

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE AGRONOMIA

MURILO FREITAS

INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasiliense* E PERFORMANCE DE PLANTAS DE
TRIGO CRESCIDAS SEM E COM RESTRIÇÃO DE ÁGUA

PONTA GROSSA
2025

MURILO FREITAS

INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense* E PERFORMANCE DE PLANTAS DE
TRIGO CRESCIDAS SEM E COM RESTRIÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para
obtenção de título de Engenheiro Agrônomo na
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA
2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COLEGIADO DO CURSO DE AGRONOMIA
COORDENAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTCC - Ano 2025

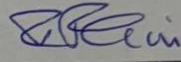
AVALIAÇÃO DE TCC RELATÓRIO DA BANCA EXAMINADORA

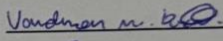
Título da Monografia: INOCULAÇÃO DE *Ascopiriillum brassicae* E
PERFORMANCE DAS PLANTAS DE TRIGO CRESCIDAS SEM E COM
RESTRIÇÃO DE ÁGUA

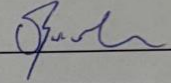
Autor (a): MURILO FREITAS

Data da defesa: 23/05/2025 Horário: 17:30h Local: FAA F-41

Avaliadores:

1-Orientador (a): EDUARDO FÁVERO CAIRES Assinatura: 

2-Avaliador (a): VANDERSON MODOLOM DYART Assinatura: 

3-Avaliador (a): FABRÍCIO TONDELLO BARBOSA Assinatura: 

Itens a serem avaliados	Notas atribuídas		
	Orientador(a)	1º Avaliador(a)	2º Avaliador(a)
I- Apresentação oral (Até 2,0)	1,7	2,0	2,0
II- Trabalho escrito (Até 6,0)	5,6	5,0	5,2
III- Arguição (Até 2,0)	1,8	1,8	1,8
TOTAL	9,1	8,8	9,0
MÉDIA FINAL *	9,0 + 0,9 = 9,9		

* Orientador(a) nota final com uma casa após a vírgula

Atenção Professor(a) ORIENTADOR(A):

No caso de apresentação de trabalho, em **evento técnico-científico**, no qual o **acadêmico conste como autor**, poderá ser acrescentado **ATÉ 10%** da nota, na somatória final. Apresentar **comprovante** junto com os documentos entregues para a Coordenação de TCC.

FORMULÁRIO 4
OTCC
AGRONOMIA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me incentivou a trilhar meu caminho com honestidade, força e dedicação, e que foi minha inspiração durante toda a minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e ter há quem compartilhá-la.

À minha família, por todo o apoio e incentivo.

Aos professores que me proveram um ambiente onde fosse possível meu desenvolvimento, em especial ao professor Drº Eduardo Fávero Caires que participou da minha formação acadêmica desde o início.

À equipe do Laboratório de Fertilidade do Solo pelos ensinamentos e auxílios prestados e meus amigos que trabalharam ombro a ombro comigo.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa pela possibilidade de cursar Agronomia.

À Fundação Araucária pela administração do projeto.

E a todos que de alguma maneira incentivaram a minha trajetória até aqui.

RESUMO

FREITAS, M. **Inoculação de *Azospirillum brasilense* e performance de plantas de trigo crescidas sem e com restrição de água.** Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2025.

