de NADH e ferredoxina reduzida. Como a assimilação do NO_3^- , exige elevado gasto energético, ocorre um aumento tanto na fotossíntese quanto na respiração para produzir os equivalentes redutores exigidos. Em decorrência desses ajustes metabólicos ocorre um estímulo no crescimento radicular, favorecendo a expansão e a exploração mais eficiente do solo (TAIZ et al., 2017). Além disso, o nitrato também atua como molécula sinalizadora, regulando a expressão de genes associados ao metabolismo de nitrogênio e o desenvolvimento radicular, interferindo no número e diâmetro das raízes (MARSCHNER, 2012).

Em condições favoráveis, a predominância do NO_3^- aumenta devido à sua mobilidade e rápida transformação, porém essa mesma mobilidade torna o nitrato altamente suscetível à lixiviação e à desnitrificação, especialmente em solos úmidos ou compactados, acarretando perdas significativas (CANTARELLA, 2007).

Já o processo de assimilação do amônio (NH_4^+) é energeticamente mais eficiente, pois é uma forma reduzida do nitrogênio, porém a absorção exclusiva de NH_4^+ pode causar desequilíbrios metabólicos, como acidificação do apoplasto, inibição do crescimento radicular e redução da absorção de cátions essenciais, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , sendo também tóxico se acumulado em níveis elevados nos tecidos vivos. Entretanto, quando fornecido em proporções equilibradas, juntamente com NO_3^- aumenta a eficiência de uso de N, acelerando a incorporação, tornando evidente que a combinação é fundamental para o desempenho da cultura de milho (TAIZ et al., 2017; MARSCHNER, 2012).

O nitrogênio entre os nutrientes é o exigido em maior quantidade, influenciando diretamente a produtividade do milho, porém é o que mais eleva o custo da produção. Além do efeito sob a produtividade, outras características da planta relacionadas ao seu desenvolvimento também são influenciadas pelo N, como o aumento da taxa de fotossíntese pela expansão da área foliar, a altura da planta, produção de biomassa e pode também influencia indiretamente a nutrição da planta, havendo maior absorção de outros nutrientes. Sendo assim, desempenha um papel crucial no desenvolvimento das plantas de milho, onde encontra-se como um elemento central em moléculas estruturais e metabólicas (KAPPES et al., 2013; PAIVA, 2011).

O N é o principal constituinte de proteínas, ácidos nucleicos, fosfolipídios, clorofila, hormônios, vitaminas e alcaloides, e participa de todas as fases de crescimento e desenvolvimento vegetal, por isso quando há deficiência de N o crescimento vegetal é rapidamente inibido. Se a carência persiste, é possível observar na maioria das espécies o amarelecimento das folhas, principalmente nas folhas mais velhas, aquelas localizadas mais próximas à base da planta, característica chamada de clorose. As folhas mais jovens podem não apresentar sintomas iniciais, uma vez que o nitrogênio pode ser remobilizado das folhas mais velhas para sustentar seu crescimento (WANG et al., 2024; TAIZ et al., 2017).

Dessa forma, é possível compreender que o nitrogênio é essencial tanto nos processos metabólicos da cultura do milho, quanto para a formação do potencial produtivo. Para que tenha impacto direto e eficiente sobre o crescimento e desenvolvimento vegetativo é necessário um suprimento adequado e planejado ao longo dos ciclos (TAIZ et al., 2017; FAGERIA; BALIGAR, 2005).

Em solos que são bem estruturados, ou seja, cheios de matéria orgânica e com elevado nível de atividades microbiana, a tendência de liberação do nitrogênio é maior. Porém, na maioria das vezes a taxa natural de disponibilidade do nutriente no solo não atende as necessidades da cultura do milho, tornando fundamental o uso de estratégias de manejo para garantir suprimento contínuo ao longo do ciclo (TAIZ et al., 2017; FAGERIA & BALIGAR, 2005).

4.5 Manejo do nitrogênio para a cultura do milho

O manejo intensivo e inadequado do solo é o principal agente de degradação das áreas agrícolas, tornando o sistema produtivo insustentável. A adoção de sistemas racionais de manejo do solo é responsável pela definição de práticas capazes de reduzir a degradação do solo e promover a manutenção ou o aumento da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, consequentemente (PAIVA, 2011).

Os diferentes sistemas de manejo provocam alterações na densidade e porosidade do solo, influenciando no armazenamento de água. A intensidade das alterações no solo varia de acordo com alguns fatores, sendo eles, o tempo de uso do sistema de manejo, o tipo de solo e o clima da região, pois cada um desses fatores influencia diretamente a forma como o solo responde às práticas agrícolas, portanto, essas práticas conservacionistas tem como objetivo o aumento da capacidade produtiva da terra (FANCELLI & NETO, 2004; PAIVA, 2011).

As práticas de manejo do solo interferem, diretamente a dinâmica do nitrogênio mineralizável e as vias de perda, implicando na quantidade efetivamente disponível para o uso das plantas. A adoção de práticas adequadas de manejo do solo é um componente importante para melhorar a eficiência do uso de nitrogênio (EUN), reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade das culturas, tendo em vista que, o milho é uma das culturas que mais responde à adubação nitrogenada (FAGERIA & BALIGAR, 2005; LOPES & FARIAS, 1995).

No sistema de preparo convencional, existe a mobilidade do solo, por conta da aração e gradagens, esse processo é responsável por expor a matéria orgânica ao contato com o oxigênio, ação que favorece a atividade microbiana. A decomposição dos resíduos vegetais e a mineralização do nitrogênio orgânico é acelerado por meio dessa prática, que como visto é essencial para a disponibilidade de N, mas também aumenta os riscos de perda por lixiviação e volatilização, quando a ureia é utilizada erroneamente. Além disso, esse revolvimento diminui a matéria orgânica, resultado que prejudica a estrutura e aumenta os riscos para erosão, reduzindo a retenção de água, ciclagem de nutrientes e o aproveitamento de N. Dessa maneira, sistemas com preparo

intensivo perdem produtividade ao longo do tempo, isso por conta da qualidade do solo, (BORÉM et al., 2015; FIGUEIREDO et al., 2024).

Em contrapartida, o plantio direto é caracterizado por não apresentar revolvimento do solo e pelo uso de palhada na superfície, que traz benefícios a qualidade física, química e biológica do solo. O uso de plantas de cobertura tem como um dos principais objetivos a manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo, visando incrementar a disponibilidade de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg e S, refletindo na melhoria da fertilidade do solo e possibilidade de redução no uso de fertilizantes nitrogenados (FIGUEIREDO et al., 2024; CRUZ et al., 2006).

Para o milho cultivado em sequeiro não se recomenda a adubação com nitrogênio, por conta dos riscos de perda de produção agrícola pela falta e irregularidade de chuvas, devido, à grande probabilidade de perdas de nitrogênio por lixiviação e volatilização e à falta de resposta da cultura à adubação nesse caso. Por esse fato, nos plantios de milho que se tem a necessidade de irrigação por aspersão convencional ou pivô central, é indicado o plantio direto (LOPES & FARIAS, 1995).

É notório que, no Brasil, grande parte dos sistemas agrícolas praticados tem resultado na redução da matéria orgânica do solo, isso tanto pela tendência natural por serem solos originados de vegetações florestal, quanto, principalmente, por manejos inadequados. Solos com manejos inadequados, tendem a apresentar baixa produtividade e menor eficiência de uso de nutrientes, incluindo o nitrogênio, devido à menor ciclagem e maior suscetibilidade a perdas (RAIJ, 2011).

Assim, tendo em vista a realidade, a aplicação de inoculantes microbianos surge como uma forma alternativa sustentável em relação ao uso de fertilizantes químicos tradicionais. Estes biofertilizantes, de baixo custo e fontes renováveis de nutrientes, oferecem uma solução viável para a agricultura e contribuem para a redução dos custos de produção, (GOMES et al., 2011; SOUZA et al., 2015).

4.6 Bactérias promotoras de crescimento em plantas e fixadoras de N

A rizosfera destaca-se por conta do ecossistema complexo, pois, seu microbioma está diretamente relacionado aos fatores bióticos e abióticos, incluindo variáveis ambientais, propriedades físico-químicas do solo e atividades

biológicas das plantas. Sua composição altamente dinâmica com abundância e diversidade de população microbiana, interagem com o sistema radicular em equilíbrio influenciando significativamente as propriedades biológicas, físicas e químicas do solo (HALDAR & SENGUPTA, 2015).

Em ecossistemas naturais ou manejados, as bactérias benéficas às plantas desempenham um papel crucial na promoção do crescimento vegetal. As bactérias promotoras de crescimento, atuam por meio da produção de compostos, como antibióticos naturais, permitindo com que as bactérias benéficas inibam a ação de patógenos e diminuam a competição com outros microrganismos. Isso favorece o estabelecimento na superfície e ao redor das raízes das plantas, contribuindo para a interação entre bactéria e planta (COMPANT et al., 2009).

As bactérias fixadoras de N são de extrema importância, pois atuam na conversão do nitrogênio em amônia, por meio de processos metabólicos deixando o nutriente na forma disponível para as plantas absorverem e assimilarem, (SOUZA et al., 2021). Pode-se reconhecer três grupos de bactérias fixadoras de nitrogênio, sendo eles diazotrofos de vida livre, que fixam o nitrogênio para seu próprio uso; diazotrofos associativos, que contribuem para o crescimento da planta sem a formação de estruturas diferenciadas, não estabelecendo uma simbiose e os diazotrofos simbióticos, que estabelecem uma interação muito estreita entre o macro e microsimbionte, e em alguns casos, são formadas estruturas diferenciadas denominadas nódulos (MARIN et al., 1999).

As bactérias diazotróficas endofíticas destacam-se por sua capacidade de estabelecer associações benéficas com plantas cultivadas, especialmente gramíneas como trigo, arroz e milho. Entre elas, espécies como *Azospirillum brasilense*, *Gluconacetobacter diazotrophicus* e *Herbaspirillum seropedicae* são reconhecidas pela habilidade de colonizar tecidos vegetais internos e atuar tanto na fixação biológica de nitrogênio quanto na promoção do crescimento vegetal, (PEDROSA et al., 2011; BALDANI et al., 1986).

4.6.1 *Herbaspirillum seropedicae*

A primeira bactéria fixadora de nitrogênio com características endofíticas foi isolada em 1984 a partir da rizosfera, de raízes lavadas e de raízes superficialmente esterilizadas de plantas de milho, sorgo e arroz. Inicialmente, esse microrganismo foi classificado como *Azospirillum seropedicae* (BALDANI et al., 1984). Contudo, apesar de apresentar semelhanças morfológicas e fisiológicas com o gênero *Azospirillum*, análises de homologia DNA:DNA demonstraram que se tratava de um grupo distinto, o que levou à criação de um novo gênero, *Herbaspirillum*. Dessa forma, a espécie foi reclassificada e passou a ser denominada *Herbaspirillum seropedicae* (BALDANI et al., 1986; BALDANI; BALDANI, 2005).

