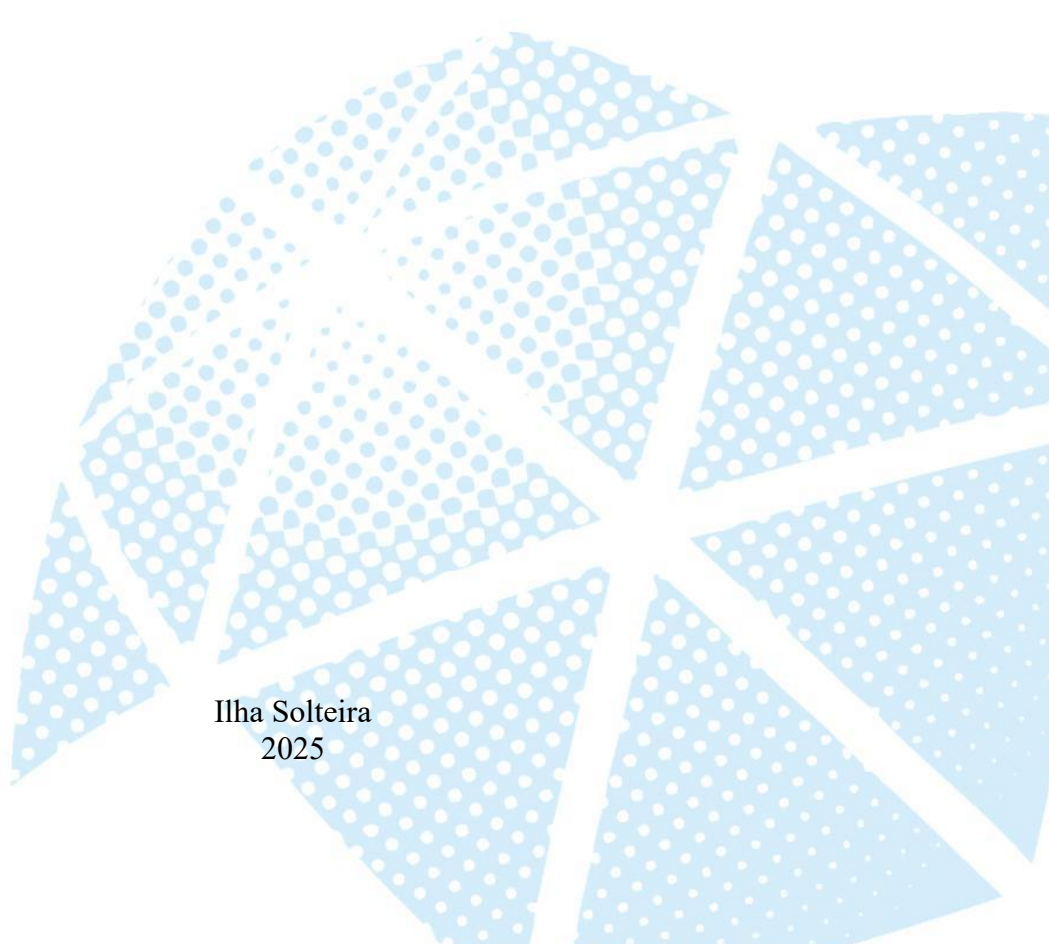


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LEILANE BERNARDES FREITAS

**DOSES DE NITROGÊNIO (^{15}N) E COINOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS
PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DO TRIGO EM REGIÃO DE
CERRADO**



Ilha Solteira
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – SISTEMAS DE
PRODUÇÃO

LEILANE BERNARDES FREITAS

**DOSES DE NITROGÊNIO (^{15}N) E COINOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS
PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DO TRIGO EM REGIÃO DE
CERRADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Coorientador: Dr. Edson Cabral da Silva

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

F866d Freitas, Leilane Bernardes.
Doses de nitrogênio (^{15}N) e coinoculação com bactérias promotoras de crescimento na cultura do trigo em região de Cerrado / Leilane Bernardes Freitas. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
72 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidades: Sistemas de Produção, 2025

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Coorientador: Edson Cabral da Silva

Inclui bibliografia

1. *Azospirillum brasilense*. 2. *Bacillus subtilis*. 3. *Pseudomonas fluorescens*. 4. Adubação nitrogenada. 5. ^{15}N . 6. *Triticum aestivum* L.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O uso do isótopo estável ^{15}N aprimora a precisão na avaliação da origem do nitrogênio na planta. A adubação nitrogenada associada ao uso de bactérias promotoras de crescimento otimiza a eficiência de uso do N, elevando a produtividade de grãos, promovendo inovação e menor impacto ambiental no cultivo de trigo.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The use of the stable isotope ^{15}N improves the accuracy in assessing the source of nitrogen in the plant. Nitrogen fertilization associated with the use of plant growth-promoting bacteria optimizes the N use efficiency, increasing grain productivity, promoting innovation and lower environmental impact in wheat cultivation.

IMPACTO POTENCIAL DE ESTA INVESTIGACIÓN

El uso del isótopo estable ^{15}N mejora la precisión en la evaluación de la fuente de nitrógeno en la planta. La fertilización nitrogenada asociada al uso de bacterias promotoras del crecimiento optimiza la eficiencia de uso del N, incrementando la productividad del grano, promoviendo la innovación y un menor impacto ambiental en el cultivo de trigo.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Doses de nitrogênio (15N) e coinoculação com bactérias promotoras de crescimento na cultura do trigo em região de Cerrado

AUTORA: LEILANE BERNARDES FREITAS

ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO

COORDENADOR: EDSON CABRAL DA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, área:
Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

A handwritten signature in blue ink, reading "Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho".

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente



CARLOS EDUARDO DA SILVA OLIVEIRA

Data: 12/08/2025 10:13:58-0300

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

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO DA SILVA OLIVEIRA (Participação Virtual)

Departamento de Agronomia / Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

Profª Drª ELISANGELA DUPAS (Participação Virtual)

Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados

Ilha Solteira, 11 de julho de 2025

A Deus, fonte de toda sabedoria e força, por ter me sustentado com garra, e fé todos os dias. A Ele, minha eterna gratidão, por me capacitar e permitir chegar até aqui. Ao meu marido, Allan de Souza, que me deu todo suporte para que eu pudesse desenvolver este projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa jornada tive muitas pessoas presentes ao meu lado, me ajudando a caminhar, a trilhar meu sonho. Finalizo essa etapa com o sentimento de gratidão por tudo e por todos, saibam que essa vitória é nossa, **NENHUMA BATALHA É VENCIDA SOZINHA!**

Primeiramente, agradeço a Jesus, meu bom Deus, que com sua infinita bondade me sustentou todos os dias, com saúde mental e física; com força e muita dedicação e por ter iluminado todos meus passos. Nunca foi sorte, sempre foi Deus!

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, e Coorientador Dr. Edson Cabral da Silva, por todos os ensinamentos, paciência e por me permitir aprender um pouco do que tanto sabem. Por todos os momentos de compreensão, pelas valiosas e incontáveis horas dedicadas ao projeto. Vocês me inspiram!

Ao meu marido, Allan de Souza Silveira, por me apoiar, incentivando-me a não desistir com suas palavras de carinho e amor. Te amo!

Ao meu avô, Osvaldo Linhares, que sempre me manteve em suas orações, te amo!

Aos meus pais, Zilanda Linhares e Veneir Bernardes, ao meu irmão Jean Freitas Bernardes, por todos os ensinamentos e pelo meu caráter. Vocês são tudo para mim!

À minha sogra, Zélia Ferreiras, pela disponibilidade do seu tempo para me ajudar fazendo minha comidinha, me dando apoio moral e pelos momentos de lazer. Gratidão!

Ao grupo de Pesquisa e Extensão em Nutrição de Plantas – PENPILHA – vocês fazem parte desta conquista, “o caminho é individual, mas a caminhada é coletiva.”

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), que estiveram sempre presentes nos auxiliando e ajudando muito no campo.

Aos meus amigos de longe e de perto, que sempre estão dispostos a me ouvir e me apoiar.

À CAPES por financiar e acreditar no meu projeto - “O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”. O projeto teve, ainda, como instituições parceiras o Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP e a International Atomic Agency FAO/IAEA (Project RLA 5090), às quais reiteramos nossa Gratidão.

À UNESP pela possibilidade de fazer parte dessa grande família.

Agradeço à banca examinadora, que disponibilizaram tempo para contribuir com a minha formação.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem sucedidos.” Provérbios 16:3

“Não olhe apenas para quão longe terá de ir, mas para quão longe já chegou”. Joyce Meyer (2011, p. 189)

“Ser forte não significa exercitar os músculos. Significa encontrar seu próprio brilho sem fugir, vivendo ativamente com a natureza selvagem de uma maneira própria. Significa ser capaz de aprender, ser capaz de defender o que sabemos. Significa se manter e viver.” Clarissa Pinkola (1992)

“Quem não é favorável ao trigo nacional, não é merecedor do pão nosso de cada dia.”

Solenidade de abertura da VII Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, Londrina - PR, 27 a 30 de agosto de 2013

Arf (2024), Disciplina de Cultura de Cereais.

RESUMO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é o segundo cereal mais cultivado no mundo, com produção mundial de 789,1 milhões de toneladas. No Brasil, para suprir a demanda nacional, a maior parte do trigo consumido é importado. Com perspectiva de propiciar, a médio prazo, a autossuficiência na produção nacional, faz-se necessário a busca por tecnologias que visem uso moderado de fertilizantes minerais e defensivos agrícolas, de baixo custo econômico e de maior sustentabilidade. Nesse aspecto, o uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) associadas a doses de nitrogênio (N) em trigo é uma estratégia promissora para o uso eficiente de fertilizantes, visto que o cereal desempenha papel estratégico e nutricional na segurança alimentar e na economia mundial. O N é o nutriente requerido em maior quantidade e essencial para o crescimento de culturas anuais, cuja adubação suplementar de N é necessária para atender às demandas das culturas. Aliadas à redução de dependência de adubos minerais, há a busca por estratégias que otimizem a eficiência do uso do nitrogênio (EUN). Neste contexto, as BPCPs, vem sendo estudadas por sua capacidade de estimular o crescimento vegetal por meio de múltiplos mecanismos, como aumento da disponibilidade e absorção de nutrientes, produção de fitormônios, sideróforos e enzimas. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da inoculação, via semente, com *Azospirillum brasilense* aplicada isoladamente ou em associação com *Bacillus subtilis* ou *Pseudomonas fluorescens*, combinadas a doses de N (ureia enriquecida com ^{15}N , com uso da técnica isotópica de ^{15}N) sobre o desenvolvimento, nutrição, acúmulo de nutrientes, produtividade de grãos, EUN de trigo irrigado. O experimento foi conduzido em Selvíria-MS, Brasil, no ano agrícola 2022/23, em Latossolo Vermelho distroférico, sob sistema plantio direto, utilizando-se a cultivar BRS 264. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x5, com quatro repetições. Os tratamentos foram: 1) *Azospirillum brasilense*; 2) *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*; 3) *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* e 4) Testemunha (sem inoculação de BPCPs), combinadas com cinco doses de N: 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹, aplicadas em cobertura. Foram realizadas avaliações biométricas, nutricionais, avaliações dos atributos físicos e químicos do solo; análises biométricas de crescimento das culturas; perfilhamento; estado nutricional no florescimento; componentes de produção; produtividade de grãos; extração (planta inteira), exportação (grãos) e retorno de macronutrientes e micronutrientes ao solo pela palha (restos culturais) e análises isotópicas. As determinações isotópicas de ^{15}N , foram realizadas no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos softwares SAS 9.2. A dose de 113 kg ha⁻¹ de N proporcionou a máxima produtividade de grãos, estimada em 6.007 kg ha⁻¹, sendo a produtividade média de grãos 5.472

kg ha⁻¹. A extração total de nutrientes pela planta seguiu a seguinte ordem: N > K > Ca > P > Mg > S > Fe > Mn > Zn > Cu > B. As inoculações com *A. brasilense*, especialmente em coinoculação com *P. fluorescens*, proporcionaram maiores produtividades de grãos. A eficiência do uso do N-fertilizante ou recuperação pelo trigo foi, em média, de 45,34% da dose aplicada, sendo 35,53% direcionados aos grãos e 9,81% na palha. Independentemente das doses de N e inoculação, a principal fonte de N para planta foi o solo (77,1%), enquanto o fertilizante contribuiu apenas com 22,9%. Assim, os resultados demonstraram que a integração entre adubação nitrogenada e o uso de BPCPs pode otimizar o aproveitamento do N, reduzir perdas e promover maior eficiência do N advindo dos fertilizantes.

Palavras-chave: *Azospirillum brasilense*; *Bacillus subtilis*; *Pseudomonas fluorescens*; adubação nitrogenada; ¹⁵N; *Triticum aestivum* L.

ABSTRACT

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is the second most cultivated cereal worldwide, with a global production of 789.1 million tons. In Brazil, to meet domestic demand, most of the wheat consumed is imported. With the prospect of achieving national self-sufficiency in the medium term, it is necessary to pursue technologies that enable moderate use of mineral fertilizers and pesticides, with lower economic cost and greater sustainability. In this context, the use of plant growth-promoting bacteria (PGPBs) associated with nitrogen (N) fertilization in wheat represents a promising strategy for improving fertilizer use efficiency, given the strategic and nutritional role of this cereal in food security and the global economy. Nitrogen is the most required nutrient and is essential for the growth of annual crops, whose supplemental fertilization is necessary to meet crop demands. Along with reducing dependency on mineral fertilizers, there is an increasing need for strategies that enhance nitrogen use efficiency (NUE). Within this framework, PGPBs have been studied for their ability to stimulate plant growth through multiple mechanisms, such as increasing nutrient availability and uptake, and producing phytohormones, siderophores, and enzymes. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effects of seed inoculation with *Azospirillum brasilense* applied singly or in combination with *Bacillus subtilis* or *Pseudomonas fluorescens*, together with N doses (urea enriched with ^{15}N , using the ^{15}N isotopic technique), on growth, nutrition, nutrient accumulation, grain yield, and NUE in irrigated wheat. The experiment was carried out in Selvíria, MS, Brazil, during the 2022/23 growing season, in a dystroferic Oxisol, under a no-tillage system, using the cultivar BRS 264. The experimental design was a randomized block in a 4×5 factorial scheme, with four replications. Treatments consisted of: 1) *Azospirillum brasilense*; 2) *A. brasilense* + *Pseudomonas fluorescens*; 3) *A. brasilense* + *Bacillus subtilis*; and 4) Control (without PGPBs inoculation), combined with five N rates: 0, 30, 60, 120, and 180 kg ha $^{-1}$, applied as topdressing. Biometric and nutritional evaluations were performed, as well as assessments of soil physical and chemical attributes; biometric analyses of crop growth; tillering; nutritional status at flowering; yield components; grain yield; extraction (whole plant), export (grains), and return of macro and micronutrients to the soil via straw (crop residues); and isotopic analyses. The ^{15}N isotopic determinations were performed at the Center for Nuclear Energy in Agriculture (CENA/USP). Statistical analyses were carried out using SAS 9.2 software. The N rate of 113 kg ha $^{-1}$ provided the maximum grain yield, estimated at 6,007 kg ha $^{-1}$, while the mean grain yield was 5,472 kg ha $^{-1}$. Total nutrient extraction by the plant followed the order: N > K > Ca > P > Mg > S > Fe > Mn > Zn > Cu > B. Inoculations with *A.*

brasilense, especially when co-inoculated with *P. fluorescens*, resulted in higher grain yields. Nitrogen fertilizer use efficiency, or recovery by wheat, averaged 45.34% of the applied dose, with 35.53% allocated to grains and 9.81% to straw. Regardless of N rates and inoculation, the main N source for plants was the soil (77.1%), while fertilizer contributed only 22.9%. Thus, the results demonstrated that integrating nitrogen fertilization with PGPB inoculation can optimize N utilization, reduce losses, and promote greater efficiency of fertilizer-derived N.

Keywords: *Azospirillum brasilense*; *Bacillus subtilis*; *Pseudomonas fluorescens*; nitrogen fertilization; ^{15}N ; *Triticum aestivum* L.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
	2.1 ASPECTOS ECONÔMICOS E GERAIS DA CULTURA DO TRIGO.....	14
	2.2 ADUBAÇÃO NITROGENADA	15
	2.3 BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO EM PLANTAS (BPCPs)	16
	2.4 ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE ¹⁵ N	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	LOCAL E ÁREA EXPERIMENTAL	19
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	21
3.3	AVALIAÇÕES E ANÁLISES.....	23
3.4	PREPARO DE AMOSTRAS E ANÁLISES ISOTÓPICAS	25
3.5	EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO (EUN)	26
3.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	ANÁLISES BIOMÉTRICAS, ÍNDICE DE CLOROFILA FOLIAR (ICF)/ ÍNDICE SPAD E COMPONENTES PRODUTIVOS	28
4.2	ANÁLISE NUTRICIONAL FOLIAR	32
4.3	EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES	40
4.4	EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DO FERTILIZANTE (¹⁵N) E DO SOLO PELC TRIGO IRRIGADO SOB INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E ADUBAÇÃO NITROGENADA	47
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é o segundo cereal mais cultivado no mundo, com produção mundial de 789,1 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2024), sendo responsável por 19% das calorias na dieta humana global. O cereal é rico em carboidratos e tem maior teor de proteínas que outros cereais importantes como o arroz, milho e centeio (Liu *et al.*, 2018). A produção de trigo desempenha um papel estratégico nutricional, na segurança alimentar e na economia mundial, visando atender à crescente demanda global por alimentos de forma sustentável e produtiva (Li *et al.*, 2020).

O nitrogênio (N) é o nutriente mais limitante e requerido para o crescimento de culturas anuais não leguminosas como o trigo, cuja adubação suplementar de N é frequentemente necessária para atender à alta demanda da cultura (Teixeira Filho *et al.*, 2014). Assim, a fertilização nitrogenada é fundamental no aumento da produção e da qualidade dos grãos deste cereal (Hussain *et al.*, 1996), sendo a ureia a principal fonte deste nutriente empregada nessa cultura. Parte das exigências em relação ao nitrogênio, pode ser suprida pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada pelas BPCPs (Andraus *et al.*, 2013), sendo uma alternativa na triticultura e no milho, mesmo que seja necessária aplicação via fertilizante de parte do N requerido pela planta, para que a produtividade seja satisfatória (Salvo *et al.*, 2018).

A inoculação com as BPCPs via sementes, permite o fornecimento de N para as plantas, através da fixação biológica de nitrogênio (FBN), promove maior absorção de nutrientes por proporcionar maior desenvolvimento de raízes; e consequentemente o aumento da produtividade (Alves *et al.*, 2016). É uma estratégia adotada que como resultado pode propiciar incremento da produtividade, melhoria na proteção de plantas contra alguns patógenos e pragas, além de redução dos custos de produção (Hungria *et al.*, 2016). Deste modo, pesquisas validaram que o uso de BPCPs é uma estratégia eficaz para estimular o crescimento da cultura do trigo, melhorar a tolerância ao estresse abiótico (Backer *et al.*, 2018); estimular o crescimento radicular, conferindo maior resistência as secas; maior nodulação e maior FBN (Campos *et al.*, 2014), o que permite reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados e mitigar a poluição dos recursos naturais no cultivo de trigo (Gu *et al.*, 2015).

O uso de isótopos estáveis em pesquisas agronômicas tem se mostrado ferramenta inovadora e altamente confiável para entender, de forma mais precisa, a dinâmica dos nutrientes no solo e sua absorção pelas plantas. Ao empregar fontes enriquecidas (marcadas), como o ^{15}N -ureia, é possível rastrear com exatidão a origem e destino dos nutrientes, distinguindo o que foi absorvido do fertilizante e do solo (+ de outras fontes), como da FBN. Desta maneira, é possível

avaliar de forma detalhada a eficiência de diferentes práticas de manejo, como de adubações e inoculantes (Scheer *et al.*, 2023). Isso permite otimizar perdas e promover agricultura mais sustentável e produtiva (Gaspar, 2017).

O trigo é altamente exigente em nitrogênio e sua produtividade está fortemente associada à disponibilidade deste nutriente (Ma *et al.*, 2024), logo, com o uso de ^{15}N é possível medir exatamente quanto do N-fertilizante aplicado foi absorvido pela planta e quanto advém do solo e de outras fontes; portanto, permite comparar tratamentos com e sem inoculação de BPCPs, avaliando se a inoculação favorece a alocação de N nos grãos. Além disso, o teor de proteína no grão está diretamente ligado à disponibilidade e remobilização de N durante a fase reprodutiva (Zhou *et al.*, 2018), logo com esta tecnologia, é possível rastrear o N translocado da palha para os grãos, possibilitando também mensurar quanto do N aplicado permanece no sistema solo-planta (Jia *et al.*, 2023).

Embora diversos estudos já tenham sido relatados na cultura do trigo sobre os efeitos da inoculação na redução do uso de fertilizantes nitrogenados, na Região de Cerrado brasileiro e associados ao uso da técnica isotópica de ^{15}N , ainda são escassos. Parte-se então, da hipótese de que esta técnica permiti mensurar com precisão a origem do N e que o uso das BPCPs combinadas a doses de N possibilita reduzir o uso de fertilizantes, potencializando a FBN no trigo, em busca de uma agricultura mais sustentável, condizente com ODS 2 dos objetivos para um desenvolvimento sustentável.

Portanto, o objetivo com esta pesquisa foi caracterizar o efeito da adubação nitrogenada (doses de N, ^{15}N) associadas à inoculação de *Azospirillum brasilense*, *A. brasilense* + *Bacillus subtilis* e *A. brasilense* + *Pseudomonas fluorescens* em sementes de trigo, na nutrição de plantas, parâmetros agronômicos, produtividade de grãos, acúmulo de nutrientes e na eficiência de uso nitrogênio (NUE), com uso da técnica isotópica de ^{15}N , sob sistema plantio direto na região de Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS ECONÔMICOS E GERIAS DA CULTURA DO TRIGO

Triticum aestivum L. é uma espécie da família *Poaceae*, amplamente cultivado no mundo todo, sendo um dos cereais presentes na alimentação diária dos brasileiros. Matéria-prima principal para a produção de farinha, o trigo apresenta elevada capacidade para panificação, produção de massas entre outros. Segundo dados da FAO (2024), a produção mundial de trigo ultrapassou 789 milhões de toneladas, sendo os maiores produtores China, Índia e Rússia.

Conforme o 9º levantamento da CONAB (2025), a previsão de produção da safra de trigo nacional para 2025, é de 8.1952,4 mil toneladas, representando aumento de 3,8% em relação à safra anterior, tendo uma área total cultivada de 2.672,3 mil hectares e produtividade estimada de 3.066 kg ha⁻¹. Economicamente, o trigo possui elevada demanda industrial e seu preço é influenciado por fatores como custos de produção, variações climáticas, produtividade e qualidade do grão, a exemplo da massa hectolétrica.

No Brasil, a produção tritícola concentra-se nas regiões do Sul e Centro-Oeste, sendo os principais produtores os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, que juntos detêm de mais de 80% da produção nacional (CONAB, 2024), porém áreas das regiões Sudeste e do Centro-Oeste, em que predomina o bioma Cerrado, vem ganhado destaque, graças às suas condições favoráveis ao cultivo de trigo no período da safrinha (sequeiro) e irrigado no outono inverno, com grande potencial produtivo.

Como demonstrado anteriormente, a produtividade média nacional varia em torno de 2.800 a 3.200 kg ha⁻¹, porém em regiões irrigadas do Cerrado, esta produtividade tem sido superada, alcançando valores de produtividade superiores a 5.000 kg ha⁻¹, mostrando que o manejo adequado é capaz de explorar o alto valor produtivo da cultura (EMBRAPA, 2021). Assim, esta expansão tem sido viabilizada pelo uso de tecnologias adaptadas, como cultivares de ciclo precoce, irrigação, manejo de solos tropicais, adoção do sistema plantio direto (SPD), que proporcionam melhor conversação do solo, eficiência no uso da água e equilíbrio do sistema solo-planta.