Bactérias do gênero *Azospirillum* podem contribuir no desenvolvimento das plantas, seja fornecendo nitrogênio (N) ou produzindo fito-hormônios que atenuem possíveis problemas fisiológicos que ocorrem durante o déficit hídrico. Este estudo avaliou os efeitos da inoculação de sementes de trigo com *A. brasilense*, associada ou não à adubação nitrogenada em cobertura, sob condições de disponibilidade hídrica plena e déficit hídrico. O experimento foi realizado em estufa climatizada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, na região Centro-Sul do Paraná, utilizando colunas de solo (50 cm de altura × 15 cm de diâmetro). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso no esquema fatorial 3 × 2, com três repetições. Os tratamentos foram: sem inoculação, com inoculação de *A. brasilense* e com inoculação de *A. brasilense* + N em cobertura; e sem e com restrição de água (80% e 40% da capacidade de campo, respectivamente). As sementes de trigo, cultivar TBio Tibagi, foram inoculadas pouco antes da semeadura com inoculante líquido contendo as estirpes AbV5-AbV6, na dose de 2,5 mL kg⁻¹. As variáveis avaliadas aos 50 dias após emergência foram o índice SPAD de clorofila, massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR) em diferentes profundidades (0–10, 10–20 e 20–50 cm) e a extração de nutrientes pelas plantas. Os resultados indicaram que a inoculação com *A. brasilense* associada ao N promoveu aumento significativo na MSPA em relação aos demais tratamentos, especialmente sob déficit hídrico, demonstrando potencial mitigador do estresse. Em relação à distribuição radicular, o déficit hídrico aumentou a MSR na camada intermediária (10–20 cm), mas reduziu o crescimento radicular em camadas mais profundas (20–50 cm), indicando que o estresse combinado com a acidez subsuperficial limitou o aprofundamento radicular. A inoculação apresentou interação com o déficit hídrico, alterando os padrões de crescimento radicular principalmente na camada superficial (0–10 cm). Os índices de clorofila não foram influenciados significativamente pelos tratamentos, sugerindo estabilidade da fotossíntese sob as condições estudadas. A extração de nutrientes pelas plantas foi significativamente maior no tratamento que combinou inoculação e N, destacando a importância da complementação nitrogenada para maximizar os benefícios da inoculação. Concluiu-se que a inoculação de trigo com *A. brasilense* associada à adubação nitrogenada é uma estratégia promissora para melhorar a performance das plantas e a absorção de nutrientes pelo trigo, particularmente em ambientes sujeitos à restrição de água.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*, déficit hídrico, nitrogênio, inoculante.

ABSTRACT

FREITAS, M. **Inoculation of *Azospirillum brasilense* and performance of wheat plants grown with and without water restriction.** Advisor: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2025. Undergraduate Thesis – University State of Ponta Grossa, 2025.

Bacteria of the genus *Azospirillum* can contribute to plant development by providing nitrogen (N) or producing phytohormones that mitigate potential physiological problems that occur during water deficit. This study evaluated the effects of inoculating wheat seeds with *A. brasilense*, associated or not with N fertilization in topdressing, under conditions of full water availability and water deficit. The experiment was carried out in a climate-controlled greenhouse at the State University of Ponta Grossa, in the South-Central region of Parana, Brazil, using soil columns (50 cm high × 15 cm in diameter). The experimental design was randomized blocks in a 3 × 2 factorial scheme, with three replicates. The treatments were: without inoculation, with inoculation of *A. brasilense* and with inoculation of *A. brasilense* + N in topdressing; and without and with water restriction (80% and 40% of field capacity, respectively). Wheat seeds, cultivar TBio Tibagi, were inoculated shortly before sowing with liquid inoculant containing strains AbV5-AbV6, at a dose of 2.5 mL kg⁻¹. The variables evaluated at 50 days after emergence were the SPAD chlorophyll index, shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM) at different depths (0–10, 10–20 and 20–50 cm) and nutrient uptake by plants. The results indicated that inoculation with *A. brasilense* associated with N promoted a significant increase in SDM in relation to the other treatments, especially under water deficit, demonstrating a potential to mitigate stress. Regarding root distribution, water deficit increased RDM in the intermediate layer (10–20 cm), but reduced root growth in deeper layers (20–50 cm), indicating that stress combined with subsurface acidity limited root penetration. Inoculation interacted with water deficit, altering root growth patterns mainly in the surface layer (0–10 cm). Chlorophyll levels were not significantly influenced by treatments, suggesting stability of photosynthesis under the conditions studied. Nutrient uptake by plants was significantly higher in the treatment that combined inoculation and N, highlighting the importance of N supplementation to maximize the benefits of inoculation. It was concluded that inoculation of wheat with *A. brasilense* associated with N fertilization is a promising strategy to improve plant performance and nutrient uptake by wheat, particularly in environments subject to water restriction.