Herbaspirillum seropedicae é uma bactéria aeróbica, endofítica e que pertence ao grupo das diazotróficas associativas, amplamente reconhecida por seu papel como promotor de crescimento vegetal e fixação biológica de nitrogênio (FBN). A característica mais marcante dessa espécie é a capacidade elevada de colonização em gramíneas de interesse agrícola, incluindo o milho, instalando-se raízes, colmos e em menor proporção nos tecidos foliares, formando uma interação de mutualismo estável (PEDROSA et al., 2011; BALDANI et al., 1986; BALDANI; BALDANI, 2005).

A eficiência de *H. seropedicae* na fixação de nitrogênio está diretamente relacionada com a ativação e expressão dos genes *nif*, responsáveis pela nitrogenase, principal enzima no processo de redução do N₂ atmosférico em amônio. Sua atividade atua em condições de baixa disponibilidade de nitrogênio mineral e oxigênio (PEDROSA et al., 2011). Além de sua contribuição para o suprimento de nitrogênio, essa bactéria atua como promotora de crescimento, estimulando o desenvolvimento radicular, aumentando o vigor inicial e podendo refletir em incrementos na produtividade (PEDROSA et al., 2011; BALDANI et al., 1986).

Os mecanismos de promoção de crescimento vegetal que envolvem a atuação de *H. seropedicae* incluem a produção de fitormônios como auxinas (AIA), estímulo ao alongamento radicular, aumento da absorção de nutrientes e modulação de respostas ao estresse hídrico e nutricional (BRUSAMARELLO-SANTOS et al., 2019). No milho, esses efeitos podem se refletir no maior vigor

inicial, incremento da biomassa radicular e aérea, melhor arquitetura da planta e, conseqüentemente, ganhos diretos em produtividade, especialmente quando associados a condições de estresse ou baixa disponibilidade de N (VAN DEYNZE et al. 2018).

Em geral, a relevância agrônômica de *H. seropedicae* está na combinação entre seu potencial fixador de nitrogênio e sua capacidade de atuar como promotora de crescimento, tornando-a um dos principais agentes biológicos estudados para o desenvolvimento de inoculantes aplicados à cultura do milho.

4.6.2 Adubação nitrogenada associada com *Herbaspirillum seropedicae* em milho

A integração entre a adubação nitrogenada e a inoculação com *Herbaspirillum seropedicae* tem sido amplamente estudada como alternativa para melhorar a eficiência do uso do nitrogênio na cultura do milho e promover crescimento vegetal mais robusto, além de, se mostrar uma estratégia promissora para reduzir o uso de fertilizantes minerais. A integração entre a inoculação com *Herbaspirillum seropedicae* e o uso de doses reduzidas de nitrogênio mineral tem demonstrado potencial para aumentar a eficiência de aproveitamento do fertilizante e diminuir as perdas de N no sistema solo-planta (SPOLAOR et al., 2016; BREDA et al., 2016; BREDA et al., 2019).

A associação promove sinergia entre o nitrogênio aplicado ao solo e os mecanismos biológicos ativados pela bactéria, isso ocorre de forma que, enquanto o fertilizante é responsável por fornecer disponibilidade de nitrogênio para o metabolismo inicial do milho, a bactéria atua de forma a estimular a fixação desse nutriente, aumentando a disponibilidade contínua de nitrogênio, ou seja mesmo depois que parte do fertilizante já foi perdido ou consumido, a planta ainda recebe nitrogênio via atividade microbiana ao longo do ciclo. Essa interação também favorece maior crescimento radicular e maior produção de hormônios fitotrópicos, como auxinas, que intensificam a absorção de nutrientes e água (SPOLAOR et al., 2016; BREDA et al., 2016; BREDA et al., 2019).

Estudos já comprovam que o efeito bioestimulatório inicial de *H. seropedicae* resulta, em parte, da modulação hormonal associada à absorção e assimilação eficientes de nutrientes e a um aumento no metabolismo anabólico primário das vias integrativas de carbono e nitrogênio (Irineu et al., 2023). Outros

trabalhos como Cunha et al., (2022), comprovam que cepas de *H. seropedicae* aumentam eficientemente a biomassa radicular do milho, demonstrando seu potencial para ser utilizada como inoculante em sistemas agrícolas. Essa atuação multifuncional reforça o potencial do microrganismo como ferramenta biotecnológica em sistemas agrícolas modernos, especialmente quando associado ao manejo racional da adubação nitrogenada.

Por mais que os estudos de uso de microrganismos promotores de crescimento em milho tenham avançado ainda existem lacunas importantes relacionadas a associação de inoculação com *Herbaspirillum seropedicae* e o manejo da adubação nitrogenada. Por mais que muitos trabalhos demonstrem efeitos positivos da inoculação sobre atributos vegetativos, como aumento de biomassa, área foliar e eficiência de uso de nitrogênio, poucos trabalhos direcionam essa análise para parâmetros produtivos.

Dessa forma, torna-se necessário investigar se a combinação entre inoculação de *Herbaspirillum seropedicae* e adubação é capaz de sustentar o desempenho fisiológico e agrônômico do milho, contribuindo para sistemas de produção mais eficientes, resilientes e menos dependentes de altas doses de N mineral.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização dos locais de estudo

Foram conduzidos dois experimentos idênticos, em campo, instalados em dois locais, Londrina, PR e Guarapuava, PR, durante a safra 2024/2025. No município de Londrina, PR o experimento foi conduzido entre os meses de novembro de 2024 e maio de 2025, em área da Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina (UEL), com coordenadas geográficas 23°20'21"S 51°12'23"O a 521m do nível do mar, (Figura 1B). Também no Paraná, o experimento instalado em Guarapuava foi conduzido entre os meses de outubro de 2024 e março de 2025, na Fazenda Experimental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), nas coordenadas 25°22'58"S 51°33'10"O a 970m do nível do mar, (Figura 1A).

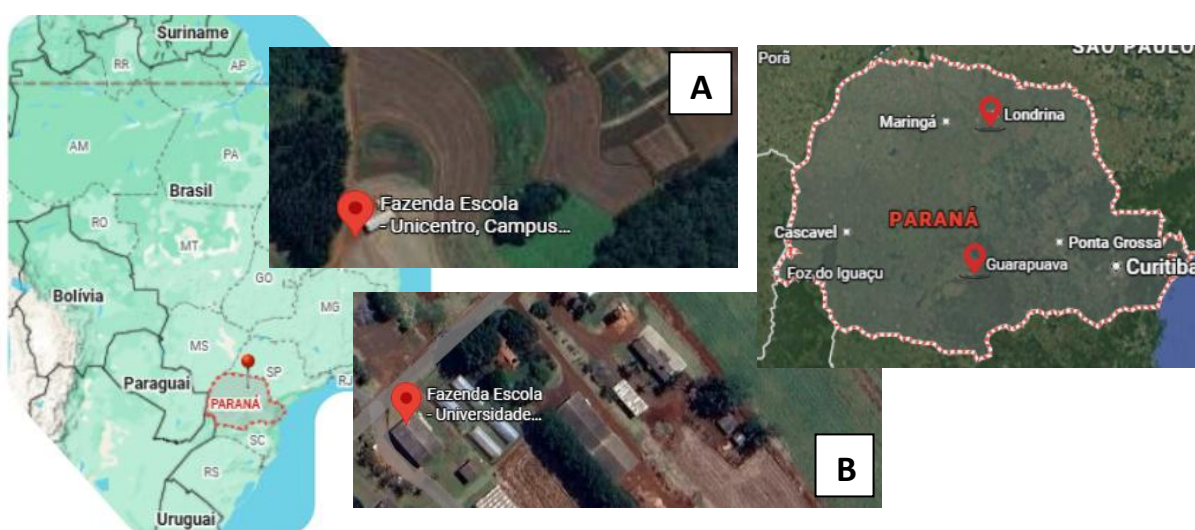


Figura 1 - Disposição das áreas experimentais em Guarapuava, PR (A) e Londrina, PR (B).

Em Guarapuava, predomina o solo Argissolo Vermelho-Amarelo, um solo mais intemperizado, com fertilidade de baixa a moderada e textura contrastante, variando de média a argilosa (OLIVEIRA et al., 2024). Por outro lado, a região de Londrina é caracterizada pela presença do solo Latossolo Vermelho Escuro Eutroférico (OLIVEIRA et al., 2024), um solo reconhecido por sua elevada fertilidade natural e por apresentar alta capacidade de troca de cátions, o que favorece a retenção de nutrientes. Esses solos possuem textura argilosa a muito

argilosa, conferindo boa estrutura e estabilidade (IMASUL, 2016). As características químicas do solo das áreas experimentais de Londrina e Guarapuava estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental em Guarapuava, PR e Londrina, PR, 2024.

Local	pH	cmolc.dm ⁻³					Matéria Orgânica	mg.dm ³
	CaCl	K	Ca	Mg	Al	H+Al		P
Guarapuava, PR	5,12	2,05	5,75	2,0	0	5,89	57,65%	11,71
Londrina, PR	4,78	0,56	5,91	2,4	0,13	6,19	40,02%	26,09

CaCl₂; Cloreto de Cálcio, K; Potássio, Ca; Cálcio, Mg; Manganês, Al; Alumínio; H+Al; Acidez total, e P; fósforo.

Na região de Londrina, o clima é classificado como Cfa (NITSCHKE et al., 2019), apresentando verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de mais chuvas no verão, sem apresentar uma estação seca definida (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTRELHAS, 2002). Já, a região de Guarapuava possui o clima classificado como subtropical úmido mesotérmico (Cfb) (NITSCHKE et al., 2019), possuindo verões pouco quentes, com chuvas distribuídas ao longo do ano e sem estação de estiagem (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTRELHAS, 2002).

Durante os meses de condução do experimento, foram observados os níveis de precipitação e variações de temperatura, (Figura 2). No mês de implementação do experimento, em Guarapuava, registrou-se uma elevada média pluviométrica de 264 mm, com temperaturas máxima de 24,8 °C e mínima de 13,6 °C. Outubro destacou-se como o mês de maior precipitação, enquanto nos meses seguintes observou-se redução média na pluviosidade até o término do experimento. Após esse período inicial, as condições climáticas mantiveram-se relativamente estáveis, com alternância entre semanas chuvosas e curtos intervalos de estiagem, resultando em totais mensais de 155 a 179 mm e média geral de 175,4 mm. A temperatura média mínima foi de 15,7 °C e a máxima de 26,9 °C, indicando uma amplitude térmica de 11,2 °C durante o período avaliado, (Figura 2A).