Apesar de todo potencial produtivo, o Brasil não é autossuficiente na produção dos grãos de trigo e não supri a demanda interna pelo grão (Noia Júnior *et al.*, 2024), precisando importar cerca de quatro milhões para atender ao consumo interno no país. Diante disso, a adoção de tecnologias adaptadas as diferentes regiões do país, como cultivares resistentes e tolerantes a

estresses bióticos e abióticos (seca, pragas e doenças); integração entre os manejos e tecnológicas de base biológicas, podem contribuir para aumentar a competitividade da triticultura nacional, reduzindo a dependência externa, promovendo sustentabilidade econômica e ambiental da produção.

O trigo tem seus custos de produção fortemente impactados pelos preços dos insumos, sobretudo de fertilizantes nitrogenados, que podem responder por mais de 30% do custo total (EMBRAPA, 2023). A escala fenológica de Zadoks para o trigo (1974), auxilia na definição de manejos no momento correto, como a aplicação de N, controle de doenças, irrigação, o que torna a produção mais eficiente, econômica e sustentável.

2.2 ADUBAÇÃO NITROGENADA

O trigo apresenta alta exigência em nitrogênio, principalmente durante as fases de perfilhamento e enchimento de grãos, em que o nutriente participa ativamente da formação de proteínas, incluindo as frações do glúten responsáveis pela qualidade da farinha (Watanabe, 2014). Segundo Bauer e Von Wiren (2020), a aplicação de N durante o perfilhamento (estádios Zadoks 2.0-2.9) influencia diretamente a emissão de perfilhos, o que futuramente impactará no número de espigas por m², variável de suma importância na composição da produtividade. Zhang *et al.* (2025), demonstraram também que o fracionamento da adubação melhora a eficiência de uso do N e resulta em maior acúmulo de biomassa e produtividade de grãos.

A fertilização nitrogenada tem impacto direto sobre o teor e o tipo de proteína presente nos grãos. Godfrey *et al.* (2010), demonstraram que aplicações suplementares de N na fase reprodutiva aumentaram o teor de gliadinas e gluteninas – frações proteicas responsáveis pela força do glúten e, conseqüentemente, pela qualidade da farinha, sendo que o equilíbrio entre oferta de N e demanda fisiológica da planta, é crucial tanto para a produtividade quanto para a qualidade.

Outro ponto importante, é a capacidade da planta de trigo em translocar o N dos tecidos vegetativos (como palha), para os grãos, durante a fase de enchimento. Segundo Barbottin *et al.* (2005), este processo pode representar até 75% do total de N nos grãos, reforçando, assim, a importância do bom estado nutricional durante o ciclo, especialmente nas fases iniciais, para que a planta tenha reserva suficiente para suprir a demanda de formação dos grãos.

Por outro lado, o excesso de N pode resultar em perdas por volatilização, lixiviação ou acúmulo em excesso do nutriente nos tecidos vegetais, o que aumenta o risco de acamamento

e reduz a eficiência do uso de N. Por isso, a adoção de tecnologias como uso de BPCPs associadas a doses de N, tem sido amplamente estudada para otimizar o manejo da adubação nitrogenadas na cultura do trigo.

2.3 BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO EM PLANTAS

O uso de bactérias promotoras de crescimento em plantas na agricultura, representa uma das estratégias mais promissoras de produção sustentável. Estes microrganismos conhecidos como benéficos, vivem na rizosfera, sobre a superfície ou interior das plantas e são capazes de estimular o crescimento vegetal por meio de diversos mecanismos biológicos diretos e indiretos (Beneduzi *et al.*, 2012).

Algumas BPCPs, como *Azospirillum brasiliense* são capazes de fixar nitrogênio atmosférico (N_2), convertendo-o em formas assimiláveis para as plantas (NH_4^+), este processo é denominado de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) (Hungria *et al.*, 2010). Diversos microrganismos benéficos, produzem substâncias que regulam o crescimento vegetal, conhecidos como produção de fitormônios, sendo estas auxinas (estimulam o alongamento e ramificação das raízes), citocininas (promovem divisão celular), giberelinas (aceleram a germinação e o desenvolvimento) (Vejan *et al.*, 2016).

Amplamente reconhecido na agricultura como BPCPs, *Bacillus subtilis* tem a capacidade de melhorar a nutrição, crescimento e defesa das plantas. Diversos estudos tem evidenciado que *B. subtilis* atua na solubilização de nutrientes, aumentando a eficiência de absorção pelas plantas (Ansabayeva *et al.*, 2025; Saeed *et al.*, 2021). Além disso, são capazes de produzir sideróforos, realizam atividade antagônica contra patógenos, mediado pela produção de surfactina, que inibem o crescimento de fungos fitopatogênicos. E ainda, podem induzir a resistência sistêmica ativando vias hormonais relacionadas ao ácido jasmônico e etileno, o que fortalece o sistema de defesa vegetal contra ataques de doenças (Kloepper *et al.*, 2024).

Semelhante aos efeitos das demais bactérias já mencionadas, *Pseudomonas fluorescens* desempenha um papel de suma importância na disponibilidade e absorção de nutrientes, como fosfato. Na agricultura, é bastante difundida por sua eficácia no controle biológico de patógenos e por reduzir a gravidade de doenças (Ganeshan *et al.*, 2005). Além disso, estes microrganismos benéficos, estimulam o enraizamento; auxiliam no metabolismo de carboidratos, melhoram absorção de N, P e K (Ai *et al.*, 2025) e degradam herbicida metribuzina no solo, reduzindo seus efeitos negativos sobre cultivares de trigo (Ahmadi *et al.*, 2025).

As BPCPs em geral, ajudam a solubilizar nutrientes pouco disponíveis no solo, como P, K, Ca e Zn, o que aumenta eficiência do uso de fertilizantes; produzem sideróforos que capturam Fe dos ambientes (Tortora *et al.*, 2011) e os torna disponível para as plantas. Também, promovem atividade antagônica contra patógenos, produzindo antibióticos naturais ou competem com patógenos por espaço e nutrientes na rizosfera, o que reduz a incidência de doenças e induz a resistência sistêmica (ISR) (Tripathi *et al.*, 2020), processo no qual ativam as defesas naturais da planta, como se fossem uma “vacina”.

A fim de potencializar os efeitos benéficos das diferentes bactérias, é realizada a prática de aplicar duas ou mais espécies de BPCPs, fazendo associação destas. Esta prática é conhecida como coinoculação de bactérias, e por meio da ação sinérgica de mecanismos distintos e complementares, estimulam melhores resultados no desenvolvimento das plantas. Cada microrganismo além de ter características em comuns, também possuem habilidades específicas, que são passíveis de combinação, propiciando assim alguns benefícios.

Dentre as combinações mais comuns em trigo, tem-se *A. brasiliense* combinada a *P. fluorescens* ou *B. subtilis*. Associadas, estes microrganismos tem a capacidade de fixar nitrogênio, solubiliza fósforo, maior aproveitamento de N, P, K, Ca, Zn e Fe, elevando os teores foliares e a eficiência do uso de fertilizantes (Rodríguez e Fraga, 1999; Martins *et al.*, 2018).

A partir dessas premissas, a associação das BPCPs, são estudadas justamente como alternativa para reduzir a dependência de adubação nitrogenada, pois suas combinações atuam de forma sinérgica em diferentes mecanismos, como: FBN, reduzindo a necessidade de aporte de N via fertilizante químico; produção de fitormônios estimulando a emissão e alongamento de raízes, melhorando eficiência da absorção de nutrientes; solubilização e mobilização de nutrientes, na liberação de sideróforos; e indução de resistência sistêmica e equilíbrio hormonal, reduzindo o estresse biótico e abiótico, permitindo que a planta utilize melhor o N fornecido pelo solo e biologicamente (Teixeira Filho e Galindo, 2019).

2.4 ISÓTOPO ESTÁVEL DE ^{15}N

O enriquecimento de fontes nitrogenadas em ^{15}N é uma técnica isotópica de rastreamento, utilizada em estudos de fertilidade do solo e nutrição de plantas, baseada na aplicação de fertilizantes nitrogenados enriquecidos com o isótopo estável ^{15}N , cuja abundância natural na atmosfera é de apenas 0,3663%. Ao utilizar uma fonte enriquecida, torna-se possível diferenciar o nitrogênio derivado do fertilizante daquele proveniente do solo ou de outras fontes,

isso porque, o nitrogênio em abundância no ambiente é o ^{14}N (99,634%), se diferenciando do N marcado, por ter um nêutron a mais no seu núcleo (Inacio *et al.*, 2017).

Na cultura do trigo, este método permite calcular com exatidão a eficiência de uso do nitrogênio aplicado, bem como entender a dinâmica de absorção, redistribuição e remobilização do nutriente entre os diferentes órgãos da planta, permitindo, avaliar no uso das BPCPs, se estas realmente estão favorecendo o aproveitamento do N-fertilizante, se promovem maior alocação de N nos grãos e, ainda, quantificar quais bactérias proporcionam melhores resultados (Araújo *et al.*, 2005).

Esta distinção, é realizada em instrumentos de espectrometria de massa, onde através da queima seja grãos ou tecidos vegetais, a depender do material que se quer analisar, pela transformação para forma de gases, o aparelho consegue quantificar e identificar, qual elemento tem maior massa atômica (^{15}N) e qual tem menor (^{14}N), conseguindo assim separa-los.

Fuertes- Mendizabal *et al.* (2018), demonstraram que a técnica de ^{15}N pode ser utilizada para rastrear a origem do nitrogênio no trigo, evidenciando melhor utilização do N-fertilizante quando as aplicações são parceladas, além de demonstrar padrões de remobilização do N durante o enchimento de grãos.

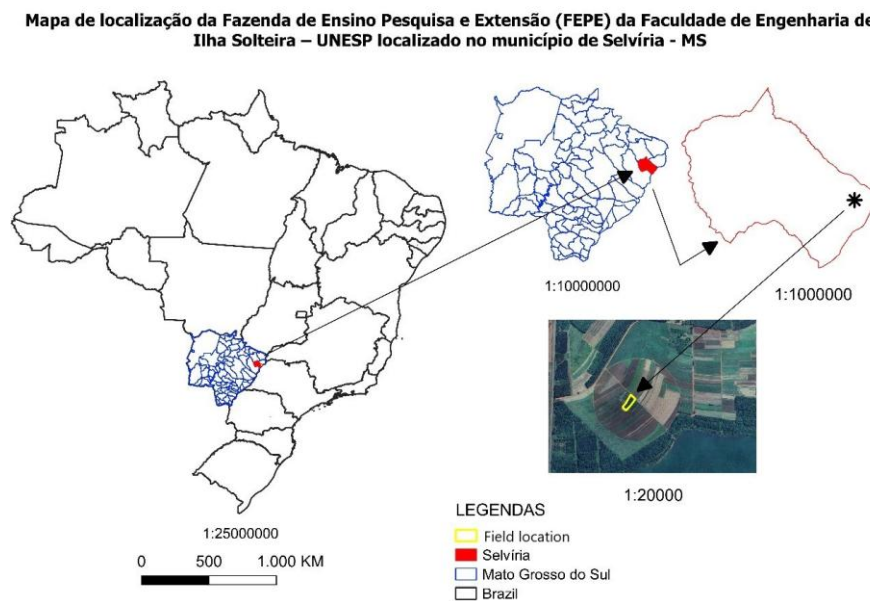
Além disso, o uso de ^{15}N é um importantíssimo método para estimar a FBN em plantas não-leguminosas como trigo, pois através dele é possível quantificar quanto de N acumulado, foi contribuído da fixação e quanto foi advindo de outras fontes (Alves *et al.*, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCAL E ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em condições de campo, no outono/inverno de 2023, na Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, localizada no município de Selvíria - MS, cujas coordenadas geográficas são de 51° 22' W e 20° 22' S e aproximadamente 335 m de altitude (Figura 1). Segundo a classificação internacional de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, definido como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

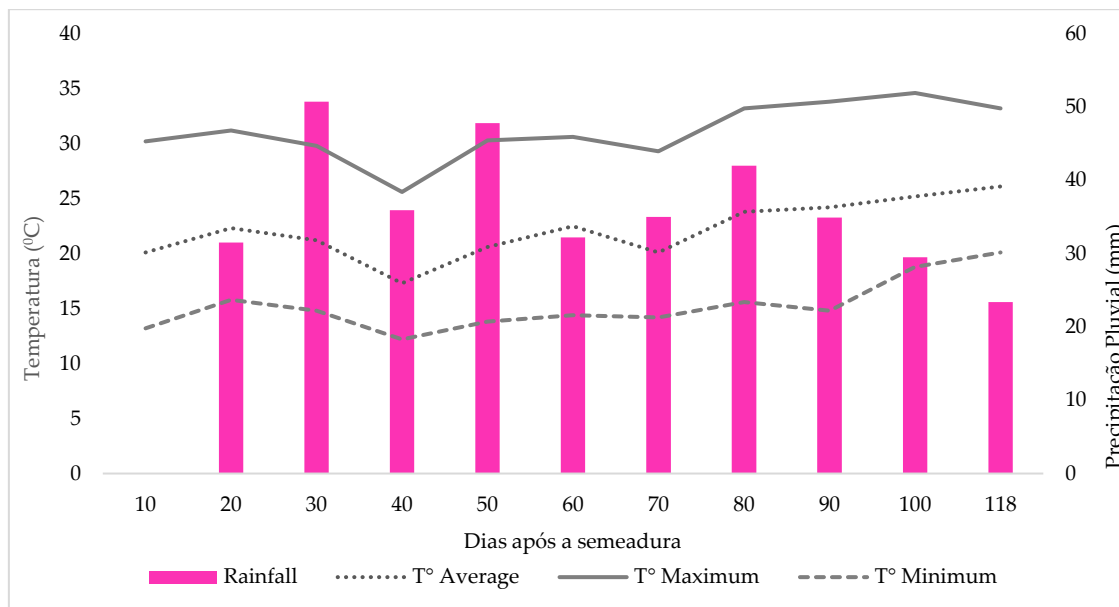
Figura 1. Imagem da Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE) da UNESP/ Ilha Solteira, Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, onde foi realizado o experimento de campo



Fonte: Elaboração da própria autora

A temperatura média anual é de 25,4 °C, precipitação pluvial média anual de 1.370 mm, umidade relativa média de 64,8% (UNESP/FEIS, 2023) e o relevo é suave ondulado (~5% de declividade). Porém, no ano de 2023 foram observadas temperaturas um pouco acima da média para a região, sobretudo no inverno. Também, ocorreram chuvas em junho (60 mm) e em menores quantidades em julho e agosto, o que não é muito comum de ocorrência. Os dados de precipitação pluvial e de temperaturas máximas e mínimas ocorridos durante o cultivo do trigo, encontram-se na Figura 2.

Figura 2. Precipitação pluvial e temperaturas máxima, média e mínima durante a condução do experimento com trigo. Selvíria – MS, 2023



Fonte: Elaboração da própria autora

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), típico, textura argilosa, fase Cerrado (Santos *et al.*, 2018), correspondendo a um Rhodic Haplustox (Oxisol), segundo a Soil Taxonomy (2014), com histórico de cultivos com culturas anuais em sistema plantio direto consolidado, com cultivo de soja no verão, antecedendo ao cultivo do trigo. Antes da instalação, foram coletadas amostras de solo para a caracterização química e granulométrica, nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m de profundidade, cujas análises foram realizadas conforme metodologias descritas em Raji *et al.* (2001). Os resultados dos atributos químicos da área (Tabela 1), foram utilizados para definição da adubação mineral com fósforo, potássio e micronutrientes.

Tabela 1. Resultados dos atributos químicos do solo, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, em amostras coletadas antes da instalação dos experimentos de trigo, Selvíria-MS, 2023.

Camada	pH CaCl ₂	N Total	MO g dm ⁻³	P resina mg dm ⁻³	Ca	Mg	K	H+Al	CTC	S	Cu	Fe	Mn	Zn
m		g kg ⁻¹						mmolc dm ⁻³		mg dm ⁻³				
0,00-0,20	5,6	0,5	22	52	32	18	3,5	22	75,5	8	5,1	21	24,7	1,4
0,20-0,40	5,3	0,5	17	18	19	13	2,2	25	59,2	19	4,7	19	24,8	0,7

Fonte: Elaboração da própria autora

As análises granulométricas foram determinadas pela metodologia descrita por Day *et al.* (1965), pelo método de pipetagem, obtendo os seguintes teores: 439, 471 e 90 g kg⁻¹ de argila, areia e silte, respectivamente.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 4x5, com quatro repetições. Os tratamentos para o cultivo de trigo compreenderam três inoculações + testemunha sem inoculação: i) *Azospirillum brasilense*; ii) *A. brasilense*+*Pseudomona fluorescens*; iii) *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* e iv) Testemunha (sem inoculação), combinadas com cinco doses de N: 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹, utilizando ureia como fonte (46% de N), aplicadas em cobertura nas entrelinhas do trigo (fase inicial de perfilhamento) e sem incorporação ao solo. No mesmo dia, efetuou-se a irrigação por aspersão por meio de pivô central para minimizar as perdas por volatilização de amônia oriundo da ureia.

Em todos os tratamentos, incluindo o tratamento testemunha, foi realizada adubação mineral em sulco de semeadura do trigo, com 30 kg ha⁻¹ de N, 105 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 1,88 kg ha⁻¹ de Zn, utilizando-se o formulado NPK 08-28-16. A adubação foi calculada com base nos resultados das análises de solo, estimando produtividade de 5 a 6 t ha⁻¹ de grãos de trigo, conforme Wutke *et al.* (2022). Aplicou-se em cobertura, via foliar 1 kg ha⁻¹ de Boro, na forma de ácido bórico, ainda na fase de afilhamento.

Realizou-se dessecação das plantas daninhas 15 dias antes da semeadura, utilizando os herbicidas Glyphosate (1800 g ha⁻¹ do ingrediente ativo (i.a.)) e 2,4-D (670 g ha⁻¹ do i.a.), seguido de manejo da área com desintegrador mecânico de resíduos vegetais (Triton). As sementes de trigo foram tratadas com o produto químico Standak® Top (i.a.: piraclostrobina, tiofanato metílico e fipronil), na dose de 2 mL por kg sementes, com o auxílio de uma betoneira. Em seguida, após a secagem, foram realizadas as inoculações com as BPCPs nas sementes com *Azospirillum brasilense* estirpes AbV5 e AbV6 de (garantia de 2x10⁸ UFC mL⁻¹), na dose de 150 mL de inoculante (líquido) por saca de 50 kg de sementes de trigo; com *Bacillus subtilis* (estirpe CCTB04) na dose de 100 mL para 50 kg de sementes (garantia de 1 × 10⁸ UFC mL⁻¹); inoculação com *Pseudomonas fluorescens* (estirpe CCTB03) na dose de 150 mL para 50 kg de sementes de inoculante líquido (garantia de 2 × 10⁸ UFC mL⁻¹), sendo todas realizadas um pouco antes da semeadura à sombra.

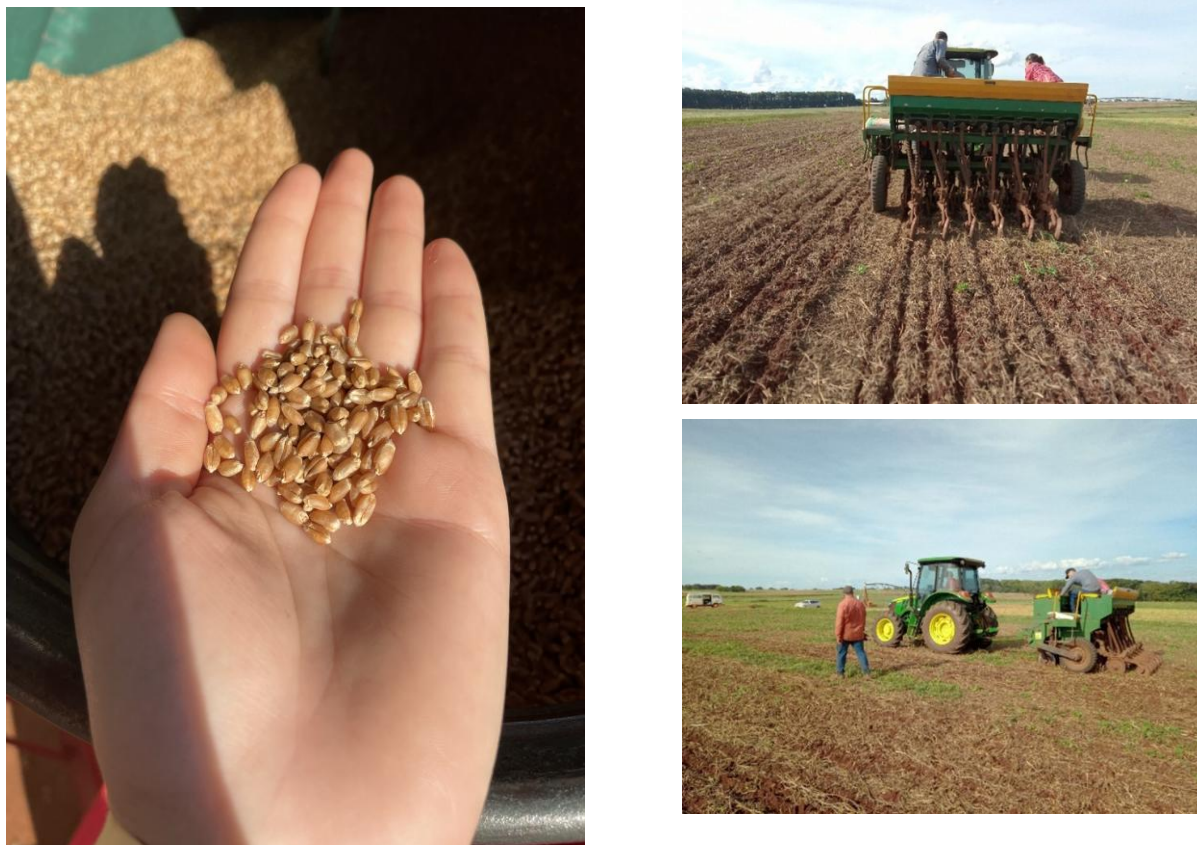
A semeadura do trigo ocorreu dia 11 de maio de 2023 de forma mecanizada, utilizando semeadora da marca Tatu de treze linhas (Figura 3), no espaçamento de 0,17 m entre linhas, com 75 sementes viáveis por metro de sulco, tendo as parcelas experimentais dimensões de 8,0 m de comprimento por 6,0 m de largura. Os tratamentos que receberam fonte marcada com ^{15}N (ureia) tiveram microparcels separadas de 1,5 x 1,0 m (oito linhas de trigo), sendo consideradas como área útil, as três linhas centrais de trigo, desprezando-se 0,20 m nas extremidades.

Foram utilizadas sementes de trigo da cultivar BRS-264 (Figura 3), com alto potencial produtivo e recomendada para as condições edáficas e climáticas de Cerrado, sendo uma cultivar superprecoce, que pode ser colhida cerca 10 dias antes das demais cultivares disponíveis no mercado.

Na fase de perfilhamento, foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura (ureia) nas entrelinhas do trigo. A área foi irrigada por sistema de aspersão, por pivô central e o controle de plantas daninhas, pragas e doenças, foi realizado por meio de pulverizações com produtos específicos e recomendados para a cultura de trigo quando necessário.

A colheita ocorreu em 26 de agosto de 2023 (103 DAE) de forma manual, quando as espigas apresentaram grãos com coloração típica de maturação e umidade em torno de 15%.