Keywords: *Triticum aestivum*, water deficit, nitrogen, inoculant.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO TRIGO	9
2.2	IMPORTÂNCIA DA INOCULAÇÃO	10
2.3	INTERAÇÃO ENTRE <i>Azospirillum brasilense</i> E ADUBAÇÃO NITROGENADA	10
2.4	RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DO TRIGO AO ESTRESSE HÍDRICO	11
2.5	DISTRIBUIÇÃO RADICULAR DO TRIGO EM SOLOS ÁCIDOS	12
2.6	CALAGEM COMO ESTRATÉGIA DE CORREÇÃO DA ACIDEZ	13
2.7	GESSAGEM E MELHORIA DO SUBSOLO	13
3	OBJETIVOS	15
3.1	OBJETIVO GERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4	HIPÓTESES	16
5	MATERIAL E MÉTODOS	17
5.1	LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	17
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	17
5.3	AVALIAÇÕES	18
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	19
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6.1	TEORES DE CLOROFILA <i>a</i> , <i>b</i> e total	20
6.2	MASSA SECA DA PARTE AÉREA E MASSA SECA DE RAÍZES	21
6.2.1	Massa Seca da Parte Aérea (MSPA)	21
6.2.2	Massa Seca de Raiz (MSR) na Camada de 0-10 cm	22
6.2.3	Massa Seca de Raiz (MSR) na Camada de 10-20 cm	23
6.2.4	Massa Seca de Raiz (MSR) na Camada de 20-50 cm	24
6.3	EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES	24
7	CONCLUSÕES	27
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum L.*) é um dos cereais mais importantes para a segurança alimentar global, sendo responsável por cerca de 20% das calorias consumidas mundialmente. No Brasil, cerca de 90% da produção nacional está concentrada na região Sul, onde a cultura enfrenta condições edafoclimáticas desafiadoras, especialmente relacionadas à acidez dos solos (Conab, 2023). Entre os principais fatores limitantes está a elevada saturação por alumínio (Al^{3+}), comum em Latossolos Vermelhos distróficos, o que limita significativamente o potencial produtivo das lavouras (CQFS-RS/SC, 2016).

A correção adequada do solo por meio de práticas como a calagem e a gessagem é fundamental para reduzir a toxicidade do Al^{3+} e melhorar as condições químicas do solo, promovendo maior desenvolvimento radicular e produtividade das culturas (Caires *et al.*, 2016). Complementarmente, a utilização de tecnologias biológicas, especialmente a inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal, como o *Azospirillum brasilense*, tem se destacado na agricultura brasileira. A inoculação com *A. brasilense* pode fornecer parte do nitrogênio (N) requerido pelas plantas, promovendo incrementos na absorção desse e de outros nutrientes essenciais, além de melhorar a eficiência do uso da água pelas plantas, especialmente em condições de déficit hídrico (Hungria *et al.*, 2013; Hungria *et al.*, 2016).

A resposta das plantas à inoculação pode ser influenciada por diversos fatores, como condições edafoclimáticas, manejo de nutrientes e a presença de estresses ambientais, destacando-se o déficit hídrico como um dos principais fatores abióticos limitantes ao crescimento do trigo em regiões subtropicais. Assim, estudos que avaliem a interação entre inoculação, adubação nitrogenada e disponibilidade hídrica tornam-se essenciais para otimizar o manejo da cultura, contribuindo para sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO TRIGO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) constitui um dos pilares da segurança alimentar global, respondendo por aproximadamente 20% das calorias consumidas pela população mundial e ocupando a segunda posição entre os cereais mais produzidos, com uma área cultivada superior a 220 milhões de hectares (FAO, 2022). No contexto brasileiro, particularmente na região Sul onde se concentra 90% da produção nacional, a cultura enfrenta desafios edafoclimáticos distintos dos observados em regiões temperadas, tradicionalmente mais adequadas ao seu cultivo (CONAB, 2023).