Durante o período de condução do experimento em Londrina, observou-se um regime de chuvas bem distribuídos e temperaturas moderadamente

elevadas. No mês de instalação do experimento (novembro), registrou-se precipitação de 181 mm, com temperaturas mínimas de 18,4 °C e máxima de 30,1 °C. O mês de janeiro apresentou a maior pluviosidade, atingindo 239 mm, enquanto março foi o mês mais seco, com 140 mm de chuva. Ao longo de todo o período experimental, as precipitações mensais permaneceram acima de 140 mm, com média de 199,5 mm, o que indica ausência de estiagem prolongada e boa disponibilidade hídrica para o desenvolvimento das plantas. As temperaturas médias variaram de 17,8 °C a 20,3 °C para as mínimas e de 29,7 °C a 30,9 °C para as máximas, resultando em uma amplitude térmica média de 11,1 °C durante o experimento, (Figura 2B).

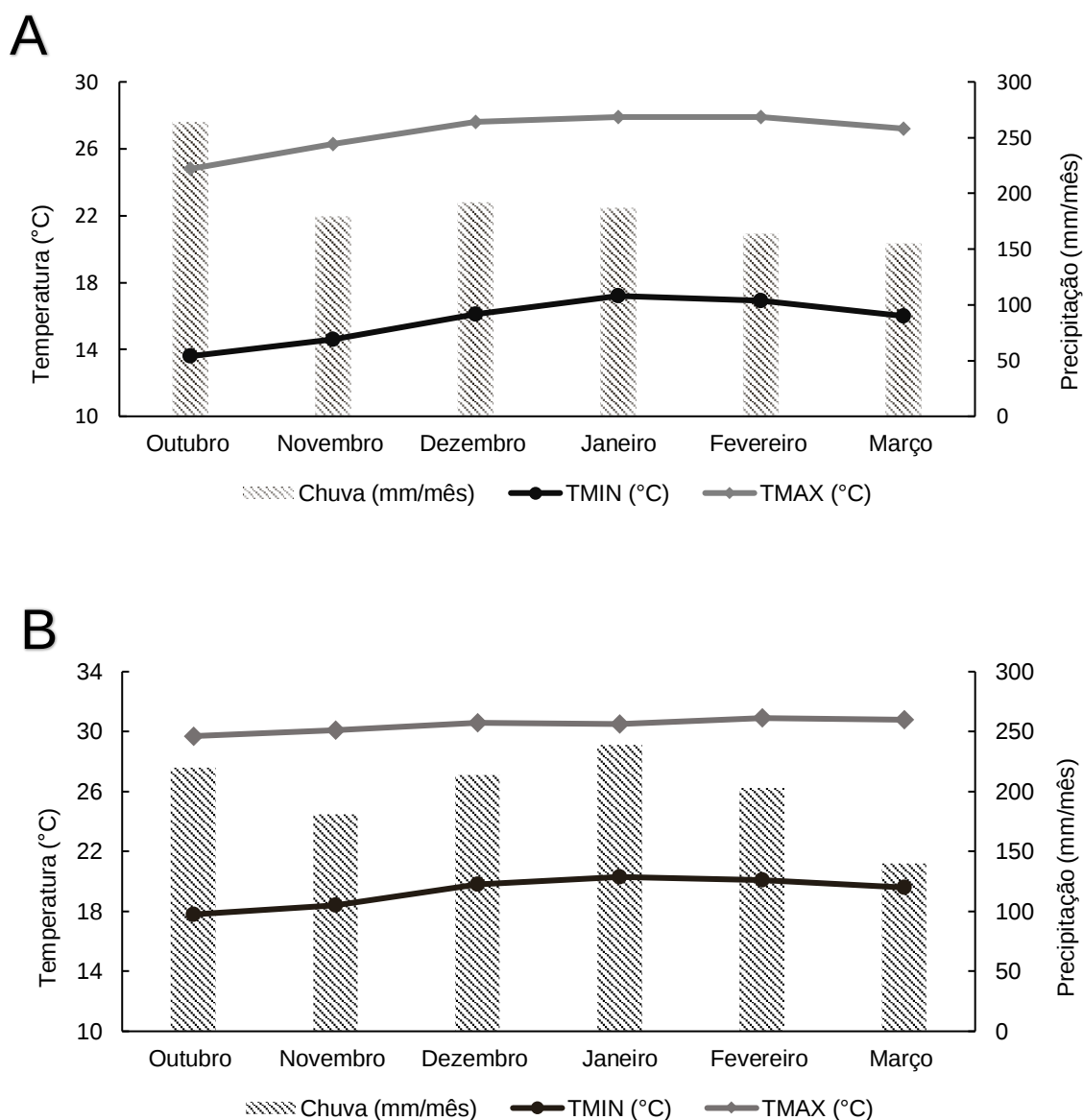


Figura 2- Climograma durante o período do experimento em Guarapuava, PR (A, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Guarapuava) e Londrina, PR (B, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Londrina). Onde T mín; Temperatura mínima (°C), T max; Temperatura máxima (°C).

5.2 Tratamentos em avaliação

Nos dois experimentos, foram avaliados oito tratamentos, sendo cinco são controles em que três foram compostos apenas por formulações de adubação de base 0%, 100% e 70% de N, e os outros dois foram biofertilizantes comerciais, sob inoculação via tratamento de sementes (TS). Os demais tratamentos foram compostos por diferentes cepas de *Herbaspirillum seropedicae*, para a cultura do milho, fornecidos pela BioInput®, empresa parceira da BRANDT®, (Tabela 2).

Tabela 2 - Tratamentos utilizados no experimento.

Tratamento	Agente Biológico	Adubação
Testemunha A	-	0%
Testemunha B	-	100%
Testemunha C	-	70%
Comercial 1	<i>Azospirillum</i> comercial	70%
Comercial 2	Biofree: <i>P. fluorescens</i> e <i>A. brasilense</i>	70%
Bac 1	<i>H. seropedicae</i> : Cepa 2	70%
Bac 2	<i>A. brasilense</i> + <i>H. seropedicae</i>	70%
Bac 3	<i>H. seropedicae</i> : Cepa 1 + Cepa 2	70%

5.3 Preparo do inoculante

Foram transferidos 1mL de criotubos das cepas bacterianas, armazenadas previamente em vials com caldo DYGS e glicerol 20% em freezer -80°C, para frascos Erlenmeyer de 250mL com 100mL de caldo DIGS e incubados em shaker orbital (Nova Técnica, NT-735, Brasil) a 35°C e 180rpm. Após 7h de cultivo, 4mL do inóculo (1%, v/v) foi transferido para frascos Erlenmeyer de 1L contendo 400mL de caldo DIGS e incubados à 35°C, 180rpm, por 72h. Após a fermentação, alíquotas foram retiradas para a verificação da

pureza do caldo fermentado através de análise microscópica, densidade óptica e plaqueamento em ágar DIGS.

5.4 Delineamento experimental

Para os dois experimentos, os oito tratamentos foram repetidos em quatro blocos completos casualizados, totalizando 32 parcelas (Figura 3). Cada parcela foi constituída por oito linhas de 12 metros, com quatro sementes por metro linear, da cultivar 20A38 VIP3 da Sempre AgTech. Foi considerado como área útil os três metros centrais das 4 linhas do meio de cada parcela. O espaçamento entre as linhas das parcelas foi de 0,45 cm. Já o espaçamento entre parcelas foi de 1,2 m. A área experimental reservada para a instalação foi de 0,5 hectare em ambos os locais.

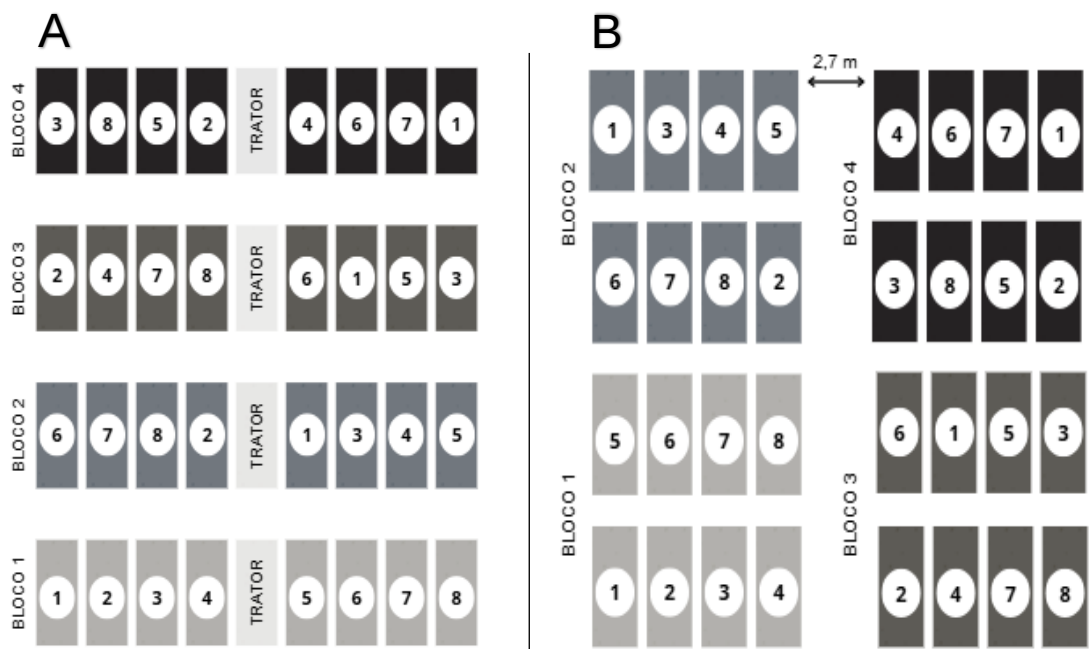


Figura 3 - Modelo do croqui experimental do experimento instalado em Guarapuava, PR (A) e Londrina, PR (B).

Em Guarapuava, PR, o plantio foi realizado no mês de outubro de 2024 e a colheita realizada no mês de março de 2025. Já em Londrina, PR, o plantio foi realizado no mês de novembro de 2024 e a colheita realizada no mês de maio de 2025. Em ambas regiões o plantio foi direto e a adubação foi mecanizada e realizada utilizando fórmula NPK 8-20-20 em dose de 200 kg.ha⁻¹. Nos dois

ambientes, foram realizadas adubações de cobertura quando a cultura alcançou o estágio V6, utilizando ureia na concentração de 200 Kg.ha⁻¹ de ureia. Em cada um dos ambientes foram feitos manejo fitossanitário indo de acordo com as recomendações da região, sendo aplicados herbicidas e fungicidas sempre que necessário.