Figura 3. Sementes de trigo utilizada na semeadura, cultivar BRS-264 e semeadura do trigo realizada no dia 11/05/2023 de forma mecanizada utilizando semeadora da marca Tatu de treze linhas, no espaçamento de 0,17 m entre linhas



Fonte: Própria autora

3.3 AVALIAÇÕES E ANÁLISES

a) Estado nutricional no florescimento: foram coletadas da área útil de cada parcela 20 folhas bandeiras do trigo no estágio de florescimento pleno, armazenadas em sacos de papel devidamente identificados e levados para secagem em estufa de ventilação forçada à temperatura média de 65 °C até atingir a massa constante. Posteriormente, foram realizadas análises no laboratório de Nutrição de Plantas, os teores de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), pela metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997).

b) Teor de clorofila e Leituras/ Índice SPAD: as leituras foram realizadas no campo, em seis folhas bandeira da área útil de cada parcela no estágio de florescimento pleno da cultura, coletando-as para avaliação do estado nutricional em laboratório. O teor de Clorofila foi quantificado na fase de florescimento do trigo utilizando o clorofilômetro portátil SPAD-502, estimando o teor de clorofila de forma indireta.

c) Altura de plantas: foi mensurada em seis plantas ocasionalmente na área útil de cada parcela, utilizando uma régua graduada, no estágio de maturação das plantas, medindo a distância (cm) do nível do solo ao ápice das espigas, excluindo-se as aristas (Figura 4).

d) Número de espigas por metro quadrado: foi realizada na ocasião da colheita, a contagem do número de espigas em 1,0 m de fileira de plantas na área útil das parcelas; em seguida, calculou-se o número de espigas por m², através da divisão do número de espigas por metro pelo espaçamento das entrelinhas das plantas (0,17 m).

e) Massa hectolétrica: refere-se à densidade dos grãos, correspondendo a massa de grãos ocupada em um volume de 100 L, determinada através de uma balança de 0,25 L, tendo as amostras de grãos retiradas após o processo de trilha e na ocasião o teor de água dos grãos foi corrigido para 13% (Figura 4). Esta avaliação é de suma importância para o processo de comercialização dos grãos, pois serve como parâmetro, uma vez que, o valor recebido pelo produto é menor quando a massa hectolétrica se apresenta abaixo de 78 kg 100L⁻¹.

f) Avaliações de espigas e grãos de trigo: na colheita (Figura 5) foram colhidas 10 espigas de trigo ao acaso da área útil de cada parcela, que foram acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificadas e levadas ao laboratório, para as seguintes determinações: i) Número de espiguetas por espiga: foi determinado a partir da contagem de todas as espiguetas com grãos da espiga; ii) Número de grãos por espiga: obtido pela divisão do número de grãos pelo número de espigas, de cada unidade experimental; iii) Número de grãos por espiguetas: determinado a partir da divisão do número de grãos por espiga pelo número de espiguetas por espiga, de cada unidade experimental; iv) Comprimento de espiga: determinada através de fita métrica.

g) Massa de 1000 grãos: foi determinada por meio da pesagem de três amostras de 1000 grãos de cada parcela utilizando balança de precisão 0,01g, a 13% (base úmida).

h) Produtividade de grãos: na ocasião da colheita, foram colhidas manualmente as plantas contidas nas seis linhas centrais 5 m de comprimento da área útil cada parcela. Após a trilha mecânica, os grãos foram pesados e os dados transformados em kg ha⁻¹ a 13% (base úmida).

i) Índice de colheita (IC): foi obtido dividindo a produção de grãos pela produção de fitomassa total de parte aérea (grãos+palha – restos culturais).

$$IC (\%) = \frac{\text{Produção de grãos (g)}}{\text{Produção de fitomassa (g)}} \times 100$$

j) Acúmulo de macro e micronutrientes na parte aérea: Na ocasião da colheita, foram coletadas dez plantas de cada parcela para avaliar a produtividade de matéria seca e os teores de nutrientes na palha e nos grãos. As espigas foram debulhadas e as amostras de grãos e de palha embaladas, identificadas e secas em estufa a 65 °C. Em seguida, as amostras foram levadas ao laboratório para moagem e determinação dos teores de macro e micronutrientes, utilizando-se a metodologia descrita em Malavolta *et al.* (1997). Os teores obtidos foram utilizados para quantificar a extração (planta inteira- palhada + grãos), a exportação nos grãos, assim como o retorno destes nutrientes ao solo pelos restos culturais (palha), considerando-se as respectivas produtividades de matéria seca obtidas.

Figura 4. Avaliação da altura de plantas e Equipamento utilizado para determinação da massa hectolétrica



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 5. Trigo em fase de maturação; avaliações e colheita do trigo, Selviria – MS, 2023



Fonte: Própria autora

3.4 PREPARO DE AMOSTRAS E ANÁLISES ISOTÓPICAS

Na fase de maturação, foram coletadas as três linhas centrais de cada microparcelas, para determinar a concentração de ^{15}N na palha e nos grãos de trigo. Os grãos foram debulhados manualmente e a palha fragmentada em pedaços com auxílio de facão, misturada e retirada uma amostra. As amostras foram secas a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 horas, depois moídas em peneira de 40 mesh. Posteriormente, foram pesadas amostras em balança de precisão e realizadas as determinações do N-total. Para abundância em ^{15}N da palha e grãos, foi utilizado o espectrômetro de massa (IRMS), acoplado a analisador automático 20-20 ANCA-SL, da Europa Scientific, Crewe, no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP, conforme metodologia descrita em Barrie e Prosser (1996).

3.5 EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO (EUN)

A eficiência de uso do nitrogênio, aproveitamento ou recuperação, foi calculada considerando-se a quantidade e o respectivo enriquecimento (% de átomos de ^{15}N), sendo considerada a fonte de N aplicada (ureia) do isótopo estável de ^{15}N , que é de 0,3663% (IAEA,

2001) e a fonte advinda do solo. A sequência de cálculos para determinar a recuperação do N fertilizante no sistema solo-planta foi de acordo com as equações a seguir:

- a) Nitrogênio acumulado na planta – grãos e palha (NA, kg ha⁻¹)

$$NA = \frac{N \times MS}{1000} \quad Eq\ 01$$

em que: N = Concentração de nitrogênio (g kg⁻¹);

MS = Matéria seca (kg ha⁻¹).

- b) Porcentagem de nitrogênio na planta proveniente fertilizante mineral (%Nppf)

$$\%Nppf = \frac{\% \text{ Átomos de } ^{15}\text{N em excesso na planta}}{\% \text{ Átomos de } ^{15}\text{N em excesso no fertilizante}} \times 100 \quad Eq\ 02$$

em que: % átomos de ¹⁵N em excesso na planta = % Átomos de ¹⁵N na planta subtraindo-se a abundância natural ¹⁵N (0,3663%);

% átomos de ¹⁵N em excesso no fertilizante = % Átomos de ¹⁵N no fertilizante aplicado, subtraindo-se a abundância natural ¹⁵N (0,3663%).

- c) Quantidade de N na planta proveniente do fertilizante (QNppf, kg ha⁻¹)

$$QNppf = \frac{\%Nppf \times NA}{100} \quad Eq\ 03$$

em que: NA = nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹);

%Nppf = porcentagem de N na planta proveniente do fertilizante.

- d) Aproveitamento do nitrogênio (EUN, %) do fertilizante mineral

$$AP = \frac{QNppf}{QNA} \times 100 \quad Eq\ 04$$

em que: QNppf = quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (kg ha⁻¹);

QNA = dose de nitrogênio aplicado na forma de fertilizante marcado (kg ha⁻¹).

- e) Quantidade de N na planta proveniente do N “nativo” do solo (ANPDFS) e outras fontes (QNpps, kg ha⁻¹)

$$QNpps = NA - QNppf \quad Eq\ 05$$

em que: NA = nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹);

QNppf = quantidade de N na planta proveniente do fertilizante (kg ha^{-1}).

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade. Constatada diferença significativa, foi realizada a comparação de médias dos tratamentos qualitativos (inoculações com BPCPs), utilizando teste de Tukey a 5% de probabilidade. Em função da significância das variáveis quantitativas (doses de N), foram ajustadas equações de regressão. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software SAS 9.2 (SAS Institute, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISES BIOMÉTRICAS, ÍNDICE DE CLOROFILA FOLIAR (ICF)/ÍNDICE SPAD E COMPONENTES PRODUTIVOS

Houve efeito significativo das BPCPs sobre todas as avaliações analisadas, que foram: altura de planta, comprimento de espiga, número de espigas por metro quadrado, espiguetas por espigas e grãos por espiga (Tabela 2). A altura de planta, foi influenciada por todos os tratamentos com inoculação (Figura 6), tendo aumento de 11 a 16% em relação ao tratamento testemunha (sem inoculação).

Com relação às doses, assim como a interação doses N x BPCPs, os parâmetros altura da planta; comprimento de espiga; número de espigas por m²; espiguetas por espigas e grãos por espigas não apresentaram efeitos significativos (Tabela 2).

Os resultados das avaliações das espigas para as doses de N, se deve por esses parâmetros serem definidos independente da aplicação de N, pois algumas cultivares de trigo tem características morfológicas da espiga pouco responsivas às mudanças no ambiente (interação genótipo x ambiente), sendo que as variações nutricionais, como diferentes regimes de nitrogênio, pouco influencia certas características morfológicas que já estão pré-determinadas pelo genótipo (Zhai *et al.*, 2016). Além disso, a área de cultivo está há mais de 15 anos em SPD, e foi cultivada com a cultura da soja no cultivo precedente. Estudos demonstraram que a cultura do trigo responde de forma diferente à adubação nitrogenada, quando cultivada sobre palhada de soja ou de milho (SÁ, 1999; SANTOS *et al.*, 2005). Isto porque a palhada de milho apresenta relação C/N mais alta, proporcionando imobilização do N no solo, enquanto a palhada de soja tem baixa relação C/N, mineralizando mais rapidamente os resíduos, que propicia maior disponibilização de N para as plantas.

Tabela 2. Análise de variância e coeficientes de variação (CV), em relação à altura de planta, comprimento de espiga, Número de espigas por m², espiguetas por espiga e grãos por espiga, em trigo irrigado afetado por doses de N e inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPBs), via sementes, Selvíria, MS, 2023

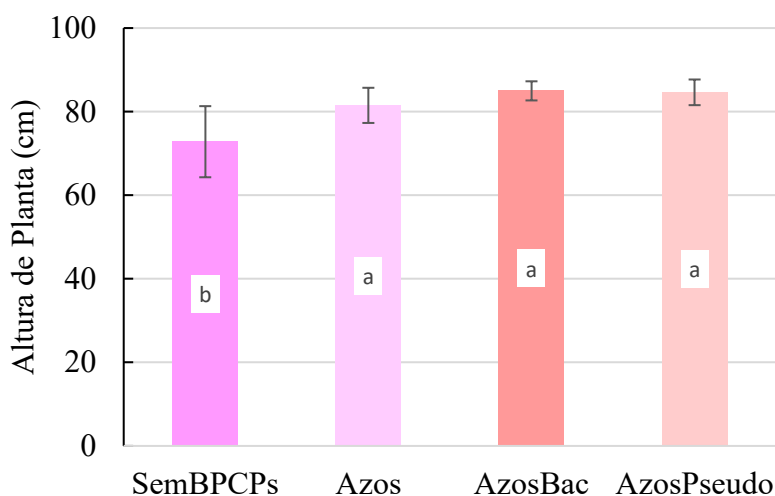
FV	ANOVA				
	Altura de Planta	Comprimento de espiga	Nº de espigas por metro quadrado	Espiguetas por espiga	Grãos por espiga
	cm	cm	m ²		kg ha ⁻¹
Bactérias Promotoras de Crescimento em Plantas (BPCPs)					
Sem inoculação	72,8 b	7,2 ab	104 a	15,1 ab	43,2 a
<i>Azos</i>	81,5 a	7,0 ab	87,1 b	15,2 ab	40,8 ab
<i>Azos+Bac</i>	84,9 a	6,9 b	86,5 b	14,4 b	39,1 b
<i>Azos+Pseudo</i>	84,6 a	7,3 a	85,5 b	15,3 a	39,8 ab
Doses (D)					
0	80,5	7,0	90,2	14,9	42,5
30	80,7	6,9	89,0	14,8	40,8
60	81,6	7,1	88,2	14,9	40,6
120	81,4	7,2	91,5	15,2	40,2
180	80,5	7,1	95,0	15,3	39,5
Valores de F					
BPCPs	0,001*	0,005*	0,0002*	0,026*	0,03*
D	0,95 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,53 ^{ns}
BPCPs x D	0,99 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,85 ^{ns}
Médias Gerais	80,97	7,13	90,81	15,05	40,75
CV (%)	6,59	5,69	15,63	6,37	11,19

Fonte: Elaboração da própria autora

Nota: Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+ Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+ Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomona fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

Os tratamentos *A. brasilense* + *B. subtilis* diferiram dos tratamentos que receberam *A. brasilense*+*P. fluorescens* nos parâmetros comprimento de espiga e espiguetas por espiga. O número de espigas por m², não teve efeito significativo pelos diferentes usos das BPCPs, mas apresentou resultado significativo em relação à testemunha. Em contrapartida, foi verificado maior número de grãos por espiga, sob a coinoculação de *A. brasilense* + *B. subtilis*, em relação ao não inoculado (Tabela 2).

Figura 6. Efeito das inoculações e coinoculações sobre a altura de plantas de trigo não inoculado (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (Azos+Bac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (Azos+Pseudo), Selvíria - MS, 2023



Fonte: Elaboração da própria autora.

Para o índice SPAD e massa de 1000 grãos, não foi constatado efeito significativo em função das BPCPs e nem da interação entre doses x inoculações, sendo que, esta interação também não apresentou significância em relação a massa hectolétrica (Tabela 3).

Foi observado efeito significativo isoladamente nas doses de N e no uso das BPCPs nas variáveis massa seca de palhada e massa hectolétrica (Tabela 3). É sabido que doses mais altas de N estimulam perfilhamento, expansão foliar e crescimento vegetativo, resultando em mais folhas e caules, que se transformaram em biomassa vegetal (palhada) após a colheita (Noor *et al.*, 2023), além de que, as BPCPs estimulam atividade de enzimas ligadas ao metabolismo do N, melhorando a conversão deste nos tecidos vegetativos.

Por prolongar a atividade fotossintética da folha bandeira, o N aplicado dispõe mais assimilados, proporciona grãos mais cheios, acarretando maior massa hectolétrica, assim como as BPCPs garantem melhor translocação de fotoassimilados para os grãos, aumentando seu peso e qualidade (Maignan *et al.*, 2021). Conforme demonstrado também por Raza *et al.* (2025), o uso das BPCPs, aumentou em 17% a massa de 1.000 grãos e elevou significativamente a massa hectolétrica, medida relacionada diretamente com a qualidade para panificação do trigo, pois se este parâmetro é elevado, indica que houve grãos com maior quantidade de amido e proteínas, resultando em farinha com maior força de glúten, que é essencial para capturar gases do fermento e gerar miolo leve e bem estruturado.

As coinoculações se mostraram eficientes, em relação a massa hectolétrica, com valores ($\sim 79,4 \text{ kg } 100 \text{ L}^{-1}$) próximos à média da cultivar de $80 \text{ kg } 100 \text{ L}^{-1}$, portanto é classificado como trigo tipo 1, resultado também obtido por Teixeira Filho *et al.* (2012). Esta classificação está relacionada diretamente com a “força do glúten”, que depende do fornecimento de N adequado à planta, que está relacionado, também, a maior produtividade dos grãos e ao aumento de espigas por m^2 obtidos neste estudo, assim como por Teixeira Filho *et al.* (2010).

Para massa seca de palhada, observou-se também efeito significativo da interação doses de N x BPCPs (Tabela 3), o que evidencia que essas variáveis são dependentes. O N fornece a base estrutural para o crescimento (clorofila, proteínas), aumentando assim a biomassa da planta (Wang *et al.*, 2024) enquanto que as BPCPs ampliam a eficiência fisiológica e nutricional da planta, potencializando por exemplo, a eficiência do uso do N (Quille *et al.*, 2025). Desta forma, quando combinadas, causam um efeito sinérgico, maximizando o crescimento vegetativo e produção de biomassa. Comparando-se a inoculação com os tratamentos sem inoculação de BPCPs, Galindo *et al.* (2022) observaram aumento de 5,9% na biomassa da parte área, assim como, a dose de 200 kg ha^{-1} de N proporcionou maior biomassa da parte área se comparado ao tratamento sem inoculação.

A Tabela 3 evidencia que o tratamento com *Azos*+*Pseudo* apresentou a maior média de massa seca de palhada (5.349 kg ha^{-1}) dentre o uso das demais BPCPs, se diferindo estatisticamente de *Azos* aplicada isoladamente e do tratamento controle, o que evidencia o efeito potencializador das BPCPs, quando são combinadas.

Tabela 3. Análise de variância e coeficientes de variação (CV), em relação ao índice SPAD; massa de 1000 grãos; massa hectolétrica e massa seca de palha, em trigo irrigado associado a doses de N e inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPBs), via sementes em Selvíria, MS, 2023

FV	ANOVA			
	Índice SPAD	Massa de 1000 grãos	Massa Hectolétrica	Massa Seca de Palha
		g	kg per 100 L	kg ha ⁻¹
Bactérias Promotoras de Crescimento em Plantas (BPCPs)				
Sem inoculação	46,1 a	38,6 a	79,3 a	4,722 c
<i>Azos</i>	47,0 a	39,4 a	78,9 a	4,848 bc
<i>Azos+Bac</i>	47,0 a	38,5 a	79,6 a	5,214 ab
<i>Azos+Pseudo</i>	46,6 a	38,0 a	80,3 a	5,349 a
Doses (D)				
0	46,1	38,6	79,3	4,155
30	46,6	37,3	78,6	5,603
60	46,5	38,2	79,3	4,955
120	47,2	38,7	80,0	5,417
180	46,9	40,3	80,3	5,035
Valor de F				
BPCPs	0,10 ns	0,45 ns	0,009*	0,0006*
D	0,17 ns	0,03*	0,009*	0,01*
BPCPs x D	0,42 ns	0,4 ns	0,964 ns	0,005*
Médias Gerais	46,71	38,68	95,66	5033
CV (%)	2,80	6,66	1,94	10,21

Fonte: Elaboração da própria autora.

Nota: Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+ Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+ Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

4.2 ANÁLISE NUTRICIONAL FOLIAR

Os teores dos macronutrientes N, P, K e S analisados na folha diagnose, demonstraram efeito significativo na análise de variância, quando utilizado tratamento isolado com as BPCPs (Tabela 4), assim como nos teores dos micronutrientes B e Mn (Tabela 5). É sabido que a disponibilidade do nitrogênio e de potássio na adequada proporção, afeta a absorção, o crescimento e o metabolismo das plantas (Marschner *et al.*, 2012), sendo o K, atuante no transporte de açúcares, regulação osmótica e ativação enzimática, enquanto que, o N é fundamental para síntese de proteínas e crescimento celular. Adnan *et al.* (2016) também verificaram que plantas tratadas com BPCPS obtiveram aumento significativo nos teores foliares de nitrogênio, fósforo e potássio, além de favorecer absorção e mobilização dos nutrientes, refletindo em maiores teores nos tecidos foliares.

Para doses de N, houve efeito significativo sobre os teores de N, P e S (macronutrientes) (Tabela 4), porém nos teores de micronutrientes, somente Zn apresentou efeito significativo em relação ao incremento das doses de N (Tabela 5). Além disso, as interações entre N e K nas plantas, é destaque pelo potássio ser essencial na ativação de enzimas envolvidas na assimilação de nitrato, como a nitrato redutase (NR) e no transporte de nitrato e potássio através do xilema, estando também relacionado a regulação da expressão de transportadores de nitrato e na manutenção do equilíbrio iônico necessário para o transporte eficiente de nitrato (Coskun *et al.*, 2016). Santos *et al.* (2017) constataram que a aplicação de 250 mg dm⁻³ de N combinadas com 200 mg dm⁻³ de K, resultou em maior biomassa acumulada e maior teor de clorofila, comprovando o efeito positivo da interação desses nutrientes na cultura do trigo.

Os teores dos macronutrientes Ca e Mg foram influenciadas significativamente pela interação entre BPCPs x doses de N (Tabela 4), enquanto que nos teores de micronutrientes, somente o Fe demonstrou efeito significativo (Tabela 5). Os microrganismos promotores de crescimento de plantas, promovem o crescimento de raízes laterais e pelos radiculares, o que aumenta a área de absorção no solo, fazendo que haja maior contato direto íon-raiz, favorecendo a absorção de nutrientes pouco móveis via floema, como o Ca. Resultado este, evidenciado também no trabalho de Basen *et al.* (2020), onde as doses de *A. brasilense* e as aplicações de N, aumentaram a absorção de Ca e Mg.

As BPCPS como *Azospirillum*, *Pseudomonas* e *Bacillus* produzem sideróforos que tem alta afinidade pelo Fe³⁺, que é a forma predominante no solo, porém pouco solúvel. Quando entram em contato, os sideróforos quelam o Fe³⁺, deixando-o mais solúvel, fazendo com que estes complexos (Fe-sideróforos) sejam absorvidos pelas raízes, aumentando a concentração deste na planta (Scavino *et al.*, 2013).

Tabela 4. Quadrados médios para teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) em trigo irrigado, associado a doses de N na ausência de inoculação, inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento em plantas (PGPBs), via sementes, Selvíria - MS, 2023

FV	Quadrados médios – Teores foliares de Macronutrientes						
	DF	N	P	K	Ca	Mg	S
BPCPs	3	6,975**	0,264*	3,642*	0,323 ^{ns}	0,323 ^{ns}	0,086*
Doses N	4	39,755**	0,271**	0,948 ^{ns}	0,642 ^{ns}	0,025 ^{ns}	0,084*
BPCPs x Doses N	12	0,804 ^{ns}	0,072 ^{ns}	2,124 ^{ns}	0,670*	0,0867*	0,035 ^{ns}
Blocos	3	1,916 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,130 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,027 ^{ns}
Resíduo	57	1,105	0,042	1,115	0,271	0,033	0,025
C.V. (%)		2,21	6,17	7,94	9,40		7,01

Nota: Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Azos = *Azospirillum brasilense*, Azos+ Bac = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, Azos+ Pseudo = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração da própria autora

Tabela 5. Quadrados médios para teores foliares de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) em trigo irrigado, associado a doses de N na ausência de inoculação, inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento em plantas (PGPBs), via sementes, Selvíria - MS, 2023

FV	Quadrados médios – Teores foliares de Micronutrientes					
	DF	B	Cu	Fe	Mn	Zn
BPCPs	3	4628,97**	59,69 ^{ns}	125,75 ^{ns}	340,46**	4,61 ^{ns}
Doses N	4	224,19 ^{ns}	68,21 ^{ns}	403,45 ^{ns}	57,85 ^{ns}	108,62*
BPCPs x Doses N	12	114,87 ^{ns}	118,49 ^{ns}	393,03*	75,77 ^{ns}	35,93 ^{ns}
Blocos	3	77,063 ^{ns}	70,60 ^{ns}	419,72 ^{ns}	27,27 ^{ns}	7,18 ^{ns}
Resíduo	57	200,70	73,10	184,42	2996,33	1399,10
C.V. (%)		23,90	31	9,69	5,91	17,73

Nota: Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Azos = *Azospirillum brasilense*, Azos+ Bac = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, Azos+ Pseudo = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração da própria autora.

Desta forma, a análise do estado nutricional das plantas de trigo foi de acordo com Cantarella *et al.* (2022). Assim, os teores foliares médios de macronutrientes seguiram a seguinte ordem: N > K > Ca > S > P > Mg (Tabela 6), sendo que apenas o teor de K apresentou valor abaixo da faixa adequada para a cultura do trigo (Cantarella *et al.*, 2022; Malavolta *et al.*, 1997). Porém, para o teor de K, verificou-se diferença significativa entre o tratamento testemunha e a coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens*. Enquanto os teores foliares de micronutrientes no trigo tiveram a seguinte ordem: Fe > Mn > B > Zn = Cu (Tabela 7).

Tabela 6. Avaliação foliar do estado nutricional da planta de trigo irrigado, quanto aos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em função das doses de N associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento em plantas (PGPBs), por sementes, Selvíria - MS, 2023.

FV	Quadrados médios – Teores foliares de Macronutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- (g kg ⁻¹)-----					
Sem inoculação	47,8	3,2	12,8 b	5,5	2,6	3,8
<i>Azos</i>	46,8	3,3	13,2 ab	5,3	2,4	3,5
<i>Azos+Bac</i>	47,6	3,3	13,8 ab	5,5	2,6	3,4
<i>Azos+Pseudo</i>	48,2	3,5	13,4 a	5,6	2,6	3,2
⁽¹⁾ Adequados	20-34	2,5-3,5	15-30	2,5-8,0	1,5-4,0	1,5-3,5
⁽²⁾ Adequados	30-33	2,0-3,0	23-25	14,0	4,0	4,0
Doses (D)						
0	45,1	3,4	13,5	5,3	2,5	3,5
30	47,0	3,5	13,0	5,1	2,4	3,4
60	47,5	3,5	13,4	5,5	2,6	3,8
120	48,8	3,2	13,7	5,8	2,6	3,4
180	49,2	3,2	13,5	5,5	2,5	3,3
Valores de F						
BPCPs	0,002*	0,001*	0,04*	0,38 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,001*
D	0,001*	0,0003*	0,79 ^{ns}	0,02*	0,38 ^{ns}	0,001*
BPCPs x D	0,58 ^{ns}	0,092 ^{ns}	0,05*	0,01*	0,006*	0,0006*
Médias Gerais	47,6	3,3	13,4	5,5	2,5	3,5
CV (%)	2,3	6,17	12,11	10,96	12,19	9,21

Nota: Teores adequados de nutrientes de acordo com ⁽¹⁾ CANTARELLA *et al.* (2022) e ⁽²⁾ MALAVOLTA *et al.* (1997).

Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+ Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+ Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 7. Avaliação foliar do estado nutricional da planta de trigo irrigado, quanto aos teores de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em função das doses de N associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento em plantas (PGPBs), por sementes, Selvíria - MS, 2023

FV	Quadrados Médios – Teores foliares de Micronutrientes				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- (mg kg ⁻¹)-----				
Sem inoculação	57,9	32,1	147,5	129,9	28,3
<i>Azos</i>	48,1	26,9	137,0	113,6	30,3
<i>Azos+Bac</i>	54,9	29,6	141,7	122,5	28,9
<i>Azos.+Pseudo</i>	82,9	29,4	140,5	122,8	29,0
⁽¹⁾ Adequados	5-15	5-20	10-250	25-150	25-70
⁽²⁾ Adequados	20	9-18	-	16-28	20-40
Doses (D)					
0	58,4	28,6	142,6	122,9	27,3
30	57,4	24,5	133,1	118,1	27,3
60	59,7	29,0	145,3	126,1	26,7
120	66,8	36,9	145,7	122,3	36,7
180	62,4	28,3	135,6	124,5	26,8
F – Values					
BPCPs	0,0001*	0,68 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,0008*	0,84 ^{ns}
D	0,35 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,0003*
BPCPs x D	0,85 ^{ns}	0,025*	0,017*	0,12 ^{ns}	0,032*
Médias Gerais	60,9	29,4	140,5	122,8	29
CV (%)	23,2	45,9	13,9	9,9	28,5

Teores adequados de nutrientes de acordo com ⁽¹⁾ CANTARELLA *et al.* (2022) e ⁽²⁾ MALAVOLTA *et al.* (1997). Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+ Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+ Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

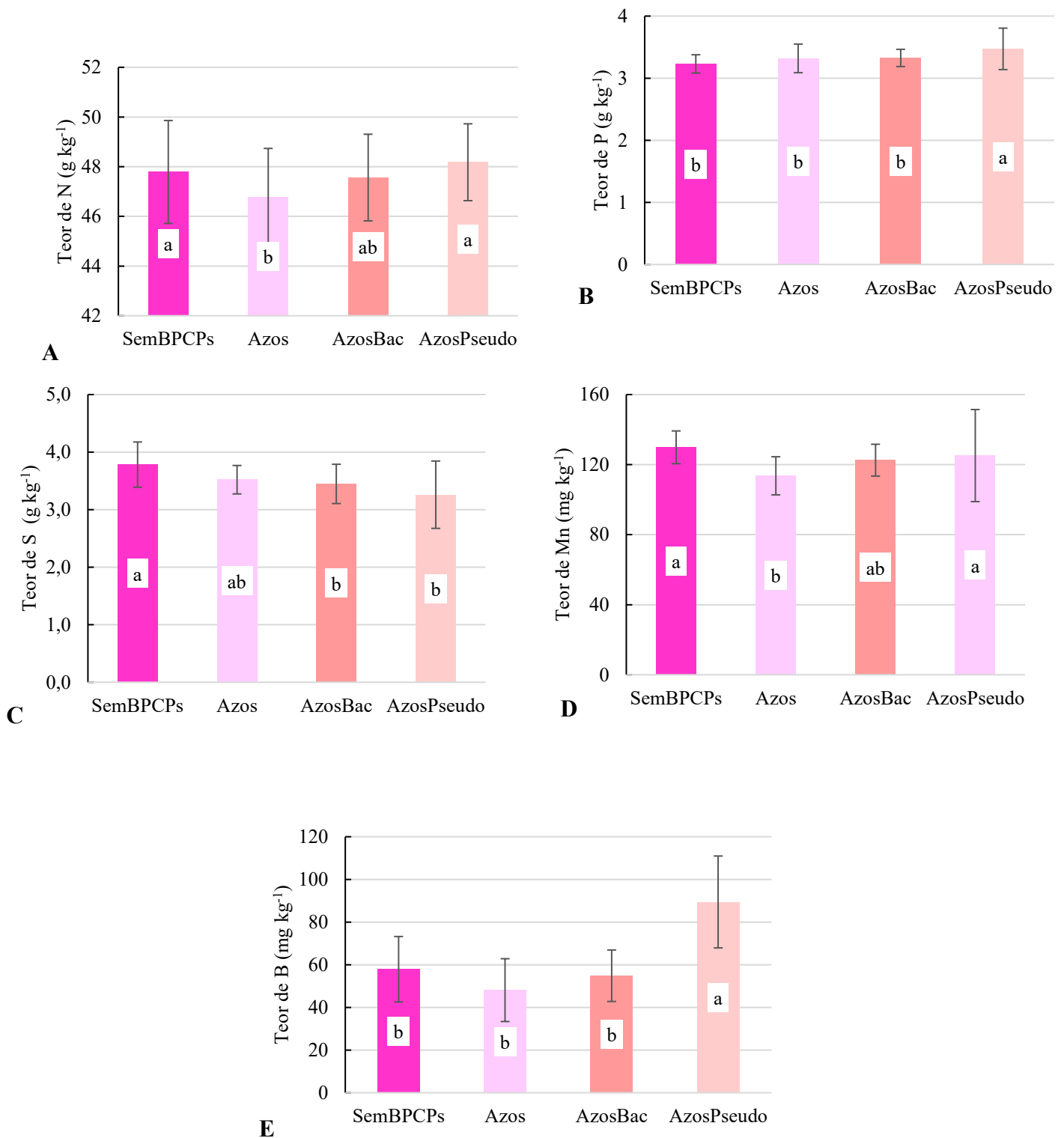
Fonte: Elaboração da própria autora.

Para o teor foliar de N, o tratamento de *A. brasilense* apresentou diferença estatística do tratamento testemunha (sem inoculação) e da coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens* (Figura 7A). Já para o teor foliar de P, *A. brasilense*+*P. fluorescens* apresentou diferença de todos os outros tratamentos (Figura 7B).

Por sua vez, os teores de S e Mn foliar apresentaram maiores valores no tratamento testemunha (Figuras 7C e 7D), sendo que, para o teor de S, a coinoculação de *A. brasilense* com ambas BPCPs se divergiram do tratamento testemunha. Para o manganês (Mn), houve diferença estatística entre a inoculação isolada de *A. brasilense* com a coinoculação de *A. brasilense*+ *P. fluorescens* e com o tratamento que não recebeu inoculação.

Quanto aos teores de B foliar, o maior teor foi no tratamento com *A. brasilense*+*P. fluorescens*, se diferenciando estatisticamente de todos demais tratamentos (Figura 7E).

Figura 7. Efeito das inoculações e coinoculações sobre os teores foliares de: N (A), fósforo – P (B), enxofre – S (C), manganês – Mn (D) e boro – B (E), em plantas de trigo, em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), Selvíria - MS, 2023



Fonte: Elaboração da própria autora

Na figura 8A, observa-se o ajuste à equação quadrática para massa seca de palha, atingindo o ponto de máxima estimado na dose 107 kg ha^{-1} de N, com produtividade estimada em 5.424 kg ha^{-1} de massa seca de palha de trigo. Isso ocorre porque a adubação nitrogenada proporciona maior crescimento vegetativo, área foliar e maior produção de massa seca de palha, porém existe um ponto ótimo de fornecimento de N, em que a planta atinge maior acúmulo de massa seca (Yokamo *et al.*, 2023). Ao atingir este limiar, a planta já tem suprimento adequado de N e a partir daí a eficiência de uso do N começa a cair, assim a curva de resposta deixa de subir linearmente e tende a se estabilizar ou declinar em altas doses de N (Hu *et al.*, 2005).

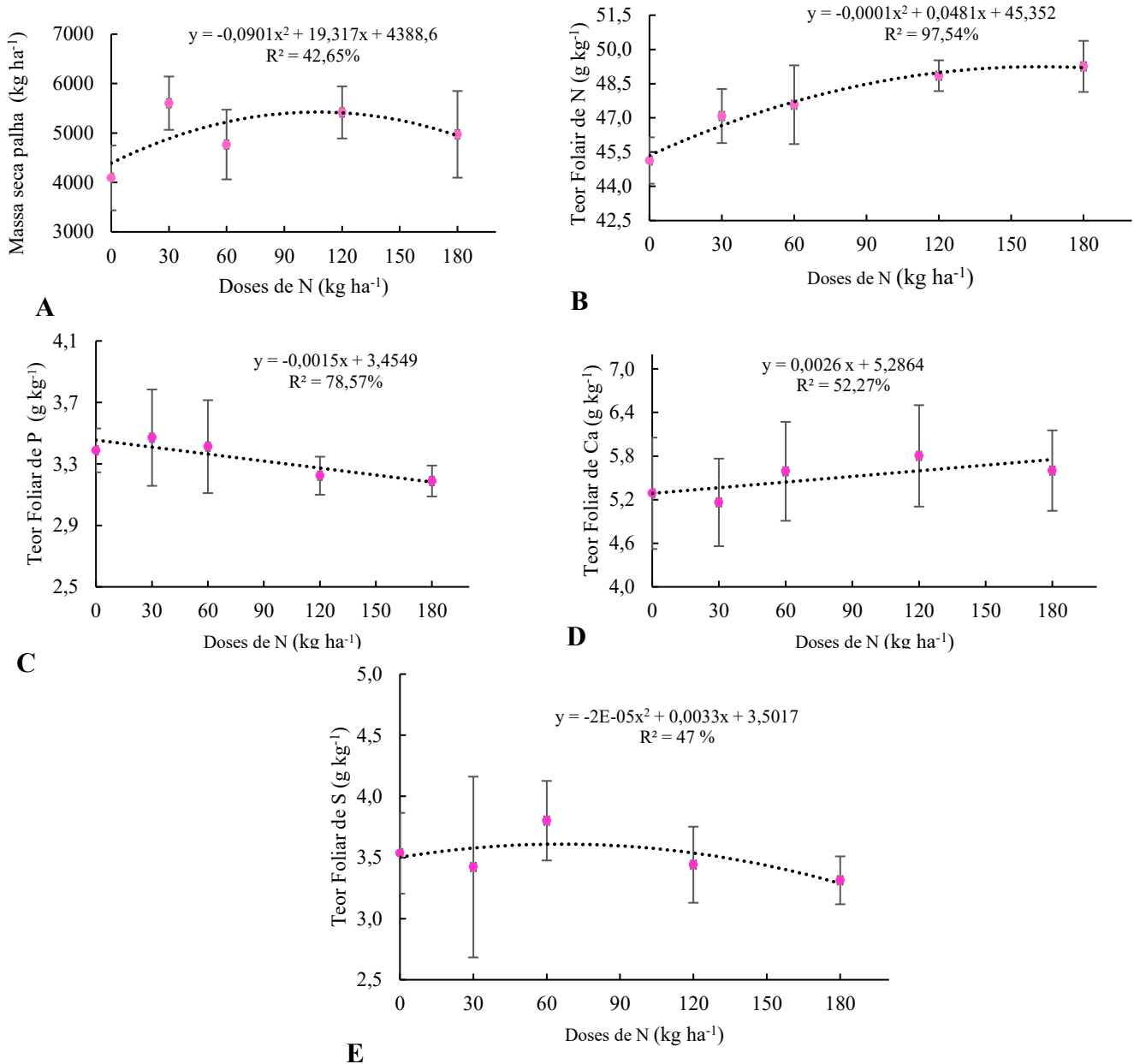
Por outro lado, Gaspareto (2022), não observou efeito da inoculação com BPCPs em relação ao teor de N foliar, afirmando que provavelmente ocorreu efeito diluição em função do maior desenvolvimento em altura de planta e perfilhamento propiciado por estas bactérias diazotróficas e pelas doses de N, o que certamente ocorreu nos resultados obtidos neste estudo, com os teores de fósforo na folha, que decresceram de forma linear em resposta às doses de N. Relaciona-se esse decréscimo linear do fósforo ao efeito diluição, uma vez que ocorreu maior acúmulo de biomassa com incremento das doses de N.

Com mais N disponível, a planta aumenta seu teor proteico e massa seca. Isso dilui a concentração de P por unidade de massa foliar, mesmo que o fosfatado absorvido aumente, a concentração relativa diminui. Assim, há diluição de P à medida que o N aumenta, atingindo um limiar fisiológico (Bélanger *et al.*, 2011).

O maior acúmulo de palhada foi proporcionado pelos tratamentos que receberam coinoculação se comparados à testemunha, apresentando diferença significativa de *A. brasilense*+*P. fluorescens* e de *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* do tratamento sem inoculação (Tabela 3, Figura 8A).

As doses de N influenciaram o teor de nitrogênio foliar, ajustando a curva à função quadrática (Figura 8B). Os teores de fósforo foliar apresentaram forma linear decrescente em resposta ao incremento das doses de N (Figure 8C). Houve aumento linear nos teores de Ca (Figure 8D), enquanto que com incremento de N, os teores de enxofre foliar apresentaram aumento de forma quadrática (Figure 8E).

Figura 8. Efeito das diferentes Doses de N sobre a. Produtividade de massa seca de palha (A), e sobre os teores foliares de nitrogênio– N (B), fósforo – P (C), Cálcio – Ca (D) e enxofre – S (E) em trigo irrigado em função de doses de N, Selvíria - MS, 2023



Fonte: Elaboração da própria autora.

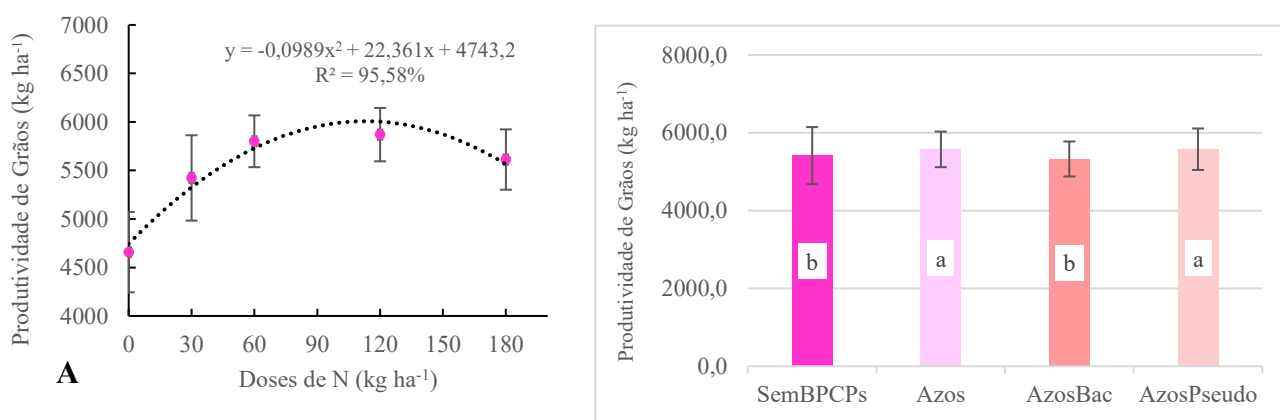
Os dados de produtividade de grãos de trigo ajustaram à equação quadrática $y = 0,0989 X^2 + 22,361 X + 4773,2$ (Figure 9A), em função do incremento da dose de N, com estimativa de dose máxima 113 kg ha⁻¹ de N, propiciando uma produção de 6.007 kg ha⁻¹ de grãos, que equivale a 100,11 sacas ha⁻¹. Os tratamentos com *A. brasilense* e/ou *A. brasilense*+*P. fluorescens*, foram os que proporcionaram maiores aumento na produtividade dos grãos (Figura

9B), sendo equivalente a 3,1%, evidenciando a importância do nitrogênio, tanto no que se refere ao estado nutricional da planta quanto à sua influência no perfilhamento da cultura, o que reflete em maiores produtividades. Além disso, estes microrganismos benéficos estimulam o desenvolvimento radicular, aumentando a absorção de água e nutrientes, sendo potencializados pela coinoculação, agregando benefícios na absorção de fósforo e ferro.

Em ensaio com 11 cultivares de trigo irrigado, realizado em Luís Eduardo Magalhães (BA) em 2021, também sob condições edáficas e climáticas de Cerrado, a BRS 264 foi a mais produtiva (101,28 sacas ha^{-1}) e a mais precoce, mesmo com aplicação de nitrogênio em dose menor (140 kg ha^{-1}) que as demais (180 kg ha^{-1}) (Embrapa Cerrado, 2024), porém superior a dose ótima estimada do nosso estudo.

Em outros estudos, obtiveram como resultado, o aumento da produtividade máxima de grãos até a dose de 121 kg ha^{-1} de N (Teixeira Filho *et al.*, 2010). Enquanto Galindo *et al.* (2017), em duas safras de cultivo, observaram que no primeiro ano agrícola a produtividade dos grãos aumentou linearmente com as doses de N sem inoculação, mas quando os tratamentos receberam inoculação, os dados se ajustaram ao modelo quadrático com resposta positiva até a dose de 139 kg ha^{-1} de N. Da mesma forma, na segunda safra os dados de produtividade de grãos também se ajustaram ao modelo quadrático em relação aos tratamentos com e sem inoculação, no entanto respondendo positivamente até as doses 142 kg ha^{-1} de N (testemunha).

Figura 9. Efeito das inoculações e coinoculações sobre Produtividade de grãos (A) em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), e Produtividade de grãos em função das doses de N (B) - 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha^{-1} , em plantas de trigo, Selvíria - MS, 2022



Fonte: Elaboração da própria autora

Desta forma, considerando as médias de produtividade de palhada e grãos, chegou-se a um Índice de Colheita (IC) de 52%, sendo a produtividade média de grãos estimada em 5.423

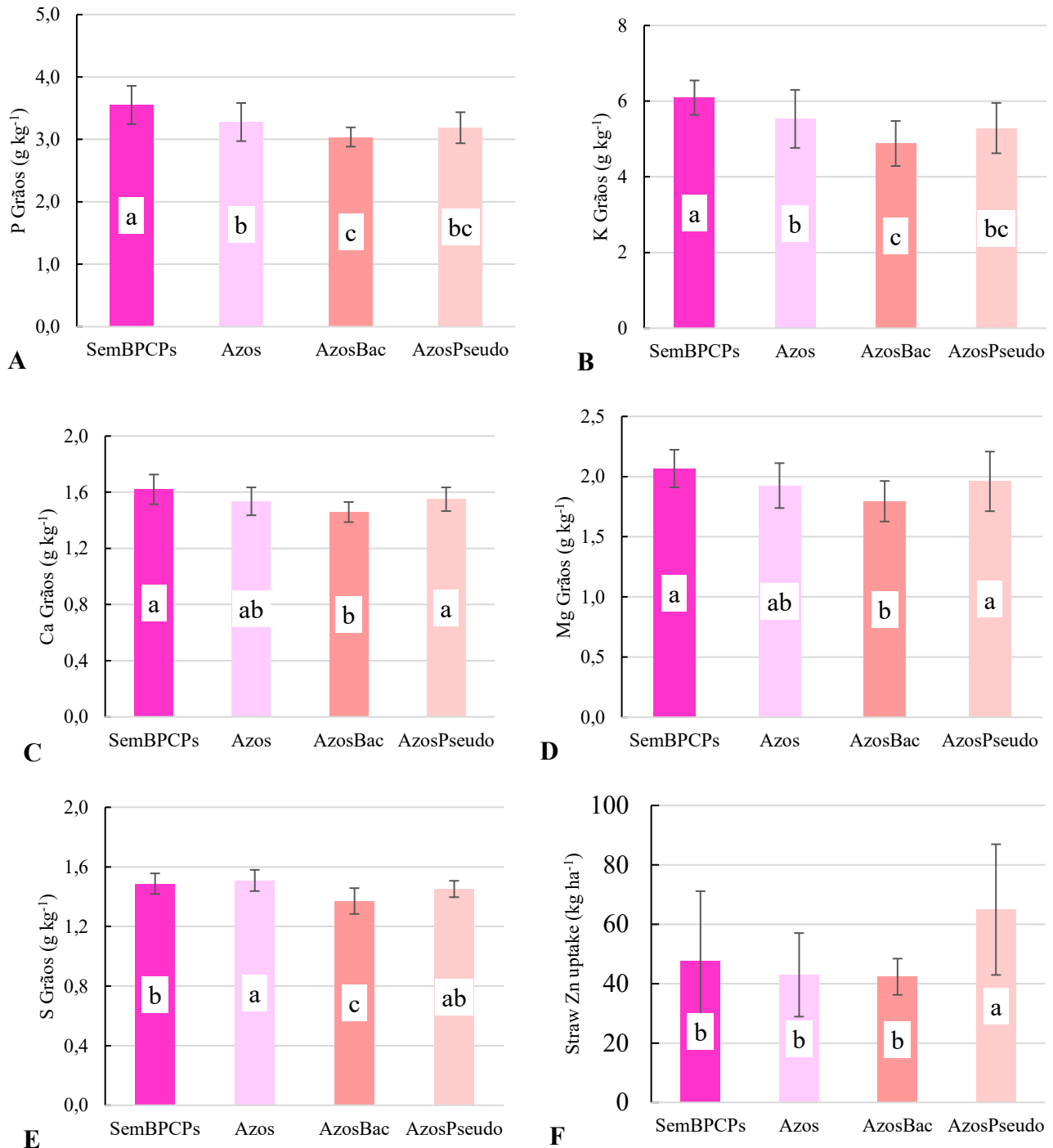
kg ha⁻¹, dado este superior à média nacional da safra 2023/24 que foi de 3.744 kg ha⁻¹ (CONAB, 2024). Portanto, a exploração de novas tecnologias para o cultivo de trigo em novas áreas como o Cerrado, tem potencial enorme de passar o Brasil para a condição de exportador e autossuficiente na produção tritícola (Pasinato *et al.*, 2018).

4.3 EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DOS NUTRIENTES

Para os teores de P e K nos grãos, todos os tratamentos que receberam inoculação e coinoculação se diferiram estatisticamente do tratamento testemunha (Figura 10A e 10B), sendo que o tratamento sem BPCPs, obteve maiores valores médios de produção, podendo relacionar este resultado ao efeito diluição relatado anteriormente. Para os teores de Ca e Mg nos grãos, notou-se diferença significativa entre o tratamento testemunha e *A. brasilense*+*B. subtilis*, sendo que, *A. brasilense*+*P. fluorescens* se diferiu estatisticamente somente de *A. brasilense*+*B. subtilis* (Figura 10C e 10D).

Com relação aos teores de S nos grãos, o tratamento sem inoculação se diferiu estatisticamente do tratamento que recebeu somente inoculação com *A. brasilense* e do tratamento que recebeu coinoculação de *A. brasilense*+*B. subtilis*, assim como este último, se diferiu estatisticamente do tratamento que recebeu coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens* (Figura 10E). Por sua vez, os teores de Zn nos grãos (Figura 10F) apresentaram concentração maior no tratamento que recebeu a coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens*, sendo também o único tratamento que se diferiu da testemunha. Resultado importante quando se pensa em biofortificação agrônômica de grãos de trigo com Zn.