5.5 Características avaliadas

Em campo e nos laboratórios de cada universidade, foram avaliadas características morfológicas e de produção, da cultura do milho, visando compreender o desempenho das plantas ao longo do ciclo. As características morfológicas analisadas incluíram altura média das plantas (AP), altura da inserção da espiga (AIE), indicadores importantes do porte, vigor e arquitetura da planta, expressos em cm. Os dados foram mensurados com auxílio de uma régua de cano PVC com fita métrica. Já as características relacionadas à produção englobaram comprimento médio da espiga (CE), expresso em cm e diâmetro médio de espiga (DE) em mm, dados coletados a partir de um paquímetro digital, número de fileiras por espiga (NF), número de grãos por fileira (NGF), contabilizados manualmente, por unidade, peso de mil grãos (P1000) mensurados com auxílio de balança, produtividade, expressa em kg.ha⁻¹ e número de sacas por hectare (SACAS). Os principais componentes de produção estão descritos a seguir:

- a. Peso de 1000 grãos (P1000): pesagem em gramas de 1000 grãos de cada parcela utilizando balança semi-analítica e correção de umidade a 13%. Equação: $P_{13} = P_{obs} * 100 - U_{obs} / 100 - 13$
 P_{13} = peso de 1000 grãos corrigido para 13% de umidade (g)
 P_{obs} = peso de 1000 grãos obtido na balança (g)
 U_{obs} = umidade observada dos grãos no momento da pesagem (%)
13 = umidade padrão (%)
- b. Produtividade (PROD): peso de grãos da parcela corrigido para estandes pela metodologia da covariância ideal (SCHMILDT et al., 2001) e umidade a 13%, de acordo com a seguinte equação: Produção = peso fresco da parcela * $(100 - U_{Mp}) / (100 - U_{Md})$, onde:

U_{Mp} : umidade da parcela,

U_{Md} : umidade desejada.

- c. Número de sacas por hectare (SACAS): Produtividade em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ convertido para sacas de 60 kg, que é o padrão para milho no Brasil, seguindo a equação: $\text{Sacas ha}^{-1} = \text{Produtividade kg ha}^{-1} / 60\text{Kg}$.

5.6 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram conduzidas com o objetivo de verificar se houve efeito diferenciado dos tratamentos sobre as variáveis agrônomicas analisadas. Inicialmente, as análises estatísticas para obtenção dos resultados foram realizadas de forma individualizada para os dados obtidos de cada experimento. Procedeu-se à verificação dos pressupostos da análise de variância (ANOVA), sendo avaliadas a normalidade dos resíduos (teste de Lilliefors), considerando-se adequado o ajuste quando $p > 0,05$, a homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett) e a independência dos erros. Uma vez atendidos os pressupostos, procedeu-se à aplicação da ANOVA.

Para cada ambiente, realizou-se a ANOVA individual, utilizando o modelo estatístico adequado ao delineamento experimental. A significância dos efeitos foi testada pelo teste F a 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$). Posteriormente, realizou-se o teste de agrupamento Scott-Knott para comparação das médias, considerando 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$). Este teste foi utilizado para evitar a sobreposição de letras e garantir maior separação entre médias. Assim, tratamentos pertencentes ao mesmo grupo não diferem estatisticamente entre si, enquanto grupos distintos indicam efeitos significativos dos tratamentos sobre a variável avaliada.

A análise de variância foi realizada de acordo com o modelo estatístico proposto por FISHER, 1934: $Y_{ij} = \mu + g_i + b_j + \varepsilon_{ij}$, em que:

Y_{ij} : valor da característica do i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

μ : média geral do ensaio;

g_i : efeito do i-ésimo tratamento ($i = 1, 2, \dots, g$);

b_j : efeito do j-ésimo bloco ($j = 1, 2 \dots, r$); e

ϵ_{ij} : erro aleatório associado ao tratamento i e ao bloco j $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

Posteriormente, foi realizada uma análise conjunta, em fatorial simples AxB, com a homogeneização dos graus de liberdade quando o quadrado médio do erro foi maior ou igual a 7. A análise seguiu o modelo estatístico pressuposto por FISHER (1934): $Y_{ijk} = \mu + a_i + t_j + (at)_{ij} + c_k + \epsilon_{ijk}$, em que:

Y_{ijk} : valor da característica do i-ésimo nível do fator A, do j-ésimo nível do fator B e do k-ésimo bloco;

μ : média geral do ensaio;

a_i : efeito do i-ésimo nível do fator A;

t_j : efeito do j-ésimo nível do fator T;

$(at)_{ij}$: efeito da interação dos fatores A e T sobre i-ésimo e j-ésimo níveis;

c_k : efeito do k-ésimo bloco, e

ϵ_{ijk} : erro aleatório.

Assim, foi feita a comparação de tratamento entre os diferentes ambientes, segundo o teste tukey a 5% de probabilidade de erro.

As análises de variância individuais e conjunta e o teste de agrupamento e comparação de médias individuais e conjuntas foram realizadas com auxílio do software Genes (CRUZ, 2013).

Os gráficos dos testes de comparação de médias individuais foram feitos pelo software Graph Pad Prism (GraphPad Software, San Diego, CA, USA) e o incremento de sacas pelo Microsoft Excel Software, 2021. As tabelas pelo Microsoft Excel Software, (2021).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise de variância

A partir do teste F da análise de variância (ANOVA), apresentada na tabela 3, foi constatado que para o ambiente de Guarapuava houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) para a fonte de variação tratamentos apenas para as características de produtividade (PROD) e SACAS, indicando que ao menos um dos tratamentos proporcionou média de produtividade e sacas diferente nas plantas de milho, demonstrando variabilidade nas respostas das plantas em relação aos tratamentos. Já para as variáveis P1000, AP, AIE, CE, DE, NF e NGF não foi constatado diferença significativa entre os tratamentos.

Em relação ao coeficiente de variação (CV), de acordo com Pimentel-Gomes (2000), quanto menor o valor, dado em porcentagem, maior é a precisão experimental. Dessa mesma forma é considerado baixo quando inferior a 10% encontrado para as variáveis P1000 (6,91%), AP (9,16%), AIE (7,91%) e CE (3,47%), DE (2,54%) NF (4,07%) e NGF (4,97%). É um valor mediano estando entre 10 e 20% como observado em PROD (15,18%) e SACAS (15,18%), ambos valores são iguais, pois na prática, são a mesma medida, apenas expressas em unidades diferentes. No geral, a precisão experimental das variáveis avaliadas no experimento de Guarapuava foi considerada boa, tendo em vista um ensaio de campo, em que os tratamentos são fortemente influenciados por fatores ambientais e fisiológicos.

Em Londrina as variáveis AP, AIE, P1000, PROD e SACAS apresentaram diferença estatísticas significativa entre as médias. Já DE, CE, NF e NGF não exibiram diferença significativa entre os tratamentos.

Além do mais, o CV obtido para as variáveis P1000 (4,01%), AP (3,95%), AIE (8,21%) e CE (3,67%), DE (2,28%) NF (4,54%) e NGF (5,37%) é classificado como baixo, PROD apresentou coeficiente de variação maior (20,46%) juntamente com SACAS. Apesar de alto, este CV observado para produtividade e sacas está possivelmente relacionado à alta sensibilidade desta variável a fatores ambientais e fisiológicos, principalmente em condições de campo, em que as variações do ambiente são dificilmente controladas.

De maneira geral, é possível perceber que os experimentos apresentaram boa precisão experimental. Porém, a variável de produtividade no ambiente Londrina apresentou menor precisão quando comparado a Guarapuava.

Tabela 3 - Estimativas dos quadrados médios, médias e coeficientes de variação de nove caracteres, sendo eles, altura da planta (cm), altura da inserção da primeira espiga (cm), comprimento da espiga (cm), diâmetro da espiga (mm), número de fileiras (uni), número de grãos por fileira (uni), peso de mil grãos (g), produtividade (Kg.ha⁻¹) e sacas (sacas.ha). Guarapuava, PR, Out/2025. Londrina, PR, Out/2025.

Variável	FV	GL	Quadrados médios	
			Guarapuava	Londrina
AP	Trat	7	496,276786^{ns}	0,028604*
	Bloco	7	417,3125	0,006407
	Erro	49	585,496173	0,009814
	CV%	-	9,16012	3,957654
	Média	-	264,15625	2,501875
AIE	Trat	7	59,158482^{ns}	0,056314**
	Bloco	7	143,444196	0,020632
	Erro	49	93,67889	0,011849
	CV%	-	7,916195	8,21823
	Média	-	122,265625	1,324531
CE	Trat	7	0,521423^{ns}	0,521423^{ns}
	Bloco	7	0,793923	0,793923
	Erro	49	0,422543	0,422543
	CV%	-	3,475676	3,672016
	Média	-	18,702344	17,702344
DE	Trat	7	1,428954^{ns}	1,428954^{ns}
	Bloco	7	2,725196	2,725196
	Erro	49	1,933778	1,933778
	CV%	-	2,549315	2,687254
	Média	-	54,548125	51,748125
NF	Trat	7	0,241071^{ns}	0,241071^{ns}
	Bloco	7	0,483929	0,483929
	Erro	49	0,5625	0,5625
	CV%	-	4,074703	4,543733
	Média	-	18,40625	16,50625
NGF	Trat	7	5,969196^{ns}	5,969196^{ns}
	Bloco	7	11,596339	11,596339
	Erro	49	3,913686	3,913686
	CV%	-	4,973346	5,379023
	Média	-	39,778125	36,778125
P1000	Trat	7	878,544643^{ns}	838,981429**
	Bloco	7	1619,181429	496,345714
	Erro	49	538,028724	167,096735
	CV%	-	6,916014	4,014625
	Média	-	335,3875	321,9875

PROD	Trat	7	12054894,245827**	35392810,490898**
	Bloco	7	6546161,583702	7023676,396123
	Erro	49	3902756,363753	9551826,830094
	CV%	-	15,181333	20,468764
	Média	-	13012,951406	15099,118594
SACAS	Trat	7	3348,581735 **	9831,336249 **
	Bloco	7	1818,378218	1951,02122
	Erro	49	1084,098988	2653,28523
	CV%	-	15,181333	20,468764
	Média	-	216,882523	251,651977

Peso de 1.000 grãos (P1000); Altura da Planta (AP); Altura da Inserção da Primeira Espiga (AIE); Comprimento de Espiga (CE), Diâmetro de Espiga (DE), Número de fileiras (NF), Número de Grãos por Fileira (NGF) e Produtividade (Prod); Coeficiente de variação (CV); **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente.

6.2 Teste de média

6.2.1 Guarapuava

O teste de agrupamento de médias confirmou as premissas resultantes da ANOVA evidenciando as diferenças estatisticamente significativas para a variável produtividade e sacas, com formação de dois agrupamentos de medias, ($p \leq 0,05$) (Figura 4).

O tratamento que proporcionou a maior média para altura das plantas foi a Bac 2 (267,25 cm), porém igual estatisticamente aos demais tratamentos, Testemunha A (266,25 cm); Testemunha B (256,62 cm); Testemunha C (272,50 cm); comercial 1 (250,62 cm); comercial 2 (274,37 cm); Bac 1 (264,0 cm) e Bac 3 (261,62 cm). Assim, observou-se que os tratamentos não promoveram alteração na altura média das plantas.