Figura 10. Efeito das inoculações e coinoculações sobre os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) nos grãos, em plantas de trigo, em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), Selvíria - MS, 2023



Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração da própria autora

Houve aumento linear crescente em relação ao teor de N nos grãos de trigo em função da adubação nitrogenada (Figura 11A). Um estudo analisou a resposta da concentração de N

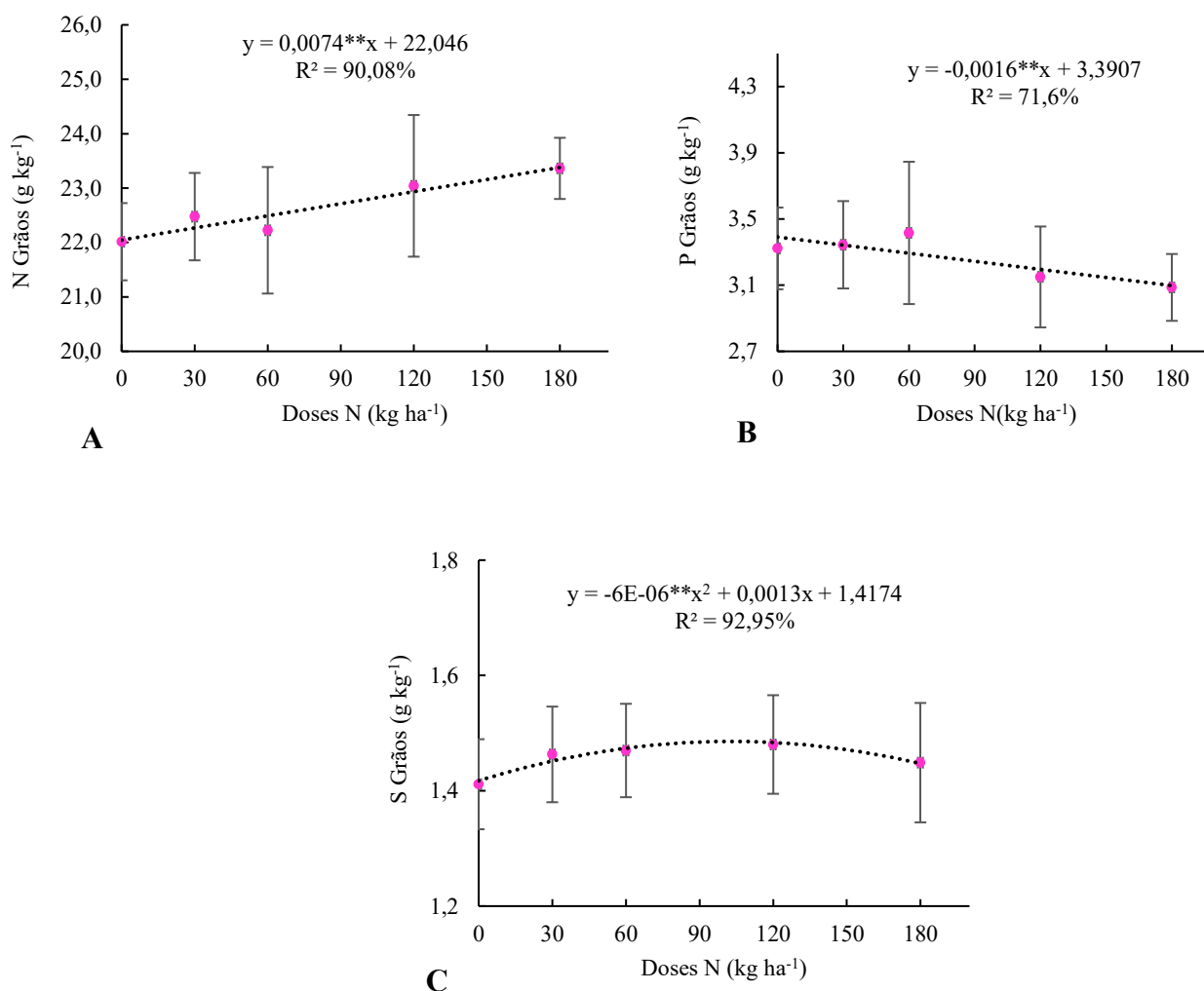
no grão associadas a taxas de fertilizantes a base de N, P e K, constatando-se que, à medida que se aumentavam as doses de N, a concentração de N nos grãos crescia de forma linear, sem saturação (Lollato *et al.*, 2019). Isto evidencia a influência direta da aplicação nitrogenada nos grãos de trigo, refletindo de maneira significativa na qualidade tecnológica do cereal, visto que, os teores de proteína nos grãos estão fortemente correlacionados com a concentração de N absorvido pela planta. No caso do trigo, além de sua reconhecida importância para o aumento da produtividade, o N desempenha papel fundamental na qualidade da matéria-prima, especialmente para panificação.

Outro estudo, mostrou que, a aplicação mesmo que considerada tardia de N, aumentou o teor total de proteínas nos grãos, visto que os teores de gluteninas e gliadinas, se elevaram de forma mais acentuada do que as outras frações proteicas, melhorando a força do glúten (W). Afirmou também, que a aplicação de N em estádios finais do ciclo, é eficaz para direcionar o nitrogênio para a síntese de proteínas de reserva, melhorando a qualidade tecnológica do trigo (Rekowski *et al.*, 2019).

Quanto aos teores de fósforo nos grãos de trigo em função das doses de N, observou-se ajuste ao modelo linear decrescente (Figura 11B). Tal fato pode estar relacionado ao efeito diluição e supressão de mecanismos de absorção de P, pois com altas doses de N, pode ocorrer a supressão na produção de exsudados radiculares, como ácidos orgânicos e fosfatases, fazendo com que a planta priorize o uso de N, reduzindo gasto de energia para mobilizar P do solo (López- Bucio, *et al.*, 2003).

Para os teores de enxofre nos grãos, os dados ajustaram ao modelo quadrático, cujos teores nos grãos aumentaram até a dose de 108 kg ha⁻¹ de N, cujo teor máximo foi de 1,49 g kg⁻¹ (Figura 11C).

Figura 11. Efeito das diferentes Doses de N (0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) sobre os teores de N (A); P (B); S (C) nos grãos de trigo, Selvíria - MS, 2023



Fonte: Elaboração da própria autora.

A análise de variância mostrou efeito significativo isolado somente sobre a quantidade do micronutriente B na parte aérea da planta de trigo em função da inoculação com BPCPS. Com relação às doses de N, houve efeito significativo sobre o acúmulo de Fe na parte aérea do trigo. Quanto à interação entre os fatores (BPCPS x N), a ANOVA indicou efeito significativo sobre os acúmulos na parte aérea dos macronutrientes N, P, Mg e S; e não demonstrou efeito significativo para os micronutrientes (Tabela 8).

Conforme dados apresentados na Tabela 9, observa-se que o acúmulo total de macronutrientes na parte aérea do trigo seguiu a seguinte ordem decrescente: N (156,8 kg ha⁻¹) > K (115,2 kg ha⁻¹) > Ca (28,1 kg ha⁻¹) > P (20,3 kg ha⁻¹) > Mg (18,3 kg ha⁻¹) > S (15,6 kg ha⁻¹). Para micronutrientes, a sequência foi: Fe (3404,7 g ha⁻¹) > Mn (751,2 g ha⁻¹) > Zn (233,7 g ha⁻¹) > Cu (202,8 g ha⁻¹) > B (127,0 g ha⁻¹). O nitrogênio destacou-se como o nutriente extraído

em maior quantidade pelo trigo, com valores até superiores à maioria das doses de N aplicadas no experimento (0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), evidenciando a elevada demanda desse nutriente pela cultura do trigo.

Estes resultados reforçam a importância da adoção de estratégias de manejo nutricional que favoreçam o fornecimento adequado de N ao sistema solo-planta, bem como reduzam perdas por processos como volatilização de amônia (NH₃), lixiviação de nitrato (NO₃⁻), desnitrificação (com liberação de óxido nitroso - N₂O) e erosão. Além disso, a imobilização microbiana de N, embora não represente perda definitiva, pode comprometer a disponibilidade do nutriente em momentos críticos do desenvolvimento da planta, a exemplo de as fases de perfilhamento e enchimento de grãos. Cabe destacar que, as perdas de N não afetam apenas a eficiência do uso do fertilizante e o desempenho agrônomo da cultura, mas também impõem riscos ambientais significativos, como contaminação de corpos hídricos por nitrato, emissão de N₂O na atmosfera (gás de efeito estufa), implicando, portanto, não apenas em perdas econômicas, mas em impactos sobre a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

O potássio foi o segundo macronutrientes mais extraído pelo trigo, em média 115,2 kg ha⁻¹; contudo, geralmente a maior parte desse nutriente é restituída ao solo pelos restos culturais da maioria de gramíneas, quando a parte aérea não é removida da área. Estudo em SPD, comparou diferentes quantidades de palha com regimes de adubação potássica e verificaram que a retenção de palha aumentou significativamente a absorção e acúmulo de K na palha e nos grãos, demonstrando melhorias nas frações de K no solo, indicando reciclagem eficaz do potássio via resíduos culturais (Madar *et al.*, 2020). Em sistema de rotação de milho-trigo, o trabalho de Guo *et al.* (2024), utilizou a palhada no lugar do fertilizante potássico e comparou aos tratamentos com e sem adubação de K, obtendo-se como resultado aumento nas concentrações de N e K nos grãos de trigo, indicando que a palhada pode fornecer potássio suficiente para substituir parcialmente o K mineral em sistemas de rotação, mantendo a produtividade e qualidade deste cereal de inverno.

Tabela 8. Valores dos quadrados médios para acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) na parte área em trigo irrigado, em Selvíria - MS, 2023.

FV	DF	— Quadrados Médios Macronutrientes						— Quadrados Médios Micronutrientes —				
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- (kg ha ⁻¹) -----						----- (g ha ⁻¹) -----				
BPCPs*	3	1601 ^{ns}	39,7 ^{ns}	277,5 ^{ns}	122,4 ^{ns}	15,9 ^{ns}	13,4 ^{ns}	1880*	29531 ^{ns}	7.001.676 ^{ns}	37794 ^{ns}	22080 ^{ns}
Doses N	4	5268 ^{ns}	50 ^{ns}	2913,6 ^{ns}	112,7 ^{ns}	36,1 ^{ns}	43,95 ^{ns}	6781 ^{ns}	78585 ^{ns}	42.966.282*	96699 ^{ns}	17216 ^{ns}
BPCPs x Doses N	12	186*	6*	513 ^{ns}	35,9 ^{ns}	4,3*	2,4*	718 ^{ns}	34915 ^{ns}	73.34.410 ^{ns}	31893 ^{ns}	3873 ^{ns}
Blocos	3	76 ^{ns}	3,8 ^{ns}	175 ^{ns}	2,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1266 ^{ns}	6239 ^{ns}	10.575.591 ^{ns}	41563 ^{ns}	1950 ^{ns}
Resíduos	57	81	2,4	180,4	7,3	1,9	1,1	638	8405	4181682	20450,2	711,3
C.V.		5,8	7,6	11,7	9,6	7,5	6,9	19,8	45,2	60,0	19,0	11,4

Nota: Azos = *Azospirillum brasilense*, Azos + Bac = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, Azos + Pseudo = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração da própria autora

Tabela 9. Efeito das inoculações e coinoculações sobre Acúmulo total de nutrientes (grão+palha), para macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn), em plantas de trigo, em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), Selvíria - MS, 2023

	— Acúmulo Total Macronutrientes (Grãos + palha)—						— Acúmulo Total Micronutrientes (Grãos +palha) —				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- (kg ha ⁻¹) -----						----- (g ha ⁻¹) -----				
Sem Inoculação	145,9	20,5	112,0	25,8	18,0	14,5	126,2	228,9	2899,4	731,0	263,2
<i>Azos</i>	157,5	21,4	117,8	26,9	18,2	16,3	124,0	239,7	4223,7	802,9	234,7
<i>Azos+Bac</i>	156,0	18,2	111,9	28,2	17,4	15,4	140,4	157,2	3441,7	703,1	187,0
<i>Azos.+Pseudo</i>	167,8	21,0	118,9	31,5	19,5	16,0	117,4	185,3	3054,2	767,8	249,9
Médias Gerais	156,8	20,3	115,2	28,1	18,3	15,6	127,0	202,8	3404,7	751,2	233,7

Nota: Azos = *Azospirillum brasilense*, Azos + Bac = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, Azos + Pseudo = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo.

Fonte: Elaboração da própria autora

Para o acúmulo de nutrientes nos grãos de trigo, a análise de variância não apresentou efeito significativo da inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas, assim como das doses de nitrogênio para os macronutrientes e micronutrientes avaliados. Já com relação à interação entre os fatores (BPCPs x Doses N), a ANAVA evidenciou efeito significativo para os macronutrientes N, Ca e Mg e para o micronutrientes Cu e Fe (Tabela 10). Resultados similares foram demonstrados por Teixeira Filho *et al.* (2017) na cultura do trigo, onde o tratamento inoculado com *A. brasilense* sob doses de N aumentou a concentração de N, Ca, Mg, Fe e Cu nos grãos de trigo, com ganhos superiores em doses intermediárias de N.

Ao analisar os macro e micronutrientes acumulados nos grãos do trigo (Tabela 11), observa-se que a ordem decrescente de acúmulo foi: N ($124,0 \text{ kg ha}^{-1}$) > K ($29,8 \text{ kg ha}^{-1}$) > P ($17,8 \text{ kg ha}^{-1}$) > Mg ($10,6 \text{ kg ha}^{-1}$) > Ca ($8,4 \text{ kg ha}^{-1}$) = S ($8,0 \text{ kg ha}^{-1}$) >> Fe ($1186,3 \text{ g ha}^{-1}$) > Mn ($335,3 \text{ g ha}^{-1}$) > Zn ($183,3 \text{ g ha}^{-1}$) > Cu ($113,7 \text{ g ha}^{-1}$) > B ($34,2 \text{ g ha}^{-1}$).

O N foi o nutriente mais acumulado nos grãos, refletindo sua importância para formação da proteína. O potássio (K), embora tenha sido o segundo macronutriente mais acumulado nos grãos, representou apenas cerca de 25,86% da quantidade total extraída pela parte aérea da planta (grãos + palha), que foi de $115,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabela 9). Esse dado indica que a maior parte do K foi alocado na palha, sendo essa a principal via de sua restituição ao solo após a decomposição dos restos culturais. Diferente de nutrientes como o N, cuja liberação depende do processo de mineralização, o K não integra estruturas orgânicas da planta e, por isso, é prontamente disponibilizado ao solo após a senescência dos tecidos, contribuindo para o ciclo de nutrientes do sistema produtivo.

Portanto, destaca-se que esta quantidade de nutrientes acumulada nos grãos compreende à fração que é exportada da lavoura juntamente com o produto colhido; de forma que, é relevante sua avaliação em estudos agrônômicos que envolvam fertilidade do solo e nutrição de plantas, pois conhecer o fluxo e acúmulo de nutrientes na cultura, assim como o volume exportado via grãos, são norteadores de práticas de manejos, que permitem dimensionar tomada de decisão na recomendação de adubação, para a reposição de nutrientes ao solo, visando a manutenção dos estoques no solo e do potencial produtivo do solo em longo prazo (Jones *et al*, 2013).

Tabela 10. Quadrados médios para a quantidade acumulada de nutrientes no grão de trigo irrigado para macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Fe, Mn e Zn), conforme afetado pelas doses de N associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs), em Selvíria, MS, 2023

FV	DF	— Acúmulo de Macronutrientes nos Grãos						— Acúmulo de Micronutrientes nos Grãos —				
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- (kg ha ⁻¹) -----						----- (g ha ⁻¹) -----				
BPCPs*	3	618 ^{ns}	26,1 ^{ns}	143,1 ^{ns}	3,98 ^{ns}	9,14 ^{ns}	5,3 ^{ns}	491 ^{ns}	25599 ^{ns}	8508975 ^{ns}	36143,63 ^{ns}	17556 ^{ns}
Doses N	4	2952 ^{ns}	38,4 ^{ns}	134,21 ^{ns}	14,1 ^{ns}	14,83 ^{ns}	11,7 ^{ns}	155,0 ^{ns}	28166 ^{ns}	10996116 ^{ns}	29127,78 ^{ns}	11413 ^{ns}
BPCPs x Doses N	12	124*	5,9 ^{ns}	21,05 ^{ns}	0,81*	2,2*	0,40 ^{ns}	57,4 ^{ns}	10748*	4466699,8*	5941,96 ^{ns}	3632 ^{ns}
Blocos	3	75 ^{ns}	1,97 ^{ns}	16,8 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,36 ^{ns}	42,1 ^{ns}	2134 ^{ns}	5358115 ^{ns}	905,81 ^{ns}	1184
Resíduos	57	56,2	2,3	12,4	0,4	1,1	0,3	22,3	4665	1872133	4106,89	599,96
C.V.		6,1	8,4	11,8	7,5	10,1	6,6	13,8	29	27	19,1	13,3

Nota: *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. CV = coeficiente de variação. Fonte: Elaboração da própria autora

Tabela 11. Efeito das inoculações e coinoculações sobre acúmulo de nutrientes nos grãos de trigo, para macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn), em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), Selvíria - MS, 2023

FV	— Acúmulo de Macronutrientes (Grãos) —						— Acúmulo de Micronutrientes (Grãos) —				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- (kg ha ⁻¹) -----						----- (g ha ⁻¹) -----				
Sem Inoculação	117,6	18,8	32,2	8,6	10,9	7,9	34,4	141,7	1225,1	364,4	215,1
<i>Azos</i>	129,1	18,4	31,2	8,7	10,9	8,5	40,3	144,2	2038,7	371,1	191,1
<i>Azos+Bac</i>	121,0	16,2	26,1	7,8	9,6	7,3	28,1	70,1	465,8	278,5	143,8
<i>Azos+Pseudo</i>	128,0	17,9	29,8	8,7	11,0	8,2	34,1	98,9	1015,6	327,1	183,2
Médias Gerais	124,0	17,8	29,8	8,4	10,6	8,0	34,2	113,7	1186,3	335,3	183,3

Nota: *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+ Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+ Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. Fonte:

Elaboração da própria autora

Pela Tabela 13, pode-se observar quanto foi o acúmulo de macronutrientes e micronutrientes na palha do trigo, sendo que, estes seguem a seguinte ordem decrescente: K (85,4 kg ha⁻¹) > N (32,8 kg ha⁻¹) > Ca (19,6 kg ha⁻¹) > Mg (7,7 kg ha⁻¹) > S (7,6 kg ha⁻¹) > P (2,5 kg ha⁻¹) >> Fe (2218,4 g ha⁻¹) > Mn (415,9 g ha⁻¹) > B (92,8 g ha⁻¹) > Cu (89,0 g ha⁻¹) > Zn (50,4 g ha⁻¹). A cultura do trigo é reconhecida pela elevada produção de palha, a qual desempenha papel fundamental na cobertura do solo e ciclagem de nutrientes.

Dentre os macronutrientes reciclados, o K se destaca mais uma vez por sua expressiva concentração nos resíduos culturais. Conforme apresentado na Tabela 12, a quantidade de potássio acumulada na palha, supera em mais de 2,5 vezes o acúmulo de N, além de ser significativamente superior aos demais nutrientes analisados, evidenciando sua importância no retorno ao sistema solo-planta.

Em relação à redistribuição do N absorvido na parte aérea da planta, em média 79% do N foi alocado nos grãos, e 21% na palha. Estes dados evidenciam que a maior parte do nitrogênio absorvido pela planta, é exportada junto aos grãos durante a colheita, enquanto apenas uma fração menor (pouco mais de um quinto) é retomada ao solo por meio dos resíduos culturais. Em contrapartida, o K apresentou comportamento inverso: aproximadamente 25% foi exportado nos grãos, ao passo que cerca de 75% permaneceu na palha, sendo potencialmente reciclado ao solo após a decomposição dos restos culturais. Esse cenário reforça a importância do manejo eficiente dos nutrientes, especialmente em um contexto nacional em que o Brasil figura como quarto maior consumidor mundial de fertilizantes, importando em média cerca de 85% da demanda nacional (MAPA, 2023).

Tabela 12. Efeito das inoculações e coinoculações sobre acúmulo de nutrientes na palhada (restos culturais), para macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn), em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), Selvíria - MS, 2023.

FV	— Acúmulo de Macronutrientes (Palhada)						— Acúmulo de Micronutrientes (Palhada)				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	------(kg ha ⁻¹) -----						------(g ha ⁻¹) -----				
Sem Inoculação	28,3	1,7	79,8	17,2	7,1	6,6	91,9	87,1	1674,3	366,6	48,1
<i>Azos</i>	28,4	3,0	86,6	18,2	7,3	7,8	83,8	95,5	2185,0	431,8	43,6
<i>Azos+Bac</i>	35,0	2,0	85,8	20,4	7,8	8,1	112,3	87,1	2975,9	424,6	43,2
<i>Azos.+Pseudo</i>	39,8	3,1	89,1	22,8	8,5	7,8	83,3	86,4	2086,3	442,7	67,4
Médias Gerais	32,8	2,5	85,4	3,0	86,6	18,2	92,8	89,0	2218,4	415,9	50,4

Azos = *Azospirillum brasilense*, Azos+ Bac = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, Azos+ Pseudo = *A. brasilense*+*Pseudomona*

Fonte: Elaboração da própria autora

4.4 EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO FERTILIZANTE (¹⁵N) E DO SOLO PELO TRIGO SOB INOCULAÇÃO COM BACTÉRIA PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

De acordo com a Tabela 13, para o conteúdo de N na palha (Massa seca de palha), houve efeito significativo do uso das BPCPs e das doses de N, porém a interação entre os fatores (BPCPs x Doses N) não apresentou significância. Com relação ao conteúdo de N nos grãos, ocorreu o inverso, somente a interação apresentou significância. Para as variáveis massa seca de palha; acúmulo de N na palha e nos grãos; e quantidade de N na planta proveniente do solo ocorreu o mesmo resultado, somente a interação entre os fatores apresentou significância.

Em relação à porcentagem de N na planta derivada do fertilizante (NPPF, %) na palha e nos grãos, houve efeito significativo tanto para as doses de N quanto para o uso das bactérias promotores de crescimento em plantas (Tabela 13), isso indica que ambos os fatores influenciaram a eficiência com que o N do fertilizante foi absorvido pela planta, tanto na palha quanto nos grãos.

Por outro lado, a quantidade de N na planta derivada do fertilizante (QNPPF, kg ha⁻¹) na palha, apresentou efeito significativo somente para interação (BPCPs x Doses N). No entanto, já nos grãos apresentou significância de forma isolada, tanto nos tratamentos com uso das BPCPs como nos tratamentos com aplicação das doses de N, não apresentando significância na interação entre os fatores (Tabela 13). Isso indica que, para que as BPCPs estimulem a

absorção e redistribuição de N na palha, depende da dose de N disponível no solo, fazendo com a alocação de N responda fortemente à combinação de BPCPs + doses de N. Contudo, a alocação de N ao grão é mais estável, sendo dependente da remobilização de N da parte vegetativa durante a fase reprodutiva, sendo menos influenciada pela presença da BPCPs, ou seja, tanto as doses de N quanto o uso de BPCPs influenciam o acúmulo de N nos grãos, porém cada fator atua de forma independente para este caso (Rodrigues *et al.*, 2000).

Quanto a eficiência no uso do nitrogênio (EUN, %), verificou-se efeito significativo na palha e nos grãos de trigo nos tratamentos com uso das BPCPs e nos tratamentos com diferentes doses de N. Isso implica que, o nitrogênio aplicado via fertilizante foi melhor aproveitado pela planta e o uso BPCPs aumentou a absorção e translocação de N para o interior da planta.