Para a altura de inserção da primeira espiga das plantas, a maior média foi observada na Testemunha C (126,87cm), sendo estatisticamente igual aos demais tratamentos, Testemunha A (118,37 cm), Testemunha B (123,62) e os tratamentos Comercial 1 (122,62 cm), comercial 2 (122,50 cm), Bac 1 (118,75 cm), Bac 2 (123,25 cm) e Bac 3 (122,12 cm). Dessa forma, também não houve diferença significativa entre os tratamentos para essa característica.

O comprimento médio da espiga apresentou valores estatisticamente iguais entre os tratamentos. A Testemunha B e o tratamento Bac 2 tiveram média de 19 cm, sendo igual estatisticamente aos demais, que apresentaram média de

18 cm. Assim como a variável CE, o diâmetro da espiga o padrão se repetiu, com médias próximas e sem diferenças estatísticas significativas, variando de 55,27 mm (Testemunha B) a 53,93 mm (Bac 3).

Da mesma forma, o número de fileiras por espiga e o número de grãos por fileira não apresentaram diferenças significativas, com todos os tratamentos pertencendo ao mesmo agrupamento. A média de fileira para todos os tratamentos foram 18 fileiras e o número de grãos por fileira variaram de 37,95 grãos (Bac 1) a 40,42 grãos (Comercial 2).

Na variável massa de mil grãos, também não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos. As médias variaram de 320,65 g (Bac 1) a 347,35 g (Testemunha C), evidenciando pequena variação entre os tratamentos. Os valores observados foram de 322,68 g (Testemunha A), 345,05 g (Testemunha B), 338,41 g (Comercial 1), 331,94 g (Comercial 2), 331,0 g (Bac 2) e 346,03 g (Bac 3).

A ausência de diferenças significativas nessas variáveis indica que a presença ou ausência de adubação ou a mudança de agente biológico utilizado não influenciou as características morfológicas avaliadas. Segundo Schultz et al., (2022) a resposta de milho à inoculação com *H. seropedicae* é altamente dependente do genótipo da planta hospedeira em diversos genótipos avaliados, a inoculação não causou mudanças consistentes e significativas no crescimento, o que indica que a introdução da bactéria pode não garantir de incremento morfológico.

Por outro lado, houve diferença significativa entre os tratamentos para a variável de produtividade tendo médias variando de 10.916,54 kg/ha (Testemunha A) a 14.335,06 kg/ha (Bac 3). Os tratamentos Testemunha B (14.247,72 kg/ha), comercial 1 (13.808,07 kg/ha), comercial 2 (13.555,30 kg/ha), Bac 2 (12.995,38 kg/ha) e Bac 3 (14.335,06 kg/ha) foram agrupados apresentando as maiores médias de produtividade. Já Testemunha A (10.916,54 kg/ha), Testemunha C (12.552,32 kg/ha) e Bac 1 (11.693,23 kg/ha) compuseram o segundo agrupamento com menor desempenho.

Quando os valores foram convertidos para sacas por hectare, considerando que uma saca de milho corresponde a 60 kg, observou-se o mesmo padrão estatístico, com médias variando entre 181,94 e 238,92 sacas/ha. Os tratamentos de maior desempenho foram Testemunha B (237,46

sacas/ha), comercial 1 (230,13 sacas/ha), comercial 2 (225,92 sacas/ha), Bac 2 (216,59 sacas/ha) e Bac 3 (238,92 sacas/ha) que foram agrupados apresentando as maiores médias.

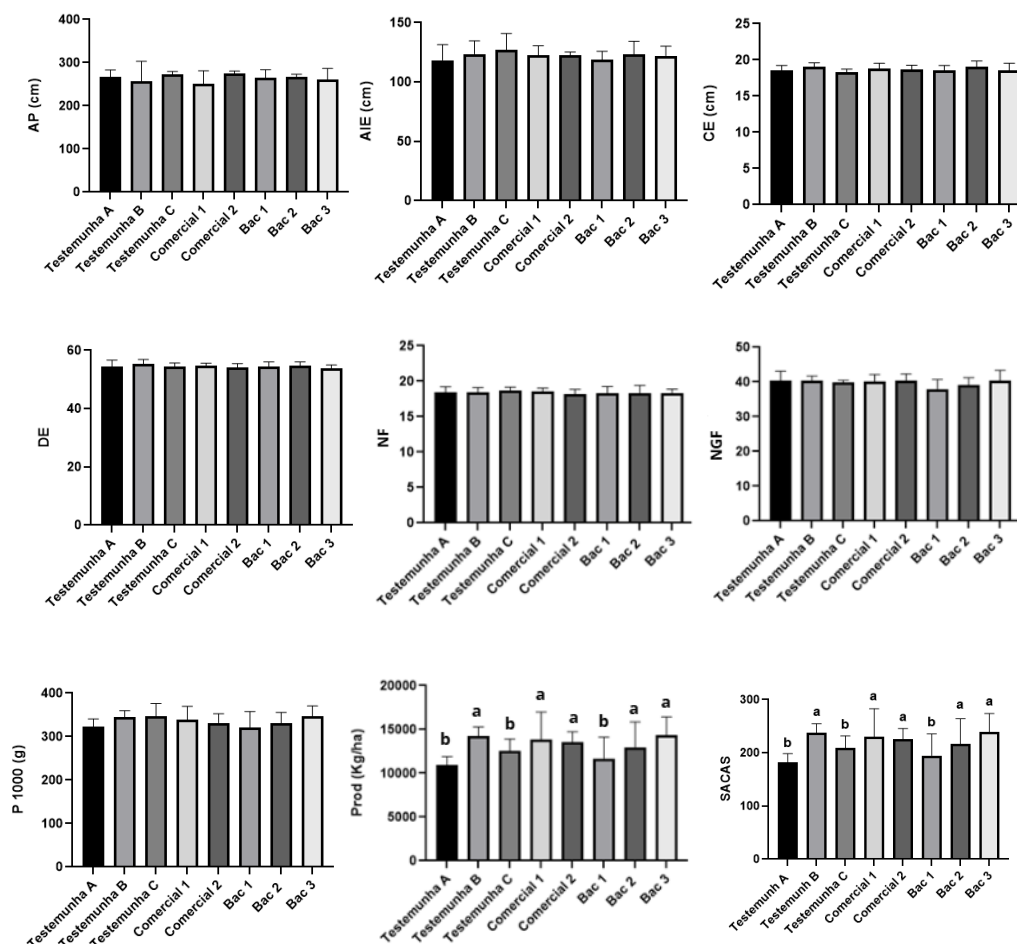


Figura 4 - Médias das características Altura média de plantas (AP), Altura média da inserção da primeira espiga (AIE), Comprimento médio das espigas (CE), Diâmetro médio das espigas (DE), Número de fileiras por espiga (NF), Número de grãos por fileira (NGF), Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS em milho avaliados por três diferentes tratamentos, sob situação de déficit hídrico. Guarapuava, PR, Out/2025. *Letras iguais na mesma coluna não difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade.

Como forma de evidenciar estes resultados, na Figura 5 estão apresentados os resultados referentes ao incremento do número de sacas/ha obtidas em cada tratamento em relação a testemunha A, 0% de adubação. Este parâmetro é extremamente relevante para os produtores, pois expressa diretamente os efeitos dos tratamentos biotecnológicos e agrônômicos sobre a produtividade do milho

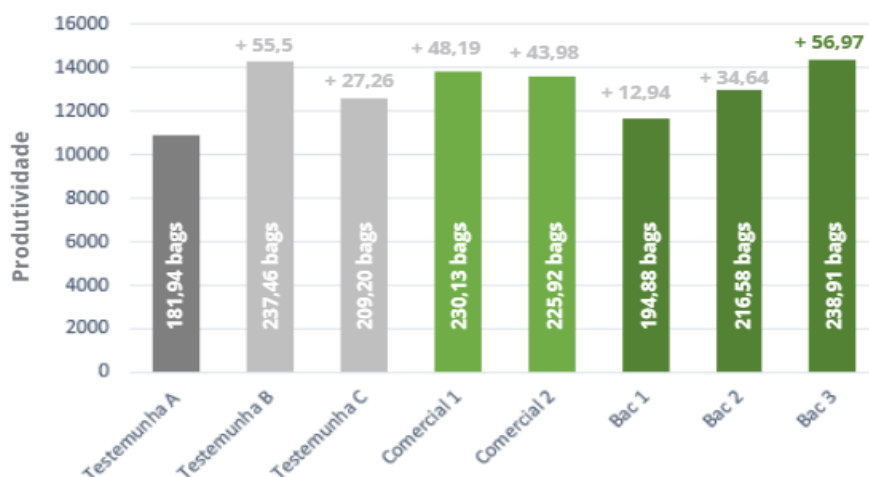


Figura 5 - Incremento de sacas/ha obtidas em cada tratamento em relação a testemunha A. Guarapuava, PR, Out/2025.

O Tratamento Bac 3, promoveu o maior incremento de produtividade, com aumento de 56,97 sacas/ha em comparação a testemunha A, sem inoculação e com 0% de nitrogênio. De acordo com a figura 4, Bac 3 atingiu o total de 238,91 sacas/ha, diferente estatisticamente da testemunha, A (181,94 sacas/ha) e Testemunha C (209,20 sacas/ha) e superior aos dois controles comerciais, comercial 1 (230,13 sacas/ha) e comercial 2 (225,92 sacas/ha). Entre os tratamentos experimentais também foi superior ao Bac 1 (194,88 sacas/ha) e Bac 2 (216,58 sacas/ha), evidenciando o potencial deste como um promotor de crescimento vegetal.

Outro incremento relevante em relação aos tratamentos teste quando comparados com a Testemunha A, foi observado em Bac 2 (+34,64 sacas/ha). Os demais tratamentos sendo outras testemunhas e os produtos comerciais apresentaram incrementos relevantes, como Testemunha B (+55,5 sacas/ha), Testemunha C (+27,26 sacas/ha), comercial 1 (+48,19 sacas/ha) e comercial 2 (+43,98 sacas/ha).

6.2.2 Londrina

Atendendo as premissas resultantes da ANOVA, os tratamentos expressaram diferenças significativas para as variáveis AP, AIE, P1000, PROD e SACAS, com formação de dois agrupamentos de médias, ($p \leq 0,05$) para cada variável (Figura 6).

Para a variável AP, observou-se que a Testemunha A apresentou a maior média (258,0 cm), enquanto o menor valor registrado foi o tratamento Bac 3 (242,75 cm). A Testemunha B (256,87cm) e C (254,0cm), juntamente com o comercial 1 (252,37cm), agruparam-se estatisticamente com a testemunha A, compondo o grupo com as maiores alturas. Os tratamentos, comercial 2 (248,62cm), Bac 1 (245,25) e Bac 2 (243,62cm), se agruparam com Bac 3, apresentando as menores médias de altura.

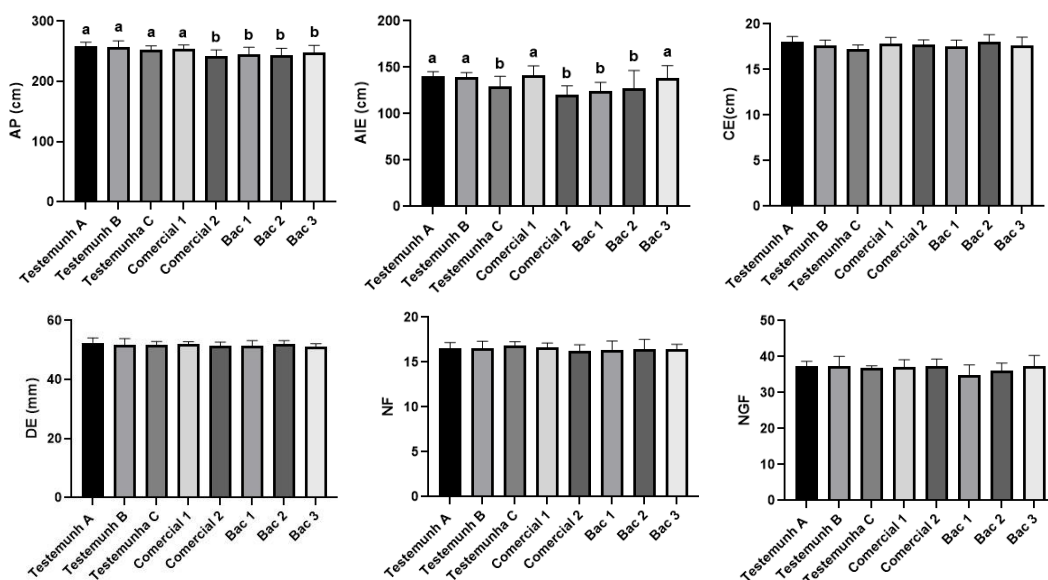
O tratamento que proporcionou a maior média para a altura de inserção da primeira espiga das plantas de milho foi o comercial 1 (141,75cm), sendo que a Testemunha A (140,0 cm), Testemunha B (139,5cm) e o tratamento Bac 3 (138,5cm), formaram o grupo de melhores médias, já no grupo com menores médias ficaram os tratamentos comercial 2 (120,0cm), Bac 1 (124,12cm), Bac 2 (127,0cm) e a testemunha C (129,1cm).

Na variável P1000, destacaram-se os tratamentos Bac 3 (338,0g), comercial 1 (333,3g) e Bac 2 (325,8g) evidenciando diferença estatística para com as testemunhas C (318,7g), A (320,7g) e B (308,1g) e os demais, comercial 2 (320,2g) e Bac 1 (310,7g) agrupados com as menores médias.

A produtividade apresentou diferença estatística entre os tratamentos, com a Testemunha B expressando a maior média (18.547,47 kg/ha). O menor rendimento foi observado no tratamento Bac 1 (12.197,09 kg/ha). O tratamento Bac 2 apresentou a segunda maior produtividade (16.470,84 kg/ha), evidenciando desempenho próximo ao dos produtos comerciais. As testemunhas A (15.641,39 kg/ha) e C (15.400,99 kg/ha), juntamente com comercial 1 (16.149,30 kg/ha), agruparam-se com a Testemunha B no grupo de maiores rendimentos. Os tratamentos Bac 3 (13.290,40 kg/ha) e comercial 2 (13.095,47 kg/ha) integraram, com Bac 1, o grupo de menores médias.

Os valores de produtividade convertidos a sacas no experimento de Londrina, assim como ocorreu para o local Guarapuava, demonstraram o mesmo padrão entre as duas variáveis. Os tratamentos de maior desempenho foram Testemunha B (309,12452 sacas/ha), Bac 2 (274,51406 sacas/ha), comercial 1 (269,15502 sacas/ha), testemunha A (260,68989 sacas/ha) e testemunha C (256,68310 sacas/ha), foram agrupados apresentando as maiores médias. Esses resultados de produtividade e sacas demonstram que, a inoculação do tratamento Bac 2 promoveu incrementos produtivos comparáveis ou superiores aos produtos comerciais, evidenciando o potencial do uso de inoculantes no aumento da produtividade do milho. Os demais tratamentos foram agrupados como menores médias, sendo representadas por comercial 2, Bac 1 e Bac 3, com medias 218,25783 kg/ha, 203,28479 kg/ha e 221,50658 kg/ha respectivamente.

Para as variáveis comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), número de fileiras (NF) e número de grãos por fileira (NGF) não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, permanecendo todos em um único agrupamento. Esses resultados sugerem que a aplicação dos agentes biológicos não alterou de forma expressiva esses componentes morfológicos da espiga.



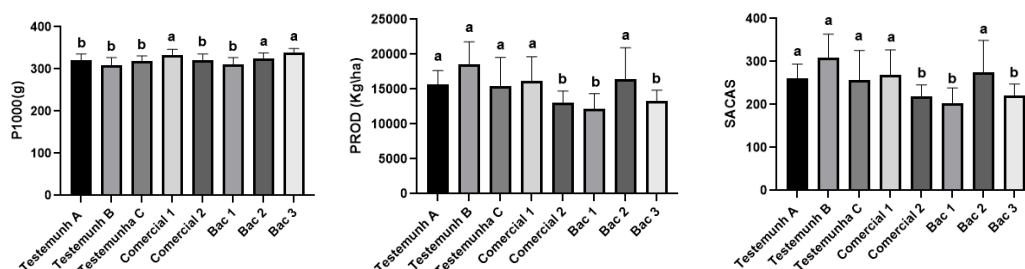


Figura 6 – Médias das características Altura média de plantas (AP), Altura média da inserção da primeira espiga (AIE), Comprimento médio das espigas (CE), Diâmetro médio das espigas (DE), Número de fileiras por espiga (NF), Número de grãos por fileira (NGF), Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS em milho avaliados por três diferentes tratamentos, sob situação de déficit hídrico. Londrina, PR, Out/2025. *Letras iguais na mesma coluna não difere estatisticamente pelo teste Scott-Knott à 5% de probabilidade.

O tratamento Bac 2 apresentou o maior incremento produtivo entre os tratamentos inoculados (Figura 7), alcançando 274,51 sacas/ha, o que representa um acréscimo de 13,83 sacas/ha em relação ao tratamento Comercial 1 e um desempenho superior aos demais tratamentos biológicos (Bac 1 e Bac 3). Apesar de não superar a Testemunha B, o Bac 2 destacou-se dentro do grupo de inoculantes como o que mais contribuiu para o aumento de produtividade, situando-se estatisticamente entre os tratamentos de maior rendimento.

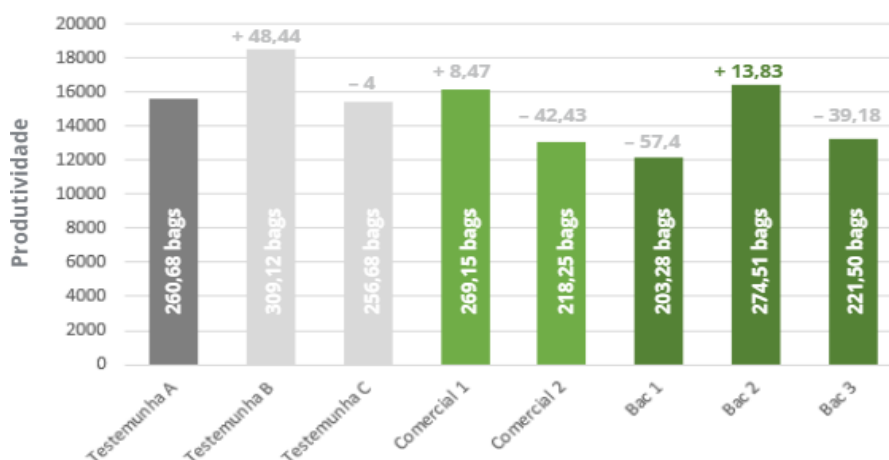


Figura 7 - Incremento de sacas/ha obtidas em cada tratamento em relação a testemunha A. Londrina, PR, Out/2025.

Estudos clássicos com bactérias diazotróficas associativas demonstraram que efeitos mais expressivos em características estruturais geralmente ocorrem sob condições de estresse ou limitação nutricional, (BALDANI et al., 2010). Os resultados obtidos para produtividade em ambos locais são coerentes com estudos que demonstram que a inoculação com *H. seropedicae* pode aumentar a produtividade do milho em função da maior disponibilidade de nitrogênio proveniente das bactérias fixadoras de nitrogênio, maior síntese de fitormônios e aumento da atividade metabólica associada ao enchimento de grãos (GUIMARÃES et al., 2013; Irineu et al., 2023).

Assim, o desempenho observado no tratamento Bac 3 em Guarapuava e Bac 2 em Londrina indica que tanto o uso da combinação de duas cepas de *Herbaspirillum seropedicae* (Bac 3), quanto a combinação de cepas de *Azospirillum sp.* e *Herbaspirillum seropedicae*, apresentam potencial agrônômico relevante como inoculante para o milho, oferecendo incremento de produtividade comparável a produtos comerciais e reforçando sua aplicabilidade como ferramenta sustentável baseada em promoção de crescimento e fixação biológica de nitrogênio.

Segundo Breda (2018) a avaliação do crescimento vegetal mostrou, que as bactérias exercem efeito benéfico sobre o crescimento das plantas de milho, principalmente a *Herbaspirillum seropedicae*, fazendo com que sejam mais eficientes na produção de grãos e na absorção e assimilação de nitrogênio, resultado evidenciado em Bac 3, que apresentou mais produtividade no ambiente de Guarapuava. Assim como Bac 2 no ambiente de Londrina, que segundo Dartora et al., (2013), a inoculação combinada de *A. brasilense* e *H. seropedicae* proporcionou melhor desenvolvimento da cultura do milho, em função da interação diferenciada das bactérias com a planta proporcionando incrementos de produtividade de grãos.

6.3 Interação Tratamentos X Ambientes para produtividade

A análise de variância conjunta (tabela 4), evidenciou a pressuposição de que os locais em estudo, Guarapuava e Londrina são diferentes e que influenciam de forma diferente o desempenho produtivo das plantas de milho. Para os componentes de produção P1000, Produtividade e Sacas, a fonte de variação ambiente teve valor de F significativo ($p < 0,01$), demonstrando que as condições climáticas e edáficas exerceram forte impacto, superando, inclusive, o efeito isolado dos tratamentos para essas variáveis. A interação entre os tratamentos e os ambientes também foram significativas para produtividade e SACAS, revelando que a eficiência dos tratamentos variou conforme o local, ou seja, os materiais e manejos testados responderam de maneira distinta em Guarapuava e Londrina.

Tabela 4 - Resumo da Análise de variância conjunta de três componentes de produção avaliados em milho sob diferentes níveis de adubação de N e inoculações.

FV	GL	Valores de F		
		P1000	PROD	SACAS
Trat.	7	4,63041*	2,69937*	1,49896 ^{ns}
Amb.	1	15,94441**	21,60887**	21,60887**
Trat.x Amb.	7	0,84647 ^{ns}	4,66268*	2,94604**
CV%	-	5,775537	18,061144	18,061144

Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD), e SACAS. **: * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente.