Tabela 13. Quadrados médios sobre a produtividade de grãos e palha, teor de N, N acumulado, concentração de ^{15}N na planta, porcentagem (NPPF) e quantidade de N na planta derivada de fertilizantes (QNPPF) e do solo (absorção de N), eficiência de uso de nitrogênio (EUN) por planta de trigo, conforme afetado pelas doses de N e associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs), utilizando a técnica de diluição isotópica de ^{15}N . Selvíria, MS, 2023

Variáveis analisadas	Quadrados Médios		
	BPCPs	Doses N	BPCPs x Doses N
PALHA			
Teor de N na palha	8.677240*	2.531823*	0.432378 ^{ns}
Massa seca de palha	854028.8 ^{ns}	927792.2 ^{ns}	761632.168403*
Acúmulo de N	486.386250 ^{ns}	31.683750 ^{ns}	54.938333*
^{15}N na palha	0.032240*	0.386823*	0.007517 ^{ns}
NPPF	153.766042*	1895.982708*	41.140903 ^{ns}
QNPPF	90.223906 ^{ns}	290.688073 ^{ns}	15.248628*
EUN %	84.920573*	146.558906*	4.082378 ^{ns}
GRÃOS			
Teor de N	0.152917 ^{ns}	1.729167 ^{ns}	0.742917*
Produtividade de Grãos	805210.729167*	1061169.062500*	135581.895833 ^{ns}
Acúmulo de N	647.654375 ^{ns}	791.819375 ^{ns}	91.559792*
^{15}N nos grãos	0.057292*	0.301875*	0.013542 ^{ns}
NPPF	253.910573*	1507.305573*	69.984462 ^{ns}
QNPDFF	657.867917*	3116.005417*	114.227222 ^{ns}
EUN %	388.852083*	1443.397083*	73.961111 ^{ns}
PALHA + GRÃOS			
EUN %	820.481823*	2568.540156*	66.354045 ^{ns}
QPPF	1158.279375*	5292.722708*	177.679792 ^{ns}
Acúmulo de N	1567.828542*	988.321875*	144.780347 ^{ns}
NPPS	42.800573 ^{ns}	1654.815990 ^{ns}	432.685573*

Nota: *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo. NPPF = porcentagem de N na planta derivada do fertilizante, QNPPF = quantidade de N na planta derivada do fertilizante em kg ha⁻¹, EUN = eficiência de uso de nitrogênio, NPPF = porcentagem de N na planta derivada do fertilizante, NPPS = porcentagem de N na planta derivada do solo.

Fonte: Elaboração da própria autora

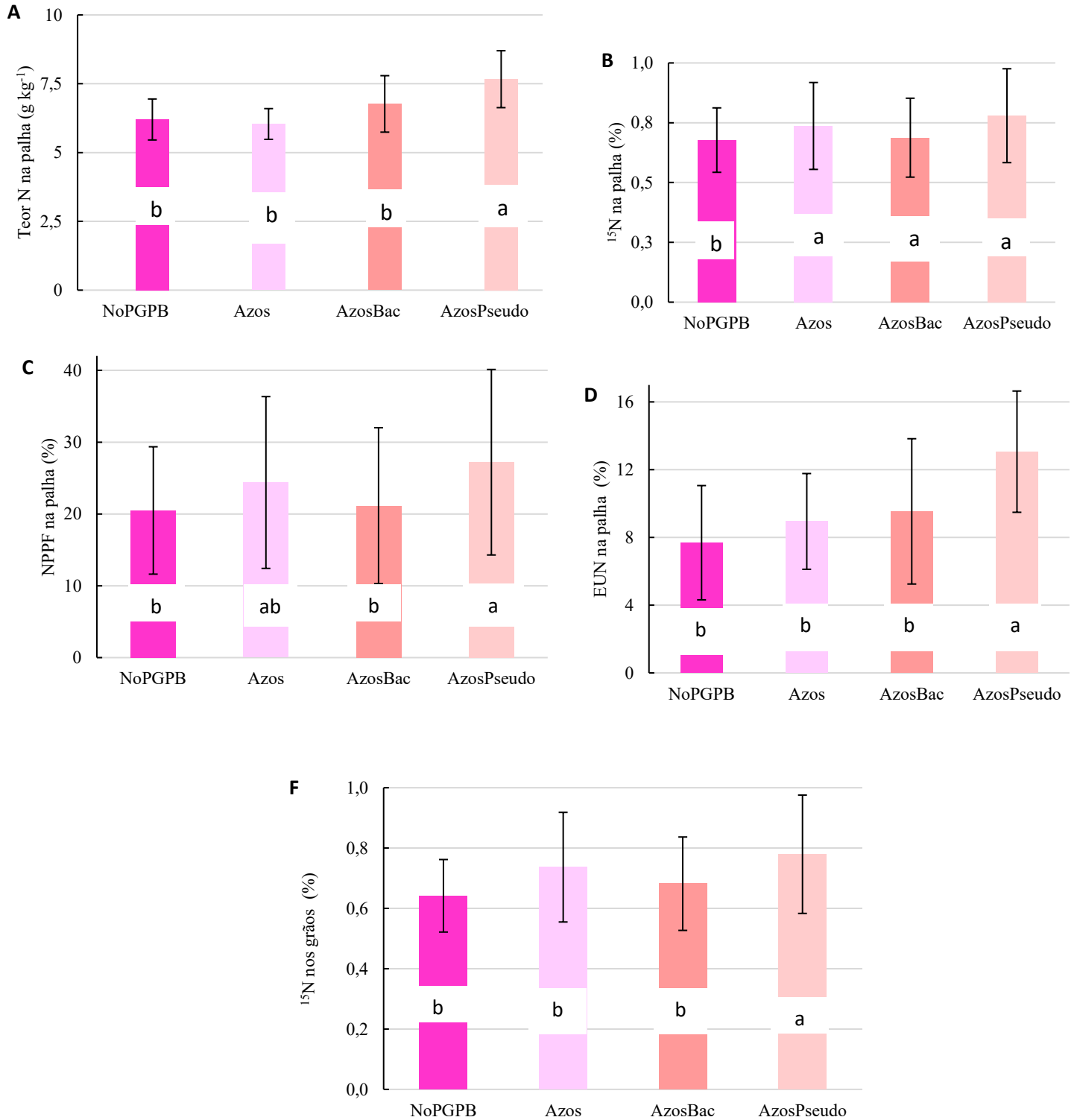
Nas figuras 12A e 12D respectivamente, observa-se que o tratamento que recebeu *Azos+Pseudo* se diferiu de todos os outros tratamentos para o conteúdo de N e EUN na palha, assim como apresentou maiores valores de média. Ganha-se destaque mais uma vez o tratamento de *A. brasilense+P. fluorescens* para a concentração de ¹⁵N nos grãos (Figura 12F), sendo este tratamento divergente dos demais, inclusive da testemunha. Para a concentração de ¹⁵N na palha (Figura 12B), o tratamento de *Azos+Pseudo* apresentou um comportamento diferente, tendo diferença estatística somente do tratamento testemunha.

Desta forma, a associação dos microrganismos benéficos, favoreceram a absorção e acúmulo nos grãos do N mineral aplicado via fertilizante, indicando eficiência na redistribuição e remobilização de N da parte vegetativa durante o enchimento dos grãos e, ainda, evidenciando a capacidade das BPCPs em modular rotas fisiológicas e metabólicas na planta. Por sua vez, na palha, embora os tratamentos com BPCPs aumentem a absorção total de N, eles também estimulam sua translocação para os grãos, o que reduz o acúmulo de ¹⁵N residual na palha, o que explica a não diferença entre os tratamentos com BPCPs (Rodrigues *et al.*, 2000; Alves *et al.*, 2017).

Em relação à porcentagem de N na palha proveniente do fertilizante (NPPF) (Figura 12C), o tratamento que recebeu a coinoculação de *A. brasilense+P. fluorescens* apresentou diferença significativa em relação ao tratamento de *A. brasilense+B. subtilis*, assim como da testemunha. Logo, pode-se inferir que a coinoculação aumentou a capacidade da planta de absorver N diretamente do fertilizante e possibilitou sua permanência na parte vegetativa.

De modo geral, a coinoculação com BPCPs melhora significativamente a absorção e recuperação de nitrogênio aplicado no trigo, promove alocação e concentração de N nos tecidos vegetativos e nos grãos, favorecendo o sistema solo-planta (Gaspareto *et al.*, 2023; Galindo *et al.*, 2022).

Figura 12. Efeito das inoculações e coinoculações sobre os teores de nitrogênio na palha (A); concentração de ^{15}N na palha (B); porcentagem de N na palha derivado de fertilizante – NPPF (C); eficiência de uso de nitrogênio (EUN) pela palha (D) e concentração de ^{15}N nos grãos (F), em plantas de trigo, em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), em Selvíria - MS, 2023



Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Elaboração da própria autora

Quanto à %NPPF no grão, pode-se observar pela Figura 13A que o tratamento com coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens* se diferenciou do tratamento com coinoculação de *A. brasilense*+*B. subtilis*, bem como se diferenciou do tratamento sem inoculação. Observa-se que o mesmo resultado é demonstrado na Figura 13D, para a quantidade de nitrogênio total (na palha+grãos) advindo de fertilizantes (QNPPF). Portanto, a combinação *A. brasilense*+*P. fluorescens* foi mais eficiente em estimular a absorção, translocação e remobilização do N mineral para os grãos, sendo crucial para aumentar a produtividade e reduzir perdas de N, pois maximiza o uso dos fertilizantes aplicados. E ainda, demonstrou maiores eficiências na absorção geral de N aplicado via adubação, não só o N exportado pelos grãos, mas também o retido na palha, o que indica que esta associação de BPCPs, melhora a capacidade da planta de captar e utilizar N mineral ao longo do ciclo (Mattos *et al.*, 2023; Galindo *et al.*, 2022; Saubidet *et al.*, 2002).

Com relação à quantidade de nitrogênio nos grãos proveniente do fertilizante (QNPPF), o tratamento com coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens* e *A. brasilense* isoladamente se diferenciaram do tratamento sem inoculação, mas não se diferenciaram entre si. Já o tratamento com *A. brasilense*+*B. subtilis* não apresentou diferença significativa de nenhum dos tratamentos (Figura 13B).

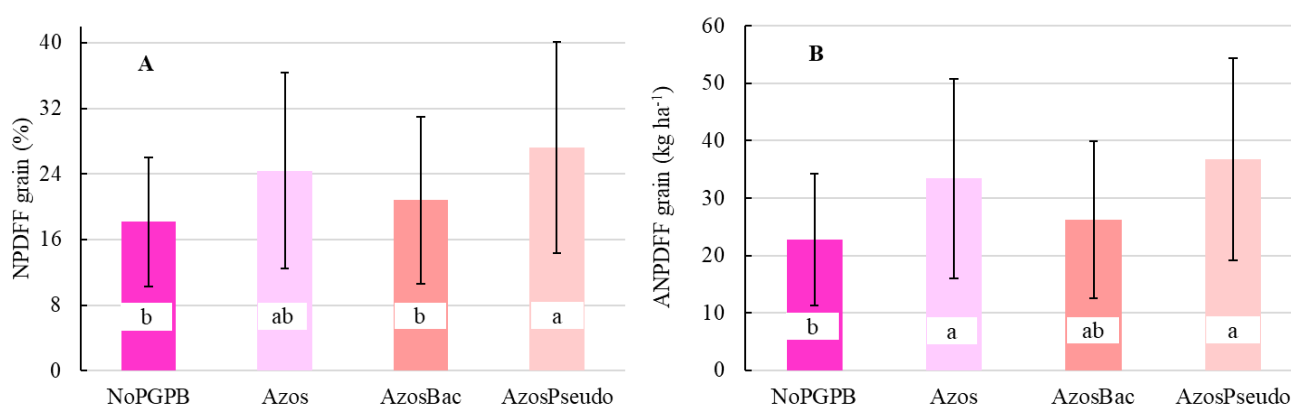
Para a recuperação, aproveitamento ou eficiência de uso do N proveniente do fertilizante (EUN) nos grãos, os resultados obtidos são similares aos anteriores, sendo que o tratamento com coinoculação de *A. brasilense*+*P. fluorescens* se diferenciou de todos os tratamentos que receberam inoculação de BPCPs, e ainda da testemunha (Figura 13C). Por sua vez, o tratamento com inoculação isolada (*Azot*) só se diferenciou estatisticamente do tratamento testemunha, resultado este ocorrido também para a NUE total (grão+palha) (Figura 13E). Além disso, para a EUN total (grão + palha) o tratamento de *A. brasilense*+*P. fluorescens* demonstrou diferença significativa de *A. brasilense*+*B. subtilis*, tendo o tratamento isolado apresentado diferença estatística somente do tratamento na ausência de inoculação (testemunha).

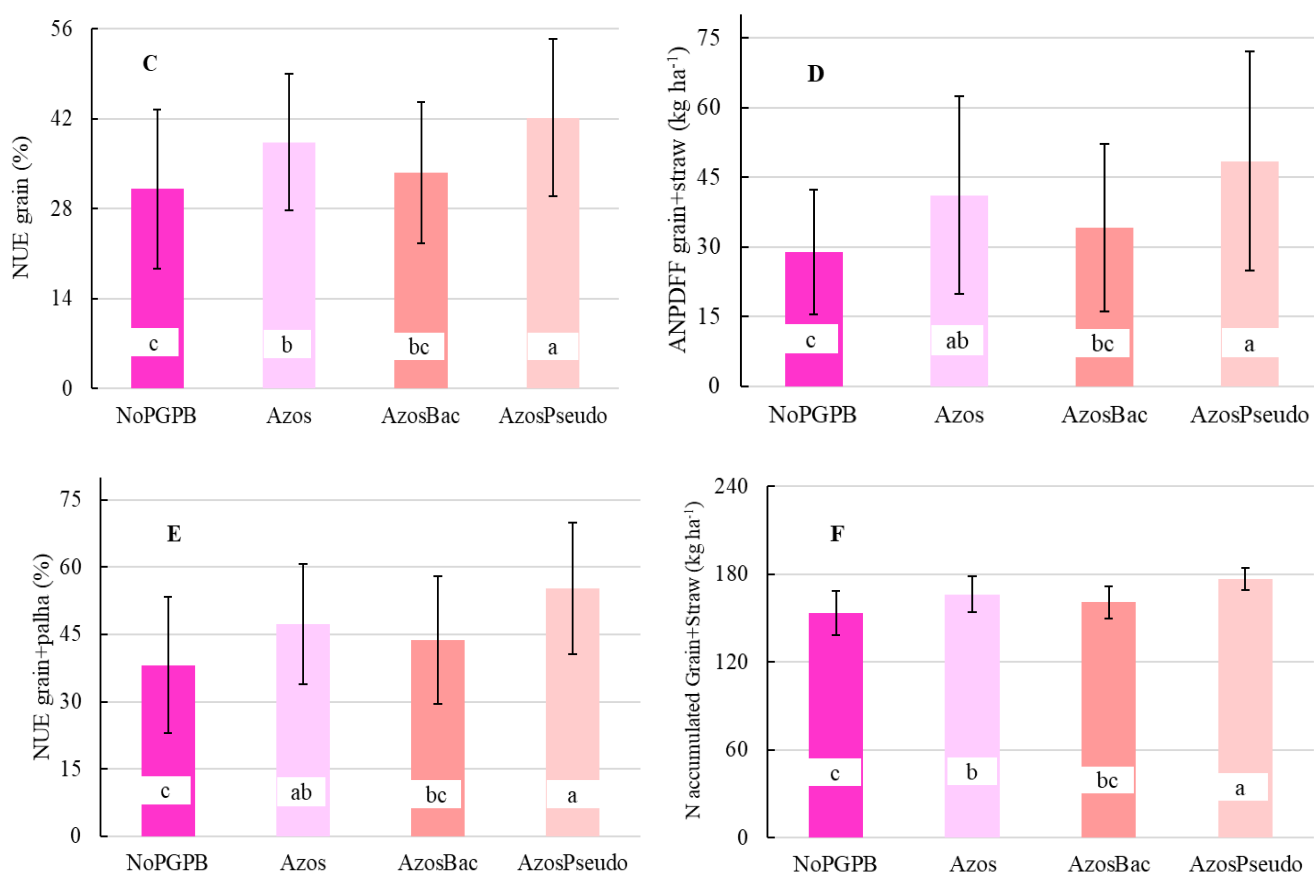
Estes resultados sugerem que o uso isolado e a combinação de diferentes bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs), potencializam o uso do N fertilizante pela planta, principalmente quando estas possuem características sinérgicas mais eficazes entre si, o que promove o melhor aproveitamento do N tanto nos grãos quanto na planta como um todo (grãos + palha). Como foi observado, o uso isolado das BPCPs, também demonstrou eficiência no uso do N aplicado, porém a associação de bactérias permitiu utilização mais efetiva, logo o uso associado é fundamental para potencializar a eficiência e reduzir perdas por volatilização e/ou lixiviação (Naiman *et al.*, 2009; Mattos *et al.*, 2023; Sandini *et al.*, 2024).

Se tratando do acúmulo de nitrogênio total – grãos + palha (Acúmulo de N), destaca-se o tratamento *A. brasilense*+*P. fluorescens*, que se diferiu dos demais tratamentos inoculados e também da testemunha. O tratamento com uso isolado (*A. brasilense*) apresentou diferença estatística do tratamento sem inoculação. Evidenciando que, o uso mesmo isolado das BPCPs, traz benefícios à produção da cultura, sendo a adoção dessa tecnologia crucial para incrementos de produtividade e promoção de produção sustentável e acessível, já que apresenta fácil aplicabilidade, baixo custo ao produtor e é não-poluente.

Outros estudos demonstram que estes microrganismos contribuem para a melhoria da nutrição vegetal, por meio do aumento da disponibilidade de nutrientes que propiciam à absorção, além de outros mecanismos benéficos (Hungria *et al.*, 2010), da fixação biológica de N e do incremento da eficiência do uso do nitrogênio (Galindo *et al.*, 2016; Hungria *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2018). E ainda, as BPCPs influenciam a produção de reguladores hormonais, além de estimularem o desenvolvimento radicular.

Figura 13. Efeitos das inoculações e coinoculações sobre a porcentagem de nitrogênio no grão derivado da adubação NPPF (A); quantidade de nitrogênio no grão derivado de fertilizante - NPPF (B); eficiência de uso de nitrogênio pelo grão - EUN (C); quantidade de nitrogênio derivado de fertilizante no grão+palha – (total) NPPF (D); eficiência de uso de nitrogênio por planta (total) – grãos + palha EUN (E), e nitrogênio acumulado total – grãos + palha (F), em trigo irrigado, em função da ausência de inoculação (testemunha); *Azospirillum brasilense* (Azos); *A. brasilense*+*Bacillus subtilis* (AzosBac); *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens* (AzosPseudo), em Selvíria - MS, 2023.





Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração da própria autora

Analisando a Figura 14A, observa-se que para o conteúdo de N na palha houve um incremento linear, indicando que o teor de N na palha aumenta linearmente com o aumento da dose de N aplicada. Além disso, o valor de R^2 próximo a 62%, indica consistência nas afirmações, pois significa que 62% da variação no conteúdo de N na palha, pode ser explicada pelas doses de N aplicadas, porém outros fatores também interferem neste teor, como microbiota do solo e eficiência de absorção. Este conteúdo de N palha é crucial para o equilíbrio do sistema solo-planta, uma vez que, quanto maior a quantidade de N disponível nos restos culturais (palha), maior possibilidade desde N retornar ao solo e ser reaproveitado por culturas subsequentes.

Para o nitrogênio marcado na palha (^{15}N na palha), houve um aumento linear crescente (Figura 14B), indicando que, a cada incremento de aplicação de N, a concentração de ^{15}N na palha aumenta, sendo assim, ocorre influência direta da adubação nitrogenada sobre a absorção de N pela parte vegetativa do trigo. O valor do R^2 alto, confirma a eficiência do uso do ^{15}N como “ferramenta” para estudos da dinâmica do N no sistema solo-planta, pois permitiu

identificar com precisão o quanto do nitrogênio presente na palha foi derivado diretamente do fertilizante aplicado, resultados validados também no trabalho de Ma *et al.* (2024).

Quanto ao nitrogênio derivado do fertilizante na palha (%NPPF), os resultados obtidos foram os mesmos do ^{15}N na palha, os dados se ajustaram ao modelo linear crescente (Figura 14C). Este resultado já era esperado, pois a %NPPF é calculada a partir do rastreamento isotópico do ^{15}N , tendo assim coerência entre os dados brutos e os percentuais calculados. Isso sugere que o trigo, durante seu desenvolvimento vegetativo tem alta capacidade de captar o N aplicado, sendo importante para seu crescimento inicial, formação da biomassa e estabelecimento de colmos (Chen *et al.*, 2016; Espinal *et al.*, 2016).

A Figura 14D demonstra que a eficiência no uso do nitrogênio (EUN, palha) na palha de trigo em função das doses de N aplicadas, se ajustaram a uma equação de regressão quadrática em forma de parábola decrescente. Isso sugere que, até certo ponto, o aumento da dose de N ainda proporciona alta eficiência, mas a partir de doses mais altas, a eficiência na palha se estabiliza ou pode até reduzir. Este comportamento é esperado em gramíneas como o trigo, especialmente sob doses crescentes de adubação, visto que, durante seu desenvolvimento inicial, a parte vegetativa é o principal compartimento de acúmulo de N, mas à medida que a cultura cresce e há mais N disponível facilmente, ocorre maior translocação do nutriente para os grãos (El-Sanatawy *et al.*, 2021).

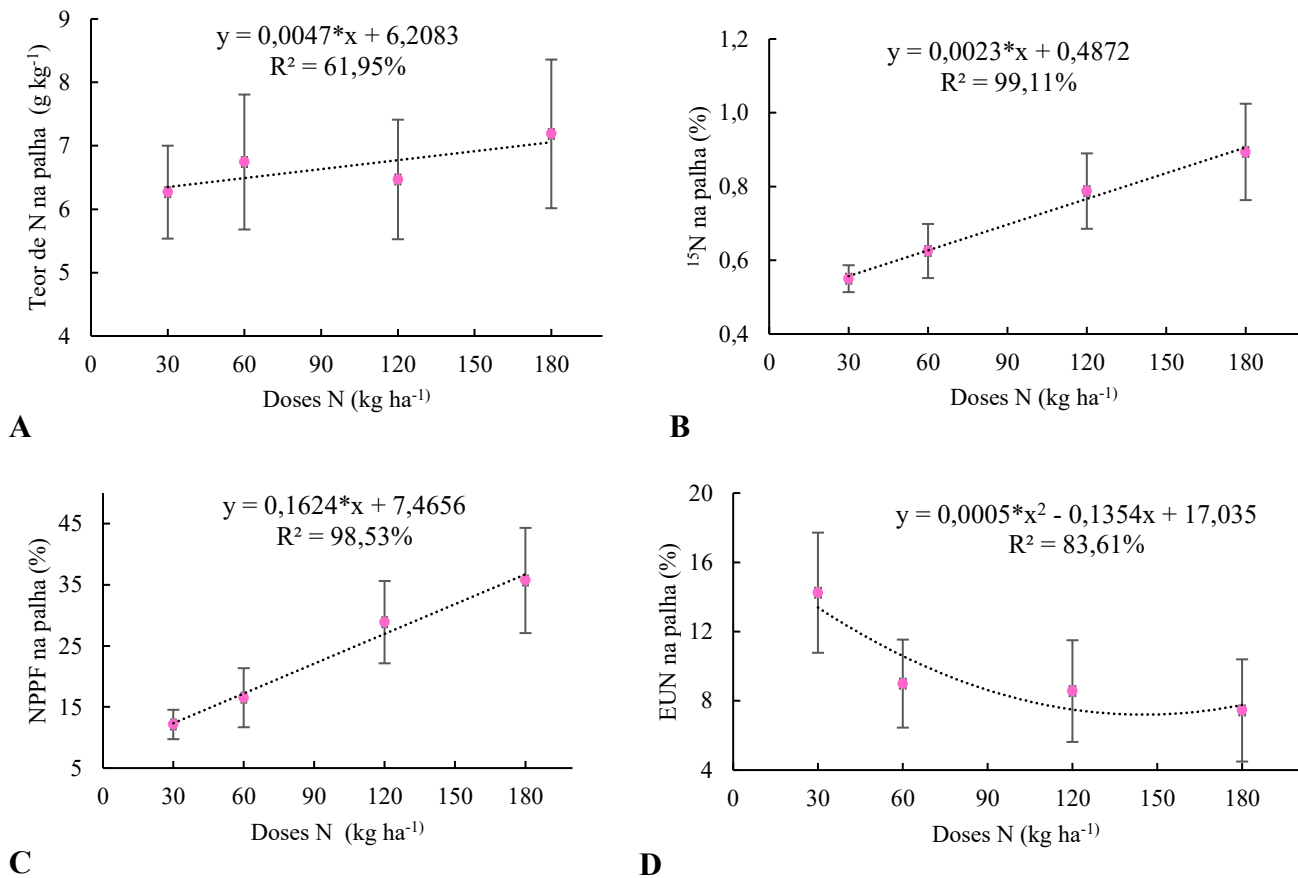
Os dados apresentados na Figura 14E, referem-se à produtividade de grãos dos tratamentos que receberam a doses de N enriquecidas com ^{15}N , ou seja, não estão incluídos os tratamentos com a dose 0, somente as doses de 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹. Assim, o incremento da dose de nitrogênio em relação a estas produtividades de grãos, proporcionaram uma curva de regressão que se ajustaram ao modelo quadrático, o que indica que há um ponto ótimo de produtividade, em que após o qual, o aumento da dose de N, não resultara mais em aumento proporcional na produtividade dos grãos.

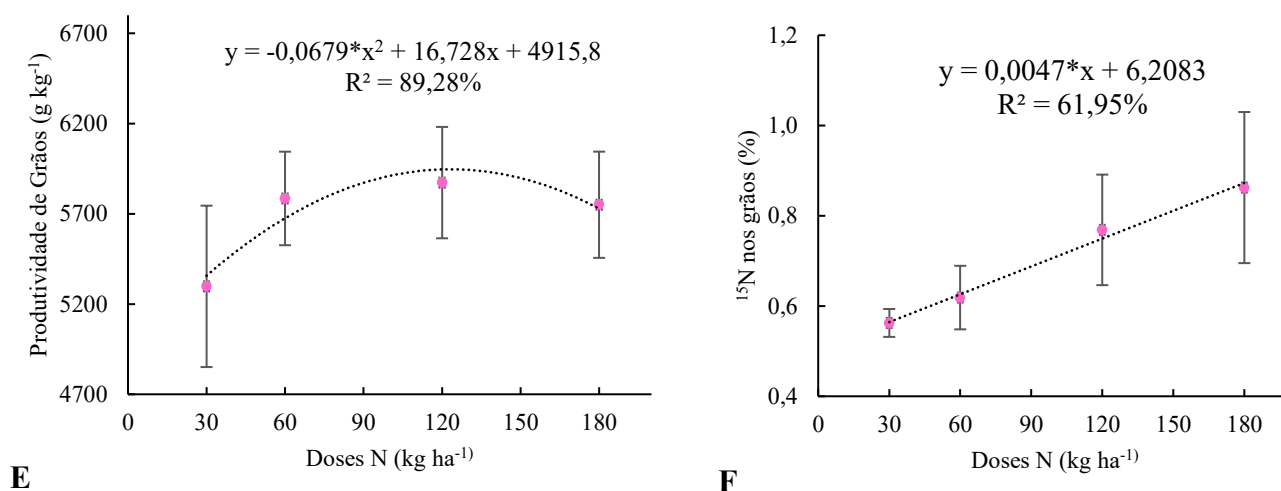
O nível ótimo de nitrogênio para que a máxima produtividade seja alcançada, foi com a dose de 123,2 kg ha⁻¹, o que proporcionou 5.946 kg ha⁻¹ de grãos. Em estudo comparando-se cinco doses de N, a produtividade de grãos aumentou até 250 kg ha⁻¹, mas a eficiência do uso de N foi otimizada entre 120 a 171 kg ha⁻¹ de N (Ma *et al.*, 2019). Outro trabalho, realizado também na região de Cerrado, apresentou dose ótima de 124 kg ha⁻¹ de N (Teixeira Filho *et al.*, 2010), enquanto que, Galindo *et al.* (2017), encontraram em sua pesquisa, ponto de máxima produtividade na dose de 139 kg ha⁻¹ de N.

Para a concentração de ^{15}N nos grãos, a figura 14F apresentou uma curva de regressão linear crescente, ou seja, a cada dose de N ocorre aumento constante da % de ^{15}N nos grãos.

Portanto, com o aumento da disponibilidade de N fertilizante no solo, a planta de trigo direciona mais nitrogênio absorvido para os grãos, o que é esperado que ocorra nas fases de enchimento e maturação dos grãos.

Figura 14. Efeitos das diferentes Doses de N (30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) sobre o teor de nitrogênio (A); concentração de ¹⁵N (B); porcentagem de N derivada do fertilizante (NPdff) (C); eficiência de uso de nitrogênio (NUE) (D) na palha e Produtividade (E) e concentração de ¹⁵N (F) nos grãos, em trigo irrigado, em Selvíria - MS, 2023





Fonte: Elaboração da própria autora

Na figura 15A, observa-se que a porcentagem de N nos grãos (% NPPF) advindo do fertilizante ajustou a uma curva de regressão linear crescente, portanto o aumento de aplicação de N-fertilizante melhora a disponibilidade N e consequentemente garante alta eficiência de absorção. Como o grão é o principal órgão de reserva da planta, grande parte do N disponível é absorvido e por ser facilmente translocado, o N absorvido se armazenam nos grãos.

Do mesmo modo ocorreu com a quantidade de nitrogênio nos grãos proveniente do fertilizante (QNPPF) (Figura 15B), tendo ajuste linear crescente em função da dose de N aplicada, o que vai de encontro com o resultado descrito para %NPPF, pois na Figura 15A verifica-se a porcentagem relativa de nitrogênio advindo do fertilizante no grão, enquanto a Figura 15B mostra o valor absoluto (kg ha^{-1}). Assim, ambos confirmam a eficiência da adubação nitrogenada para nutrir diretamente os grãos de trigo e o efeito direto e positivo sobre a quantidade de N acumulado nos grãos.

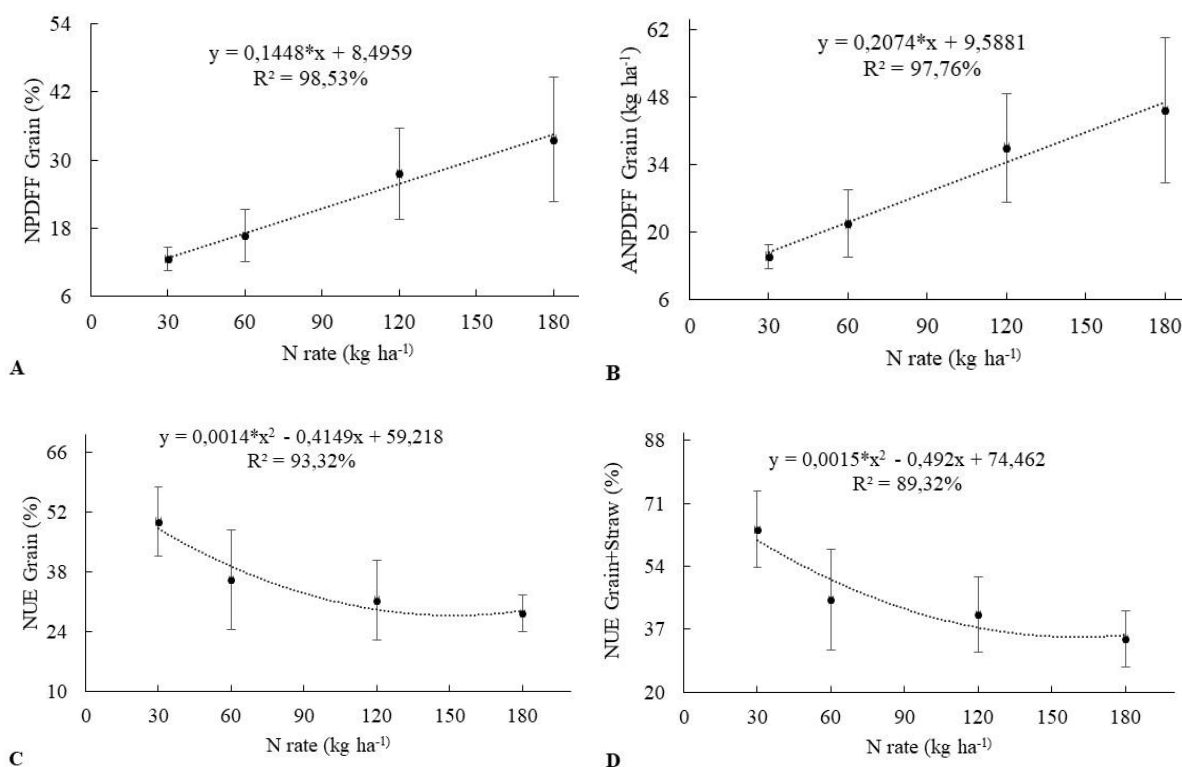
Na Figura 15E, é demonstrado que, a quantidade de nitrogênio proveniente do fertilizante na palha e nos grãos (QNPPF – grãos + palha) aumentaram linearmente em função do aumento das doses de N. Durante o crescimento inicial, o trigo tende a acumular nitrogênio principalmente nos colmos e folhas (que mais tardiamente, vira palha), o que também contribui para esta soma total de N absorvido, porém na fase de enchimento dos grãos, esse N é parcialmente redistribuído para os grãos.

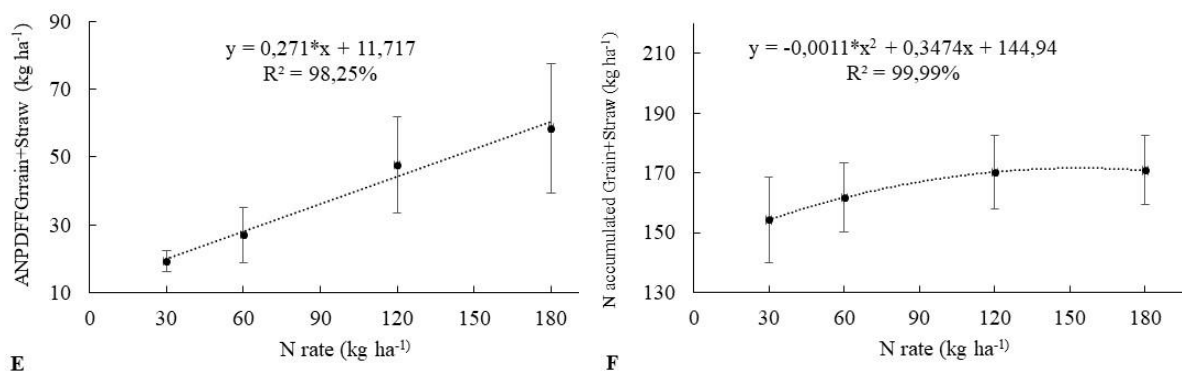
Para os valores de EUN nos grãos, a Figura 15C demonstra que os dados se ajustaram ao modelo quadrático decrescente de regressão, sendo este resultado apresentado também para análise da NUE de grãos + palha (Figura 15D). Desta forma, o aumento na aplicação de doses de N diminui a eficiência do uso do nitrogênio, podendo ser explicado pelo fato de que, em

doses mais baixas a planta consegue aproveitar melhor o nitrogênio aplicado, mas em doses altas, pode ocorrer saturação ou perdas. Esses resultados reforçam a importância do manejo racional do N, a fim de promover máxima eficiência do nitrogênio pela planta e evitar doses excessivas que resultem em menor retorno produtividade e financeiros.

Quanto a quantidade de nitrogênio acumulada total na planta de trigo (grãos + palha) (Figura 15F), a análise de regressão se ajustou a curva de regressão quadrática crescente, indicando que, à medida que se aumenta a dose de N, o acúmulo de N na planta como um todo também aumenta, mas com ganhos cada vez menores, ou seja, existe um ponto em que o acúmulo de N atinge seu pico, sendo o ponto ótimo, que neste caso é atingido com aproximadamente 158 kg ha⁻¹ de N. A partir de doses maiores, o acúmulo ainda cresce, mas o incremento é cada vez menor, portanto, há limite fisiológico de acúmulo e aproveitamento.

Figura 15. Efeitos das diferentes Doses de N (30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) sobre a porcentagem de nitrogênio no grão derivado do fertilizante NPPF (A); quantidade de nitrogênio no grão derivado de fertilizante - QNPPF (B); eficiência de uso de nitrogênio pelo grão - NUE (C); quantidade de nitrogênio derivado de fertilizante no grão+palha – (total) QNPPF (D); eficiência de uso de nitrogênio por planta (total) – grãos + palha NUE (E), e nitrogênio acumulado total – grãos + palha (F), em trigo irrigado, Selvíria, MS, 2023





Fonte: Elaboração da própria autora

As tabelas abaixo (14 e 15), apresentam as médias das variáveis utilizadas para o cálculo da eficiência de utilização do N-fertilizante (EUN, %) pelo trigo, também chamada de recuperação ou aproveitamento do N provido pelo fertilizante. Esse cálculo foi realizado por meio da técnica de diluição isotópica onde o fertilizante é enriquecido com átomos de ¹⁵N, conforme metodologia proposta pela IAEA (2021). Para o presente estudo, utilizou-se fertilizante com a concentração 1,885% de átomos de ¹⁵N como fonte de nitrogênio, permitindo assim, estimar não apenas a quantidade de nitrogênio absorvido pela planta advindo do fertilizante, mas também o N derivado do solo e de outras fontes, como da FBN.

A análise dos resultados demonstrou que o aumento das doses de nitrogênio proporcionou elevação na concentração de ¹⁵N nos parâmetros: porcentagem e quantidade de N advindo do fertilizante (%NPPF e QNPPF), tanto nos grãos quanto na palha, conforme descrito na Tabela 15. No entanto, observou-se redução na eficiência do uso do nitrogênio (NUE) com incremento das doses, evidenciando que, embora maiores quantidades de N sejam absorvidas, a eficiência relativa de aproveitamento tende a diminuir.

Quanto às inoculações com as BPCPs, a combinação de *Azos* + *Pseudo* promoveu maior %NPPF nos grãos e na palha, assim como no acúmulo total de N (considerando o N proveniente do fertilizante + do solo), sugerindo efeito sinérgico entre o uso de bioinsumos e a adubação nitrogenada. Além disso, os tratamentos inoculados, tanto isolado quanto associados com mais de uma bactéria, favorecem maior absorção de N proveniente do solo (QNPPS). Estudos demonstram que as BPCPs estimulam reguladores de crescimento como ácido abscísico, poliaminas, além de, beneficiar o crescimento radicular, que é o principal órgão responsável pela absorção de nutrientes e água (Zhao *et al.*, 2023; Cohen *et al.*, 2015).

Tabela 14. ANOVA sobre Produtividade de grãos, massa seca de palha e acúmulo total de N na planta (grãos e palha) de trigo, em função de doses de N associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs) em Selvíria – MS, 2023

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Produtividade		Teor de N		Acúmulo de N		
	kg ha ⁻¹		g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹		
	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Total
30	5297,9	5297,94	22,7	6,27	118,99	35,3	154,29
60	5784,9	5784,94	22,9	6,74	128,71	33,1	161,81
120	5872,8	5872,69	23,4	6,47	135,25	35,1	170,35
180	5750,8	5750,06	23,4	7,19	134,24	36,6	170,84
BPCPs	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Total
Sem Inoculação	5516,4b	5126,6a	23,0a	6,20b	121,7a	31,7a	153,37c
<i>Azos</i>	5859,9b	5215,9a	23,2a	6,04b	133,7a	32,58a	166,28ab
<i>Azos+Bac</i>	5450,9a	5518,2a	23,0a	6,76b	124,8a	35,95a	160,75bc
<i>Azos+Pseudo</i>	5878,8a	5605,0a	23,1a	7,67a	134,4a	42,45a	176,86a

Tabela 15. ANOVA sobre Concentração de ¹⁵N (grãos e palha), porcentagem de nitrogênio na planta derivada de fertilizante (%NPPF), quantidade de nitrogênio na planta derivada de fertilizante (NPdff), recuperação de nitrogênio da adubação pela planta de trigo (EUN), acúmulo de N total e quantidade de nitrogênio na planta derivada do solo (NPPS), em função das doses de N associadas à ausência de inoculação e inoculação isolada ou com duas bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPBs), por sementes, Selvíria, MS, 2023.

Doses de N (kg ha ⁻¹)	¹⁵ N na Planta		%NPPF		QNPPF			EUN			Acúmulo de N	NPPS
	Atoms% Excesso		—— % ——		—— kg ha ⁻¹ ——			—— % ——			—— kg ha ⁻¹ ——	
	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Total	Grãos	Palha	Total	NPdff+NPDFS	Solo
30	0,5632	0,551	12,56	12,13	14,93	4,26	19,19	49,71	14,24	63,95	154,29	135,11
60	0,618	0,625	16,68	16,51	21,63	5,41	27,04	36,05	8,99	45,04	161,81	134,77
120	0,768	0,787	27,59	28,88	37,500	10,26	47,76	31,26	8,56	39,82	170,29	122,53
180	0,862	0,893	33,64	35,69	45,19	13,39	58,58	28,21	7,44	35,65	170,87	112,29
BPCPs	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Grãos	Palha	Total	Grãos	Palha	Total	NPPF+NPPS	Solo
Sem Inoculação	0,6311b	0,668b	18,13c	20,48b	22,78c	6,16b	28,94c	31,07b	7,69b	38,7c	153,37c	124,4
<i>Azos</i>	0,731a	0,713ab	24,38ab	24,37ab	33,43ab	7,64ab	41,07ab	38,38ab	9,54b	47,9ab	168,28ab	127,1
<i>Azos+Bac</i>	0,681ab	0,687ab	20,78bc	21,16b	26,28bc	7,78ab	34,06bc	33,64b	8,94b	42,6bc	160,76bc	126,7
<i>Azos+Pseudo</i>	0,768a	0,768a	27,19a	27,19a	36,76a	11,73a	48,49a	42,14a	13,06a	55,2a	176,86a	128,4

Nota: Médias seguidas da mesma letra dentro de uma coluna não diferiram estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Azos* = *Azospirillum brasilense*, *Azos+Bac* = *A. brasilense*+*Bacillus subtilis*, *Azos+Pseudo* = *A. brasilense*+*Pseudomonas fluorescens*. *: Significativo pelo teste F a 5%; Ns: não significativo.

Fonte: Elaboração da própria autora

De modo geral, as bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs), atuam em múltiplos mecanismos, modulam crescimento e desenvolvimento da planta, bem como promovem a solubilização de nutrientes, produção de sideróforos, liberação de enzimas e redução do estresse oxidativo, o que contribui para ambiente rizosférico mais favorável ao aproveitamento do N-fertilizante e do solo. Com a aplicação de doses crescentes de N, o metabolismo da planta é impulsionado, intensificando a assimilação de N pelas vias enzimáticas, como a do nitrato redutase e da glutamina sintetase, os quais são potencializados na presença das BPCPs (Balotf *et al.*, 2016; Fanazi *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

A absorção e acúmulo total de nutrientes pela planta inteira de trigo (palha + grãos), seguiram a seguinte ordem decrescente: N > K > Ca > P > Mg > S > Fe > Mn > Zn > Cu > B, independente da dose nitrogenada aplicada ou do uso dos inoculantes. Por sua vez, a produtividade de grãos máxima estimada, foi obtida na dose de 113 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, resultando em 6.007 kg ha⁻¹ de grãos.

Em termos de redistribuição interna, observou-se que aproximadamente 79% do N total acumulado nos grãos foi alocado nos restos culturais. A eficiência de uso do N-fertilizante (EUN), foi de 45,34%, com 35,53% do N aplicado sendo direcionado aos grãos e 9,81% à palha, reforçando que os grãos constituem o principal dreno de N, tanto advindo da adubação mineral quanto do solo. O solo foi o principal responsável por fornecer nitrogênio, contribuindo em média com 77,1% do N total acumulado pelas plantas, enquanto o fertilizante contribuiu com 22,9%.

Quanto às inoculações, *Azospirillum brasilense* aplicado isoladamente ou em coinoculação com *Pseudomonas fluorescens* proporcionaram incremento na produtividade de grãos, quando comparadas ao tratamento sem inoculação e à coinoculação de *A. brasilense* + *B. subtilis*, evidenciando o potencial bioestimulante dessas bactérias na cultura do trigo.

Embora a quantidade absoluta de nitrogênio derivado do fertilizante (QNPPF) tenha aumentado com o incremento das doses aplicadas, a EUN apresentou tendência decrescente, indicando limitação fisiológica para o aproveitamento do N em com alta adubação nitrogenada. Tais resultados reforça a importância da integração entre práticas de manejo racional da adubação nitrogenada e o uso de bioinsumos eficientes, como as BPCPs, visando eficiência no uso dos recursos e estratégias na cultura do trigo, que contribuem diretamente para sistemas agrícolas mais resilientes, com ações concretas para a sustentabilidade na agricultura e segurança alimentar, em um cenário de mudanças climáticas, alinhando-se aos compromissos estabelecidos pelo ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, M.; SHAH, Z.; ARIF, M.; KHAN, M. J.; MIAN, I. A.; SHARIF, M.; ALAM, M.; BASIR, A.; ULLAH, H.; INAYAT-UR-RAHMAN; SALEEM, N. Impact of *rhizobial inoculum* and inorganic fertilizers on nutrients (NPK) availability and uptake in wheat crop. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 96, n. 2, p. 169-176, 1 jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0012>.
- AHMADI, Z., MEHRABADI, M., FAZLI, M.; KHALESRO, S.; ABEDI, R.; MOKHTASSI-BIDGOLI, A. Aumento da tolerância de cultivares de trigo ao estresse por metribuzina por meio da biorremediação com *Pseudomonas spp.* **BMC Plant Biol.**, London, v. 25, n. 85, p. 1-16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06886-z>.
- AI, W.; QIU, Y.; HUA, J.; CHEN, Z.; CHENG, W.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; XUE, Y.; LI, S.; HONG, R.; DONG, R.; CAO, Y. *Pseudomonas fluorescens* P34 colonization impacts expression changes in wheat roots, reshapes rhizosphere microbial communities and promotes wheat plant growth. **Microbiological Research**, Muenchen, v. 301, p. 128306, 2025.
- ALVES, B.J.R. et al. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 3, pág. 449–456, março. 2006.
- ALVES, B.J.R.; MARTINS, M.R.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S. Importância da fixação biológica de Nitrogênio para a sustentabilidade agrícola no Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no cerrado**. Goiânia: [s. n.], 2016. p. 253-290.
- ALVES, P.S. R. de; FRANCISCO, A. L. O. de; CARVALHO, T. C. de. *Azospirillum brasilense* e nitrogênio: atuação no potencial fisiológico de sementes de trigo. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava, v. 10, n. 2, p. 43-51, out. 2017. ISSN 1984-7548. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/4791>.
- ANDRAUS, M. DE P.; CARDOSO, A. A.; FERREIRA, E. P. DE B.; OLIVEIRA, G. H. C.; ESTEVES, R. L. Fixação biológica de nitrogênio de diferentes cultivares de feijoeiro-comum inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*. SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, COLETÂNEA DOS RESUMOS APRESENTADOS: EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO, Santo Antônio de Goiás, Brazil, 10 July 2013.
- ANSABAYEVA, A.; MAKHAMBETOV, M.; REBOUH, NY; ABDELKADER, M.; SAUDY, HS; HASSAN, KM; NASSER, MA; ALI, MAA; EBRAHIM, M. Plant growth-promoting microbes for resilient farming systems: mitigating environmental stressors and boosting crops productivity: a review. **Horticulturae**, Basel, v. 11, N. 260, P. 1-30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030260>.
- ARAÚJO, A. S. F.; TEIXEIRA, G. M.; CAMPOS, A. X.; SILVA, F. C.; AMBROSANO, E. J. TRIVELIN. P. C. O. Utilização de nitrogênio pelo trigo cultivado em solo fertilizado com adubo verde (*Crotalaria juncea*) e/ou uréia. **Ciência Rural**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 284-289, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000200006>

BACKER, R.; ROKEM, J.S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D.L. Rizobactérias promotoras do crescimento de plantas: contexto, mecanismos de ação e roteiro para a comercialização de bioestimulantes para agricultura sustentável. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 9, p. 1473, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>.

BALOTF, S.; KAVOOSI, G.; KHOLDEBARIN, B. Nitrate reductase, nitrite reductase, glutamine synthetase, and glutamate synthase expression and activity in response to different nitrogen sources in nitrogen-starved wheat seedlings. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, Hoboken, v. 63, n. 2, p. 220-229, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/bab.1362>.

BARBOTTIN, A.; LECOMTE, C.; BOUCHARD, C.; JEUFFROY, M.J. Remobilização de nitrogênio durante o enchimento de grãos em trigo: efeitos genotípicos e ambientais. **Crop Science**, Edinburgh, v. 45, n. 3, p. 1141-1150, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0361>

BARTH, G.; SUYAMA, J.T. Resposta da cultura do trigo à adubação nitrogenada cultivado após milho ou soja em diferentes densidades de semeadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013. **Anais [...]** Florianópolis, 2013.

BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (ed.). **Mass Spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996, p. 1-46.

BASTOS, D. **Infográfico da revista Mundo estranho**. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://super.abril.com.br/tudo-sobre/infografico/>.