A Tabela 5 demonstra a comparação de cada tratamento entre os diferentes ambientes. De acordo com agrupamento de médias, para a variável P1000 observa-se que Guarapuava apresentou valores superiores aos de Londrina na maioria dos tratamentos, reforçando o forte efeito ambiental previamente demonstrado na ANOVA conjunta. Na comparação entre os dois ambientes observa-se diferença significativa entre as testemunhas B (100% de adubação nitrogenada) e C (70% de adubação nitrogenada), onde Guarapuava

apresentou média superior em ambas. Os demais tratamentos mantiveram seus desempenhos relativos iguais independente do ambiente.

Na Produtividade, o padrão de resposta foi alterado, Londrina apresentou maiores médias gerais, e houve reagrupamento dos tratamentos entre os ambientes, caracterizando a interação significativa. As testemunhas A (0% de adubação nitrogenada) e C (70% de adubação nitrogenada) e o tratamento Bac 2 (*A. brasiliense* + *H. seropedicae*) apresentaram diferença estatística de rendimento entre os ambientes, sendo que Londrina expressou os maiores valores. Os demais tratamentos mantiveram o desempenho independente do ambiente.

Para Sacas, a diferença estatística foi apresentada para as testemunhas A (0% de adubação nitrogenada), B (100% de adubação nitrogenada) e C (70% de adubação nitrogenada) e para o tratamento Bac 2 (*A. brasiliense* + *H. seropedicae*), que também apresentou valores maiores para o ambiente de Londrina.

De modo geral, os resultados indicaram que as testemunhas e o tratamento Bac 2 apresentam maior sensibilidade às condições ambientais, expressando variações significativas entre Guarapuava e Londrina. Em contraste, os demais tratamentos mantiveram desempenho uniforme nos dois locais, indicando maior estabilidade fenotípica e menor dependência das condições específicas de cultivo.

Tabela 5 - Peso de 1.000 grãos (P1000), Produtividade (PROD) e SACAS avaliados em milho sob diferentes níveis de adubação de N e inoculações. Guarapuava, PR, Out/2025 (Gua) e Londrina, PR, Out/2025 (Lon).

Var.	Amb.	Tratamentos							
		Test. A	Test. B	Test. C	Com. 1	Com. 2	Bac 1	Bac 2	Bac 3
P1000	Gua	322,67 Ab	345,05 Aa	347,35 Aa	338,41 Aa	331,93 Ab	320,65 Ab	331,00 Ab	346,02 Aa
	Lon	308,12 Aa	320,75 Ba	318,75 Ba	333,37 Aa	320,25 Aa	310,77 Aa	325,87 Aa	338,00 Aa
PROD	Gua	10.916 Ba	14.247 Aa	12.552 Ba	13.808 Aa	13.555 Aa	11.693 Aa	12.995 Ba	14.335 Aa
	Lon	18.547 Aa	15.641Aa	15.400 Aa	16.149 Aa	13.095 Ab	12.197 Ab	16.470 Aa	13.290 Ab
SACAS	Gua	181,94 Ba	237,46 Ba	209,20 Ba	230,13 Aa	225,92 Aa	194,88 Aa	216,58 Ba	238,91 Aa

Lon	260,68 Aa	309,12 Aa	256,68 Aa	269,15 Aa	218,25 Ab	203,28 Ab	274,51 Aa	221,50 Ab
-----	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Variável (Var.), Ambiente (Amb.), Testemunha A (Test. A), Testemunha B (Test. B), Testemunha C (Test. C), Comercial 1 (Com. 1), Comercial 2 (Com. 2). *Médias acompanhadas da mesma letra maiúscula na coluna da respectiva variável indicam grupos estatisticamente homogêneos. Médias acompanhadas da mesma letra minúscula na linha da respectiva variável indicam grupos estatisticamente homogêneos pelo teste Scott-Knott à 5% de probabilidade*.

A elevada significância do fator Ambiente observada na ANOVA conjunta (Tabela 4), pode ser explicada pelas diferenças observadas entre os ambientes avaliados (Tabela 1), principalmente em matéria orgânica e acidez, que influenciam diretamente a dinâmica do nitrogênio no solo e consequentemente, o desempenho das plantas de milho. Guarapuava apresentou maior teor de matéria orgânica (57,65%), o que tende a favorecer a mineralização de N e aumentar a disponibilidade gradual ao longo do ciclo da cultura. Já Londrina, com menor matéria orgânica (40,02%), depende mais fortemente de fontes externas de N para sustentar altos níveis produtivos, em relação a acidez ambos os ambientes demonstram solos ácidos, Guarapuava (pH 5,12) e Londrina (pH 4,78).

O N é particularmente sensível às condições edafoclimáticas, e a variabilidade entre locais frequentemente resulta em diferenças expressivas nos componentes de rendimento (CLARKE et al., 2024; MARTINS et al., 2008).

O desempenho superior do Bac 2 em Londrina, justamente o ambiente mais limitante para N, está alinhado com evidências da literatura que demonstram que bactérias diazotróficas, como *Herbaspirillum seropedicae* e *Azospirillum sp.*, tendem a apresentar maior contribuição para o crescimento do milho em ambientes onde há menor disponibilidade de nitrogênio mineral ou condições edáficas mais restritivas, ou seja solos de fertilidade reduzida, como Londrina (PEDROSA et al., 2011; BALDANI et al., 1986). Nesse sentido, a contribuição da FBN torna-se mais expressiva em ambientes onde o solo oferece menos N disponível, o que explica por que os tratamentos com inoculantes igualaram ou superaram as testemunhas que dependeram exclusivamente de fertilizantes químicos (BREDA., 2019; ARAÚJO., 2014).

Segundo Taiz et al., (2017), temperaturas mais altas aceleram o metabolismo vegetal e aumentam a absorção de nutrientes, o que pode explicar por que a produtividade absoluta foi maior em Londrina, já que, segundo os

gráficos pluviométricos (Figura 2), Londrina apresenta temperaturas mínimas e máximas mais elevadas que as de Guarapuava. De acordo com Vallicrosa et al., (2025), regiões quentes, úmidas e com maiores níveis de deposição de N apresentam as maiores taxas de síntese de N. De modo geral, inferências abduativas sugerem que climas mais frios estão geralmente associados a níveis mais altos de estoques de N orgânico, mas menores rendimentos (VAN ES., 2024).

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a inoculação com *Herbaspirillum seropedicae*, aplicada isoladamente ou em associação com *Azospirillum sp.* e com a adubação nitrogenada, não provocou alterações significativas nas características morfológicas do milho. Esse comportamento indica a aceitação parcial da hipótese nula (H_0) em relação ao crescimento vegetativo da cultura. Por outro lado, a produtividade de grãos apresentou resposta dependente das condições ambientais, atendendo ao objetivo de avaliar os efeitos dos tratamentos sobre o crescimento e o suprimento de nitrogênio, o que respalda a aceitação parcial da hipótese alternativa (H_1).

No ambiente de Guarapuava, o tratamento Bac 3 proporcionou incremento expressivo na produtividade, sugerindo maior eficiência de *H. seropedicae* como promotora de crescimento em condições de menor disponibilidade de nitrogênio. Em Londrina, o tratamento Bac 2 apresentou desempenho superior, alcançando produtividade semelhante ou até superior à obtida com os produtos comerciais, evidenciando que a combinação entre *Azospirillum sp.* e *Herbaspirillum sp.* pode resultar em ganhos produtivos relevantes.

De forma geral, os resultados demonstram que os tratamentos Bac 3 e Bac 2 possuem potencial para aumentar a produtividade do milho, indicando sua viabilidade como alternativas biológicas promissoras para o incremento do rendimento. Assim, conclui-se que *Herbaspirillum seropedicae* apresenta potencial para integrar práticas sustentáveis de manejo do nitrogênio na cultura do milho, embora sua eficiência seja influenciada pelo ambiente, pelo manejo e pela adaptação das cepas. Dessa forma, reforça-se a necessidade de condução de experimentos em múltiplas regiões para validação e recomendação dos tratamentos.

8 REFERÊNCIAS

ANDERSON, Edgar. **The sacred plume: a description of the maize tassel with some indications of its importance**. Ithaca, NY: Pioneer Hi-Bred Corn Company, 1951.

BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D. History on the biological nitrogen fixation research in graminaceous plants: special emphasis on the Brazilian experience. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 77, n. 3, p. 549–579, 2005. DOI: 10.1590/S0001-37652005000300014.

BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D.; SELDIN, L.; DOBEREINER, J. Caracterização de *Herbaspirillum seropedicae* gen. nov., sp. nov., uma bactéria fixadora de nitrogênio associada à raiz. **Microbiology Society, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 36, n. 1, p. 86-93, 1986. DOI: 10.1099/00207713-36-1-86.

BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 637–642, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20140819.

BORÉM, Aluízio; GALVÃO, João Carlos Cardoso; PIMENTEL, Marcos Aurélio. **Milho do plantio à Colheita**. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. v. 1.

BREDA, F. A. F. **Crescimento e metabolismo de nitrogênio em milho inoculado com *Herbaspirillum seropedicae* e *Azospirillum brasilense***. 2018. 80 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo), Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, 2018.

BREDA, F. A. F. et al. Produtividade de milho na presença de doses de N e de *Herbaspirillum seropedicae*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1637–1645, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000100006.

BREDA, F. A. F.; SILVA, T. F. R.; SANTOS, S. G. et al. Modulação do metabolismo de nitrogênio em plantas de milho inoculadas com *Azospirillum brasilense* e *Herbaspirillum seropedicae*. **Archives of Microbiology**, v. 201, p. 547–558, 2019. DOI: 10.1007/s00203-018-1594-z.

BRUSAMARELLO-SANTOS, L. C. et al. Modulation of hormone pathways in rice by the endophytic diazotroph *Herbaspirillum seropedicae*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 118, p. 571–582, 2019.

BYERLEE, D. The globalization of hybrid maize, 1921-70. **Journal of Global History**, v. 15, n. 1, p. 101–122, 2015.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007.

CLARKE, D. E.; STOCKDALE, E. A.; HANNAM, J. A.; et al. Spatial–temporal variability in nitrogen use efficiency: Insights from a long-term experiment and crop simulation modeling to support site-specific nitrogen management. **European Journal of Agronomy**, v. 158, art. 127224, 2024.

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 669–678, 2010. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.11.024.

CONAB. **12º Levantamento - Safra 2024/25**. Brasília, 11 de set. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-degraos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/12o-levantamento-safra2024-25>.

CUNHA, E. T. D., PEDROLO, A. M., BUENO, J. C. F., PEREIRA, T. P., SOARES, C. R. F. S., ARISI, A. C. M. Inoculation of *Herbaspirillum seropedicae* strain SmR1 increases biomass in maize roots DKB 390 variety in the early stages of plant development. **Arch Microbiol.** 2022 Jun 8;204(7):373. DOI: 10.1007/s00203-022-02986-8. PMID: 35672591.

CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P.; ALVARENGA, R. C.; NETO, M. M. G.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F. De; SANTANA, D. P. **Circular Técnica: Manejo da Cultura do Milho**. 1. ed. Sete Lagos, MG: EMBRAPA, 2006. v. 1.

DARTORA, J.; GUIMARÃES, V. F.; MARINI, D.; SANDER, G. Adubação nitrogenada associada à inoculação com *Azospirillum* brasileiro e *Herbaspirillum seropedicae* na cultura do milho. **Revista Brasileira de**

Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 10, p. 1023–1029, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013001000001.

DUARTE, J. de O. **O milho se caracteriza por apresentar grande diversidade de usos**. Embrapa Milho e Sorgo, 08 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/mercado>.

EMBRAPA Milho e Sorgo. Cultivo do milho: **Ecofisiologia**. 9. ed., versão eletrônica. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015.

ERENSTEIN, O.; JALETA, M.; SONDER, K. et al. Produção, consumo e comércio global de milho: tendências e implicações para P&D. **Food Security**, v. 14, p. 1295–1319, 2022. DOI: 10.1007/s12571-022-01288-7.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 97–185, 2005. DOI: 10.1016/S0065-2113(05)88004-6.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

FIGUEIREDO, T.DE.O.V.; CARVALHO, A.M.; SANTANA, C.L.; COSER, T.R.; DANTAS, R.; PADILHA, O.F.; SILVA, R. R.; TIMÓTEO, L. G.; CÔRTEZ, M. C.; FIGUEIREDO, C.C.DE. **Decomposição de resíduos vegetais e nitrogênio mineral em solo no cerrado**. Cusco: Centro de Convenciones Municipalidad del Cusco, nov. de 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1014060/1/CongressoLatinoamericanoPeruanoCienciadoSolo13.pdf>.

GOMES, E. A.; PAIVA, C. A. O.; DIAS, F. E. S.; SANTOS, F. C. D.; MARRIEL, I. E. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Efeito da inoculação de bactérias solubilizadoras de fosfato sobre o crescimento de milheto (Pennisetum glaucum) fertilizado com fosfato de rochas**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2011. v. 1.

HALDAR, S.; SENGUPTA, S. Plant-microbe cross-talk in the rhizosphere: insight and biotechnological potential. **The Open Microbiology Journal**, 2015. DOI: 10.2174/1874285801509010001.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; MIRANDA FILHO, J. B. **Quantitative Genetics in Maize Breeding**. 3. ed. New York: Springer, 2010.

IMASUL, Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul; SEMADE, Secretaria de Estado de Meio Ambientes e Desenvolvimento Econômico. **Geoambientes da Faixa de Fronteira GTNF/MS**. 1. ed. Campo Grande, MS: Governo do Estado de Mato Grosso do Sul, 2016. v. 1.

IRINEU, L. d. S.; SOARES, C. d. P.; SOARES, T. S.; ALMEIDA, F. A. d.; ALMEIDA-SILVA, F.; GAZARA, R. K.; MENESES, C. H. S. G.; CANELLAS, L. P.; SILVEIRA, V.; VENÂNCIO, T. M.; OLIVARES, F. L. Abordagens multiômicas revelam modulação hormonal e absorção e assimilação de nitrogênio no crescimento inicial de milho inoculado com *Herbaspirillum seropedicae*. **Plants**, v. 12, n. 1, p. 48, 2023. DOI: 10.3390/plants12010048.

KAPPES, C.; ARF, O.; ANDRADE, A. C. A. Effects of cover crops, soil management and nitrogen rates on nutritional and agronomic attributes of maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1296–1307, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000500021.

LOPES, L. H. d. O.; FARIAS, C. M. B. d. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Petrolina: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária – MAARA; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA; Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido – CPA TSA, 1995.

MAGALHÃES, P. C.; DURÕES, F. O. M. **Circular técnica: Fisiologia da Produção de Milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2006.
v. 1

MARIN, V. A.; BALDANI, V. L. D.; TEIXEIRA, K. R. S.; BALDANI, J. I. **Fixação Biológica de Nitrogênio: Bactérias Fixadoras de Nitrogênio de Importância para a Agricultura Tropical**. Seropédica: Embrapa-CNPAB, 1999.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam: Academic Press, 2012.

MARTINS, A. O.; CAMPOSTRINI, E.; MAGALHÃES, P. C.; GUIMARÃES, L. J. M.; DURÃES, F. O. M.; MARRIEL, I. E.; NETTO, A. T. Nitrogen-use efficiency

of maize genotypes in contrasting environments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 8, n. 4, p. 291–298, 2008.

MEDEIROS, F. J. de; OLIVEIRA, C. P. de; AVILA-DIAZ, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: from CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, 01 dez. 2022.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. d. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do Paraná**. 1. ed. Londrina-PR: Instituto Agrônômico do Paraná, 2019. v. 1.

OLIVEIRA, J. G. R. D.; SILVA, F. C. M. D.; VENDRAME, P. R. S.; BARBOSA, G. M. D. C.; OLIVEIRA, J. F. D.; FILHO, O. G.; RIBEIRO, L. D. O.; SILVA, A. C. D.; ALIEVI, A. A. **Conhecendo os solos das mesorregiões norte central e norte pioneiro do Paraná**. 1. ed. Cornélio Procópio, PR: NEPAR-SBCS, 2024. v. 1.

PAGLIARINI, N. H. F.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L.; VIERO, F.; BAYER, C.; CHIBA DA SILVA, B. T. Uso de nitrogênio em milho. **Revista Cultivar**, 30 jan. 2023. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/uso-de-nitrogenio-em-milho>.

PAIVA, C.T. C. **Cultivo de milho em plantio direto e convencional com diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura**. Rio Branco: UFAC, 2011. 33f.

PEDROSA, F. O.; MONTEIRO, R. A.; WASSEM, R.; CRUZ, L. M.; AYUB, R. A. et al. Genome of *Herbaspirillum seropedicae* strain SmR1, a specialized diazotrophic endophyte of tropical grasses. **PLoS Genetics**, v. 7, n. 5, e1002064, 2011. DOI: 10.1371/journal.pgen.1002064.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTRELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. 1. ed. Guaíba: Agropecuaria, 2002. v. 1.

PEREIRA FILHO I. A.; CRUZ, J. C. Práticas culturais do milho. In: EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação (Brasília, DF). **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília, DF, 1993. p.113- 127.

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de Estatística Experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000.

PIPERNO, D. R.; FLANNERY, K. V. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: new accelerator mass spectrometry dates and their implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 98, n. 4, p. 2101–2103, 2001. DOI: 10.1073/pnas.98.4.2101.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

REZAEI, E. E. et al. Climate change impacts on crop yields. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, n. 12, p. 831–846, 2023. DOI: 10.1038/s43017-023-00491-0.

SCHMILDT, E. R.; CRUZ, C. D.; ZANUNCIO, J. C.; PEREIRA, P. R. G.; FERRÃO, R. G. Avaliação de métodos de correção do estande para estimar a produtividade em milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, p. 1011–1018, 2001.

SCHULTZ, C. R.; BRANTLEY, K. M.; WALLACE, J. G. The role of genetic variation in *Zea mays* response to beneficial endophytes. **Plant Growth Regulation**, v. 98, p. 167-177, 2022. DOI:10.1007/s10725-022-00842-9.

SILVA, A. N. D.; SCHONINGER, E. L.; TRIVELIN, P. C. O.; DOURADO-NETO, D.; PINTO, V. M.; REICHARDT, K. Maize Response to Nitrogen: Timing, Leaf Variables and Grain Yield. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 1, p. 85-95, 2017. DOI: 10.5539/jas.v9n1p85.

SMITH, C. Wayne; BETRÁN, Javier; RUNGE, Edward C. A. **Corn: Origin, History, Technology, and Production**. Hoboken, NJ: Wiley, 2004. v. 1

SONG, G.; LU, Y.; WANG, Y.; NIE, C.; XU, M.; WANG, L.; BAI, Y. Analysis of metabolic differences in maize in different growth stages under nitrogen stress based on UPLC-QTOF-MS. **Front Plant Sci.** 2023 Apr 3;14:1141232. DOI: 10.3389/fpls.2023.1141232.

SOUZA, R. D.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L. M. P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v. 38, n. 4, p. 401–419, 2015. DOI: 10.1590/S1415- 475738420150053.

SOUZA, J. S.; MARTINS, A. F.; PEDROSA, L. M. Importância de bactérias fixadoras de nitrogênio no cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.).

Scientific Electronic Archives, v. 14, n. 9, p. 1–8, set. 2021. DOI: 10.36560/14920211456.

SPOLAOR, L. T.; GONÇALVES, L. S. A.; SANTOS, O. J. A.; OLIVEIRA, A. L. M. **Bactérias promotoras de crescimento associadas à adubação nitrogenada de cobertura no desempenho agrônômico de milho pipoca**. *Bragantia*, v. 75, n. 1, p. 33-40, 2016. DOI: 10.1590/1678-4499.330.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. v. 6. Porto Alegre: Artmed, [s.d.].

TANUMIHARDJO, S. A. et al. Maize agro-food systems to ensure food and nutrition security in reference to the Sustainable Development Goals. **Global Food Security**, Elsevier B.V., 01 jun. 2020.

THANT, K. P.; NGWE, K.; MOE, K.; WIN, T. Effects of Nitrogen Fertilizer Rates on Yield and Yield Components of Maize (*Zea mays* L.). **Asian Soil Research Journal**, v. 8, n. 2, p. 1–8, 2024. DOI: 10.9734/asrj/2024/v8i2146.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World agricultural supply and demand estimates**. 14 nov. 2025. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde1125.pdf>.

VAN DEYNZE, A. et al. Nitrogen fixation in a landrace of maize is supported by a mucilage-associated diazotrophic microbiota. **Science**, v. 360, p. 968–971, 2018.

VAN ES, H. Fatores climáticos frios no manejo de nitrogênio para o milho. **Agriculture**, v. 14, p. 85, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14010085.

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. A utilização e os papéis do nitrogênio nas plantas. **Forests**, v. 15, p. 1191, 2024. DOI: 10.3390/f15071191.

ZHANG, H. et al. Abiotic stress responses in plants. **Nature Reviews Genetics**, v. 23, n. 2, p. 104–119, 2022. DOI: 10.1038/s41576-021-00413-0.

ZHANG, L., ZHAO, Z., JIANG, B., BAOYIN, B., CUI, Z., WANG, H., LI, Q., & CUI, J. (2024). Effects of Long-Term Application of Nitrogen Fertilizer on Soil

Acidification and Biological Properties in China: A Meta-Analysis. **Microorganisms**, 12(8), 1683. DOI: 10.3390/microorganisms12081683

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLÈRE, D.; HAVLÍK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M. A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 740, p. 139384, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139384.