BAUER, B. & VON WIRÉN, N. Modulating tiller formation in cereal crops by the signalling function of fertilizer nitrogen forms. **Scientific Reports**, London v.10, n. 20504, 2020.

BÉLANGER, G.; CLAESSENS, A.; ZIADI, N. Relationship between P and N concentrations in maize and wheat leaves. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 28-37, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.007>.

BENEDUZI, A.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, LMP. Rizobactérias promotoras do crescimento de plantas (RPPC): seu potencial como antagonistas e agentes de biocontrole. **Genética e Biologia Molecular**, Coimbra, v. 35, n. 4, p. 1044–1051, 2012.

CAMPOS, L. J. M. **Coinoculação de soja**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2014. p. 2 (Embrapa Pesca e Aquicultura. Fronteira agrícola).

CANTARELLA, H.; MATTOS JUNIOR, D. CEREAIS. In: CANTARELLA, H.; ZAMBROSI, F. C. B.; QUAGGIO, J. A.; DUARTE, A. P. (ed). **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**; Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), 2022. p. 213-236.

CHEN, Z.; WANG, H.; LIU, X.; LU, D.; ZHOU, J. Destinos de fertilizantes marcados com ^{15}N em um sistema trigo-solo, influenciados pela prática de fertilização em solo argiloso. **Sci Rep.**, v. 6, p. 34754, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep34754>

COHEN, A.C.; BOTTINI, R.; PONTIN, M.; BERLI, F.J.; MORENO, D.; BOCCANLANDRO, H.; TRAVAGLIA, C.N.; PICCOLI, P.N. *Azospirillum brasilense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 153, n. 1, p. 79-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.12221>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Análise mensal trigo**, junho 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-trigo>. Acesso em: 18 jul. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acomp. safra brasileira de grãos**. Brasília, DF, v.12 – Safra 2024/25, n.9 - Nono levantamento, p. 1-134, junho 2025.

COSKUN, D.; BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J. The nitrogen-potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 40, n. 10, p. 2029-2041, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12671>

DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Methods of soil analysis, 2nd ed.; Black, C.A, Ed.; Agronomy, 9, **American Society of Agronomy**, Madison, v. 1, p.545-566, 1965.

EL SABAGH, A.; ISLAM, M. S.; HOSSAIN, A.; IQBAL, M. A.; MUBEEN, M.; WALEED, M.; REGINATO, M.; BATTAGLIA, M.; AHMED, S.; REHMAN, A.; ARIF, M.; ATHAR, H.-UR-R.; RATNASEKERA, D.; DANISH, S.; RAZA, M. A.; RAJENDRAN, K.; MUSHTAQ, M.; SKALICKY, M.; BRESTIC, M.; SOUFAN, W.; FAHAD, S.; PANDEY, S.; KAMRAN, M.; DATTA, R.; ABDELHAMID, M. T. Phytohormones as Growth Regulators During Abiotic Stress Tolerance in Plants. **Frontiers in Agronomy**, Lausanne, v. 4, 2022. DOI=10.3389/fagro.2022.765068 ISSN=2673-3218

EL-SANATAWY, A. M.; ASH-SHORMILLESY, S. M. A. I.; EL-YAZIED, A. A.; EL-GAWAD, H. G. A.; AZAB, E.; GOBOURI, A. A.; SITOHY, M.; OSMAN, A. Enhancing grain yield and nitrogen accumulation in wheat plants grown under a Mediterranean arid environment by foliar spray with papain-released whey peptides. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 10, p. 1913, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11101913>.

EMBRAPA. **Trigo irrigado no Cerrado bate recorde mundial consecutivo de produtividade com cultivar da Embrapa**. Cultivar de trigo irrigado BRS 264, desenvolvido pela Embrapa, ocupa 70% da área cultivada com trigo na região. 2021. Revista Cultivar. Disponível em: <https://revistacultivar.com/news/Irrigated-wheat-in-the-cerrado-breaks-successive-world-productivity-record-with-Embrapa-cultivar>.

EMBRAPA CERRADOS. **Cultivares e recomendações de manejo do trigo no Cerrado são apresentados em Dia de Campo**. Embrapa Cerrados: Notícias, 02 set. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/92095820/cultivares-e-recomendacoes-de-manejo-do-trigo-no-cerrado-sao-apresentados-em-dia-de-campo>.

EMBRAPA TRIGO. **Sistema de produção de trigo**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/trigo>

ESPINAL, F. S.C.; SILVA, E. C. da; MURAOKA, T.; FRANZINI, V. I.; TRIVELIN, P. C. O.; TEIXEIRA, M. B.; SAKADEVAN, K. Utilization of nitrogen (^{15}N) from urea and green manures by rice as affected by nitrogen fertilizer rate. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 11, n. 13, p. 1171-1180, Mar. 2016. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1045905>.

FANAI, A.; BOHIA, B.; LALREMURATI, F.; LALHRIATPUII, N.; LALROKIMI ; LALMUANPUII, R.; SINGH, P.K.; ZOTHANPUIA. Plant growth promoting bacteria (PGPB)-induced plant adaptations to stresses: an updated review. **PeerJ**. 2024 Aug 20;12:e17882. doi: 10.7717/peerj.17882. PMID: 39184384; PMCID: PMC11344539.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA – FAOSTAT. **Situação Alimentar Mundial**. 2024. Available online: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en>.

FRANÇA, J. L. et al. **Manual para normalização**. 4. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1999.

FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; ESTAVILLO, J. M., DUÑABEITIA, M. K., HUÉRFANO, X.; CASTELLÓN, A.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; AIZPURUA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M. B. ^{15}N Natural Abundance Evidences a Better Use of N Sources by Late Nitrogen Application in Bread Wheat. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 9, p. 1-11, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.00853 ISSN=1664-462X

GALINDO, F. S.; PAGLIARI, P. H.; FERNANDES, G. C.; RODRIGUES, W. L.; BOLETA, E. H. M.; JALAL, A.; CÉU, E. G. O.; LIMA, B. H. D.; LAVRES, J.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under tropical conditions: a potential tool for improving nitrogen management. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 10, n. 821628, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.821628. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.821628/full>.

GALINDO, F.S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; SANTINI, J.M.K.; ALVES, C. J.; LUDKIEWICZ, M.G.Z. Wheat yield in the Cerrado as affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 52, n. 9, p. 794-805, 2017.

GALINDO, F.S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; SANTINI, J.M.K.; ALVES, C.J.; NOGUEIRA, L. M.; LUDKIEWICZ, M.G.Z.; ANDREOTTI, M.; BELLOTTE, J.L.M. Maize yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 40, n. e015036, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbcs20150364

GANESHAN, G.; MANOJ KUMAR, A. *Pseudomonas fluorescens*, um potencial antagonista bacteriano para o controle de doenças de plantas. **Journal of Plant Interactions**, Abingdon, v.3, p. 123–134, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/17429140600907043>.

GASPAR, M. **Isótopo estável de nitrogênio ajuda cientistas a otimizar o uso de água e fertilizantes**. IAE – Internacional Atomic Energy Agency, 2017. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/stable-nitrogen-isotope-helps-scientists-optimize-water-fertilizer-use>.

GASPARETO, R. N. **Inoculação com bactérias promotoras de crescimento associado a doses de nitrogênio na nutrição e desempenho agrônômico de trigo no Cerrado**. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2022.

GASPARETO, R.N.; JALAL, A.; ITO, W.C.N.; OLIVEIRA, C.E.D.S.; GARCIA, C.M.D.P.; BOLETA, E.H.M.; ROSA, P.A.L.; GALINDO, F.S.; BUZETTI, S.; GHALEY, B.B.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M. Inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal e doses de nitrogênio melhora a produtividade do trigo e a eficiência no uso do nitrogênio. **Microorganisms**, Basel, v.11, n.4, p.1046, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041046>

GODFREY, D.; HAWKESFORD, M. J.; POWERS, S. J.; MILLAR, S. E.; SHEWRY, P. R. Efeitos da nutrição das culturas na composição do grão de trigo e na qualidade do uso final. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, p. 3012-3021, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf9040645>

GU, B.; JU, X.; CHANG, J.; GE, Y.; VITOUSEK, P.M. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 112, p. 8792–8797, 2015.

GUO, J.; JIANG, P.; ZHANG, J.; DONG, S.; TIAN, W.; LI, J.; LI, F.; NÍVEL, J.; YAO, Y.Q.; HOU, Y.; WU, S.; SHAABAN, M.; HUANG, M.; LI, Y. Straw return substituting potassium fertilizer increases crop yield, efficiency and quality in maize–wheat rotation system. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 6, art. 1266, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14061266.

HU, X.; TIAN, P.; FU, W.; TIAN, Z.; DU, M.; CHANG, Z.; YE, Y.; MENG, X.; WANG, Y. Efeitos da aplicação de fertilizantes nitrogenados nas características de resistência ao acamamento, produtividade e qualidade de dois tipos de trigo com glúten. **Agriculture**, Basel, v. 15, p. 637, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15060637>.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; SOUZA, E.M.; PEDROSA, F.O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 331, p. 413-425, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Inoculation of *Brachiaria spp.* with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 221, p. 125-131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.024>.

HUSSAIN, G.; AL-JALOUD, A. A.; KARIMULLA, S. Effect of treated effluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 30, p. 175-184, 1996.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA/FAO. **Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition**. Vienna: IAEA, 2001. 247p. (Training course series, 14).

INÁCIO, C. de T.; URQUIAGA, S. **Aplicações da análise de isótopos estáveis na agricultura**. In: EMBRAPA SOLOS. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. p. 1-54. (Documentos, 198).

JIA, W.; MA, Q.; LI, LI; DAI, C.; ZHU, M.; LI, C.; DING, J.; GUO, W.; ZHU, X. The fate of nitrogen from different sources in a rice-wheat rotation system – A ^{15}N labeling study. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, p. 1-15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1271325>

JONES, D. L.; CROSS, P.; WITHERS, P. J. A.; DELUCA, T. H.; ROBINSON, D. A.; QUILLIAM, R. S.; HARRIS, I. M.; CHADWICK, D. R.; EDWARDS-JONES, G. REVIEW: nutrient stripping. **Journal of Applied Ecology**, Chichester, v. 50, n. 4, p. 851-862, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2664.12089>.

KEJELA, T. Rizobactérias produtoras de fitohormônios e seu papel no crescimento das plantas. In: ALI, BASHARAT; IQBAL, JAVED (ed.). **Novos insights sobre fitormônios**. Reino Unido: Intechopen Limited, 2024. Cap. 3. p. 126.

Kloepper, J. W.; Ryu, C. M.; Zhang, S. Induced Systemic Resistance and Promotion of Plant Growth by *Bacillus spp.* **Phytopathology**, St. Paul, v. 94, n. 11, p. 1259-1266, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259>.

LI, C. J.; HOFFLAND, E.; KUYPER, T.; YU, Y.; ZHANG, C. C.; WERF, W. Syndromes of production in intercropping impact yield gains. **Nature Plants**, London, v. 6, p. 653–660, 2020.

LIU, J.; FENG, H.; HE, J.; CHEN, H.; DING, D. The effects of nitrogen and water stress on the nitrogen-to-protein conversion factor of winter wheat. **Agricultural Water Management** Amsterdam, v. 210, p. 217-223, 2018.

LOLLATO, R.P.; FIGUEIREDO, B. M.; DHILLON, J. S.; ARNALL, D. B.; RAUN, W.R. Wheat grain yield and grain-nitrogen relationships as affected by N, P, and K fertilization: a synthesis of long-term experiments. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 236, p. 42-57, abr. 2019. Elsevier BV.

LÓPEZ-BUCIO, J.; CRUZ-RAMÍREZ, A.; HERRERA-ESTRELLA, L. The role of nutrient availability in regulating root architecture. **Current Opinion in Plant Biology**, Kidlington, v. 6, n. 3, p. 280-287, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(03\)00035-9](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(03)00035-9).

MA, G.; LIU, W.; LI, S.; ZHANG, P.; WANG, C.; LU, H.; WANG, L.; XIE, Y.; MA, D.; KANG, G. Determinando a adição ótima de N para melhorar o rendimento e a qualidade dos grãos em trigo de inverno com redução da perda aparente de n na planície do Norte da China. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, p. 181, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00181>.

MA, Q.; DAI, D.; CAO, Y.; YU, Q.; CHENG, X.; ZHU, M.; DING, J.; LI, C.; GUO, W.; ZHOU, G.; ZHU, X. Optimal N management affects the fate of urea-¹⁵N and improves N uptake and utilization of wheat in different rotation systems. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v.15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438215> ISSN=1664-462X.

MADAR, R.; SINGH, Y. V.; MEENA, M. C.; DAS, T. K.; PARAMESH, V.; AL-MANA, F. A.; MATTAR, M. A.; ELANSARY, H. O. Residue and potassium management strategies to improve crop productivity, potassium mobilization, and assimilation under zero-till maize–wheat cropping system. **Agriculture**, Basel, v. 10, n. 9, p. 401, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10090401>.

MAIGNAN, V.; GÉLIOT, P.; AVICE, J.C. Bioestimulante Glutacetina® aplicado em trigo sob condições contrastantes de campo melhora o número de grãos, resultando em maior produtividade, aprimora características relacionadas ao nitrogênio e altera o iodo dos grãos. **Plantas**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 456, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10030456>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2nd ed.; Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MARTINS, M. R.; JANTALIA, C. P.; REIS, V. M.; DÖWICH, I.; POLIDORO, J. C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Impact of plant growth-promoting bacteria on grain yield, protein content, and urea-¹⁵N recovery by maize in Cerrado Oxisol. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 422, p. 239-250, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3193-1>.

MATTOS, M. L. T.; VALGAS, R. A.; MARTINS, J. F. S. Coinoculação com bactérias promotoras de crescimento aumenta a eficiência do uso de nitrogênio pelo arroz irrigado. **ACS Omega**, Washington, v. 8, p. 48719-48727, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05339>.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Plano Nacional de Fertilizantes**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/>

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3th. ed. New York: Academic, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00028-5>.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; TRINDADE, M. G.; CANOVAS, A. D. **A cultura do trigo irrigado no sistema plantio direto**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 2006. 16 p. (Circular Técnica, 78).

NAWAZ, A.; BASHIR, M. A.; AHMED, W.; AHMAD, I.; REHIM, A.; IKRAM, R. M.; SHAH, S. S. H.; KHURSHID, M. Y.; RUSAN, M. J.; LUBANI, R.; SALEEM, S.; HAQ, T. U.; ALI, M. ASIF. Potassium and zinc improves physiological performance, nutrient use efficiency, and productivity of wheat. **Frontiers in Plant Science**. Lausanne, v. 15, p. 1-10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1363248> ISSN=1664-462X

NÓIA JÚNIOR, R. S.; NARDINO, M.; ELLI, E. F.; PEQUENO, D.; FRAISSE, C.; ASSENG, S. Achieving wheat self-sufficiency in Brazil. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 19, n. 3, p. 031003, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ad26b8>.

NOOR, H.; YAN, Z.; SUN, P.; ZHANG, L.; DING, P.; LI, L.; REN, A.; SUN, M.; GAO, Z. Effects of Nitrogen on Photosynthetic Productivity and Yield Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 6, p. 1448, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061448>.

PASINATO, A.; CUNHA, G.R; DA; FONTANA, D.C.; MONTEIRO, J.E.B.; DE, A. NAKAI; A.M.; OLIVEIRA, A.F. DE. Potential area and limita-tions for the expansion of rainfed wheat in the Cerrado biome of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 53, n. 7, p. 779-790, 2018.

QUILLE, P., KACPRZYK, J., O'CONNELL, S. Redução de fertilizantes: bioestimulantes vegetais como uma estratégia emergente para melhorar a eficiência do uso de nutrientes. **Discover Sustainability**, Cham, v. 6, n. 128, p. 1-27, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00910-w>.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para Avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285 p.

RAZA, M. A. S.; SALEEM, A.; KHAN, I. H.; TAHIR, M. A.; IQBAL, R.; ASLAM, M. U.; HARSONOWATI, W.; DAWOUD, T. M.; ALARJANI, K. M.; DITTA, A. Enhancing wheat growth: impact of PGPR co-inoculation with *Azospirillum lipoferum* and *Agrobacterium fabrum*. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olsztyn, v. 34, n. 4, p. 1–11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/190584>.

REKOWSKI, A.; WIMMER, M. A.; HENKELMANN, G.; ZÖRB, C. Is a change of protein composition after late application of nitrogen sufficient to improve the baking quality of winter wheat? **Agriculture**, Basel, v. 9, n. 5, art. 101, p. 1–17, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9050101>.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; GOUVEIA, J. A.; SOARES, R. C. Nitrogen translocation in wheat inoculated with *Azospirillum* and fertilized with nitrogen. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1473–1481, jul. 2000.

RODRIGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, New York, v. 17, p. 319-339, 1999.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. *In*: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (org.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Lavras: Universidade Federal de Lavras. 1999. p. 291-309.

SAEED, Q.; XIUKANG, W.; HAIDER, FU; KUČERIK, J.; MUMTAZ, MZ; HOLATKO, J.; NASEEM, M.; KINTL, A.; EJAZ, M.; NAVEED, M.; ET AL. Bactérias da Rizosfera na Promoção do Crescimento Vegetal, Biocontrole e Biorremediação de Locais Contaminados: Uma Revisão Abrangente dos Efeitos e Mecanismos. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 22, p. 10529, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>

SALVO, L.P.; FERRANDO, L.; FERNANDÉZ-SCAVINO, A.; SALAMONE, I.E.G. Microorganisms reveal what plants do not: wheat growth and rhizosphere microbial communities after *Azospirillum brasilense* inoculation and nitrogen fertilization under field conditions. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 424, p. 405-417, 2018.

SANDINI, I.E.; PACENTCHUK, F.; FRANCO, D.A. De S.; SANDINI, A.H. Bacterial consortium of *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens* on the stimulation of growth of corn culture. **Ciencia Rural**, Santa Maria, 2024. v.54:09, e.20230123. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230123>

SANTOS, H.G. DOS; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS; OLIVEIRA, V.A. DE; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. DE; ARAUJO FILHO, J.C. DE; OLIVEIRA, J.B. DE; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5rd ed; Brasília, Embrapa, 2018.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia**, Biblioteca, 2021. 41 p. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/biblioteca/>. Acesso em: 08 jun. 2025.

SAS Institute. **Procedure guide for personal computers**. Version 9.4. Cary, 2015.

SAUBIDET, M.I.; FATTA, N.; BARNEIX, A.J. The effect of inoculation with *Azospirillum brasilense* on growth and nitrogen utilization by wheat plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 245, n. 2, p. 215–222, ago. 2002. DOI: 10.1023/A:1020469603941. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020469603941>.

SCAVINO, A. F.; PEDRAZA, R. O. O papel dos sideróforos em bactérias promotoras do crescimento de plantas. *In*: MAHESHWARI, D., SARAF, M., AERON, A. (org.). **Bactérias em agrobiologia: produtividade das culturas**. Berlim: Springer, 2013. Cap. 11. p. 265-285. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37241-4_11.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. Washington: Natural Resources Conservation Service and Agriculture Department, 2014.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; BENETT, C.G.S. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, p. 797-804, 2010.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; ALVAREZ, R. DE C. F; MAEDA, A.S.; SÁ, M.E.DE. Resposta de cultivares de trigo ao nitrogênio com e sem tratamento fúngico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 626-63, 2012.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; BENETT, C.G.S.; ARF, O. SÁ. ME. Wheat nitrogen fertilization under no till on the low altitude Brazilian Cerrado. **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, p. 1732-48, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.889150>.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; SANTINI, J. M. K. Inoculação com *Azospirillum brasilense* melhora a nutrição e aumenta a produtividade do trigo em associação com adubação nitrogenada. In: WANYERA, Ruth; OWUOCHE, James (ed.). Melhoramento, Gestão e Utilização do Trigo. Reino Unido: **Intechopen Limited**, 2017. Cap. 6. p. 99-114. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/54297#>.

TORTORA, M.; DIAZ-RICCI, J.C.; PEDRAZA, R. *Azospirillum brasilense* siderophores with antifungal activity against *Colletotrichum acutatum*. **Archives Microbiology**, v. 193, p. 275-286, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-010-0672-7>.

TRIPATHI, Y. N.; DIVYANSHU, K.; KUMAR, S.; ZEHRA, A.; SWAPNIL, P.; UPADHYAY, R.; MARWAL, A. PGPR-mediated induction of systemic resistance and physiochemical alterations in plants against the pathogens: current perspectives. **Journal of Basic Microbiology**, v. 60, n. 10, p. 828-861 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/jobm.202000370>.

TRIVEDI, V.K.; RAZA, M.B.; DIMREE, S.; VERMA, A.K.; PAWAR, A.B.; UPADHYAY, D.P. Efeito do uso equilibrado de nutrientes nos atributos de rendimento, produtividade e teor de proteína do trigo (*Triticum aestivum*). **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 90, n. 12, p. 2369-2372, 2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS. Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos – DEFERS. Área de Hidráulica e Irrigação – AHI. **Acesso à base diária**: Ilha Solteira, 2023. Available online: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/fitossanidade-engenharia-rural-e-solos/irrigacao/servicos/clima-ilha-solteira/>. (accessed on 07 sept. 2024).

VEJAN, P.; ABDULLAH, R.; KHADIRAN, T.; ISMAIL, S.; NASRULHAQ BOYCE, A. O Papel das Rizobactérias promotoras do crescimento de plantas na sustentabilidade agrícola: uma revisão. **Molecules**, Basel, v. 21, N. 5, p. 573, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>

VIANA, E. M.; KIEHL, J. DE C. Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 975–982, dez. 2010.

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. A Utilização e o Papel do Nitrogênio nas Plantas. **Florestas**, Colombo, v. 15, n. 7, p. 1191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15071191>

WATANABE, E. **Influência das proteínas formadoras do glúten na qualidade tecnológica da farinha de trigo para panificação**. 2014. 82 f. Trabalho de Conclusão de

Curto – (Bacharelado em Tecnologia em Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina - PR, 2014. Disponível em:
https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12470/3/LD_COALM_2014_2_06.pdf.

WUTKE, B.E.; CHIORATO, F.A.; ESTEVES, F.A.J.; CARBONELL, M.A.S.; AMBROSANO, J.E.; LEMOS, B.L.; SORATTO, P.R.; ARF, O.; CANTARELLA, H. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo, Boletim técnico, 100**. Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) Campinas: Campinas, Brazil, 2022. p. 86–94.

YOKAMO, S.; IRFAN, M.; HUAN, W.; WANG, B.; WANG, Y.; ISHFAQ, M.; LU, D.; CHEN, X.; CAI, Q.; WANG, H. Avaliação global dos principais fatores que influenciam a eficiência da fertilização com nitrogênio no trigo: uma meta-análise recente (2000-2022). **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, p. 1272098, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1272098

ZADOKS, J. C., CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Oxford, v. 14, 1974.

ZHAI, H.; FENG, Z.; LI, J.; LIU, X.; XIAO, S.; NI, Z.; SUN, Q. Analysis of Spike Morphological Traits and Plant Height in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Using a High-Density SNP and SSR-Based Linkage Map. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, 2016. DOI=10.3389/fpls.2016.01617

ZHANG, H.; ZHAI, H.; ZAN, R.; TIAN, Y.; MA, X.; JI, H.; ZHANG, D. A fertilização balanceada melhora a produção agrícola e o sequestro de carbono orgânico do solo em um sistema de plantio de trigo e milho na Planície do Norte da China. **Plants**, [s. l.], v. 14, p. 838, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14060838>

ZHAO, H.; SUN, N.; HUANG, L.; QIAN, R.; LIN, X.; SUN, C.; ZHU, Y. *Azospirillum brasilense* activates peroxidase-mediated cell wall modification to inhibit root cell elongation. **iScience**, Cambridge, v. 26. n. 7, p. 107144, 2023. DOI: 10.1016/j.isci.2023.107144.

ZHOU, B.; SERRET, M. D.; PIE, J. B.; SHAH, S. S.; LI, Z. Relative Contribution of Nitrogen Absorption, Remobilization, and Partitioning to the Ear During Grain Filling in Chinese Winter Wheat. **Frontiers in Plant Science**. Lausanne, v. 9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01351> ISSN=1664-462X.