A importância do trigo vai além da alimentação, estendendo-se à sustentabilidade da agricultura brasileira. Seu cultivo durante a estação de inverno permite a rotação de culturas, contribuindo para a conservação do solo, redução de pragas e doenças, e melhor aproveitamento dos recursos naturais. Além disso, a cadeia produtiva do trigo gera milhares de empregos, desde o cultivo nas propriedades rurais até o processamento industrial e a distribuição dos produtos derivados (Pires, 2017).

Estudos indicam que os solos cultivados com trigo nos estados da região Sul frequentemente apresentam acidez elevada ($\text{pH} < 5,0$) e saturação por Al^{3+} relativamente alta, especialmente nas camadas abaixo de 20 cm de profundidade. Essa condição química adversa é particularmente crítica em Latossolos Vermelhos distróficos, predominantes na região Sul do Brasil, necessitando de práticas adequadas de manejo para a produção agrícola sustentável (CQFS-RS/SC, 2016).

A situação é particularmente crítica nos Latossolos Vermelhos distróficos, os quais ocupam cerca de 42% da área agrícola da região Sul, conforme demonstrado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018). Esses solos, embora profundos e bem estruturados, exigem correção contínua da acidez para alcançar produtividades satisfatórias no cultivo de trigo.

Segundo o Boletim Técnico da EMBRAPA-Trigo (EMBRAPA, 2015), essa condição química adversa reduz em até 35% o potencial produtivo das lavouras, sendo considerada um dos principais fatores limitantes para a expansão da triticultura na região. Do ponto de vista nutricional, o trigo é uma importante fonte de carboidratos, proteínas, fibras alimentares,

vitaminas do complexo B e minerais como ferro, magnésio e zinco. Esses nutrientes são essenciais para a manutenção da saúde humana, contribuindo para funções metabólicas, estruturais e imunológicas. Dessa forma, a cultura do trigo desempenha papel estratégico na segurança alimentar e no desenvolvimento socioeconômico do país.

2.2 IMPORTÂNCIA DA INOCULAÇÃO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo natural no qual microrganismos diazotróficos convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em formas assimiláveis pelas plantas, como o amônio (NH_4^+), através da ação da enzima nitrogenase. Embora esse mecanismo seja amplamente conhecido em leguminosas por meio da simbiose com rizóbios, a FBN em gramíneas como o trigo ocorre predominantemente por meio de associações com bactérias de vida livre ou endofíticas, como as do gênero *Azospirillum* (Hungria; Nogueira; Araújo, 2013).

No caso do trigo, o *Azospirillum brasilense* tem se destacado como uma das principais espécies promotoras de crescimento vegetal, atuando de maneira multifatorial. Além da FBN, essa bactéria influencia o desenvolvimento vegetal por meio da produção de fitormônios como o ácido indolacético (AIA), o qual estimula o crescimento radicular e a absorção de nutrientes (Cassán *et al.*, 2020).

Estudos indicam que a inoculação com *A. brasilense* pode fornecer de 20 a 40 kg ha⁻¹ de N por ciclo da cultura de trigo, contribuindo para a redução parcial do uso de fertilizantes nitrogenados e promovendo ganhos econômicos e ambientais (Hungria *et al.*, 2016). Além disso, a presença da bactéria na rizosfera favorece o aumento do volume radicular, permitindo maior exploração do perfil do solo e consequente absorção de água e nutrientes.

A resposta da cultura do trigo à inoculação, contudo, depende de fatores como cultivar utilizada, condições edafoclimáticas, manejo da adubação e época de semeadura. Assim, o uso de *A. brasilense* como tecnologia complementar tem se mostrado promissor, especialmente quando combinado à adubação nitrogenada em cobertura.

2.3 INTERAÇÃO ENTRE *Azospirillum brasilense* E ADUBAÇÃO NITROGENADA

A interação entre a inoculação com *A. brasilense* e a adubação nitrogenada mineral tem sido objeto de crescente interesse em pesquisas agronômicas, principalmente devido ao potencial sinérgico dessa associação na promoção do crescimento vegetal e no aumento da eficiência de uso do N. Em cereais como o trigo, essa interação pode otimizar a absorção de

nutrientes, melhorar o crescimento radicular e aéreo e reduzir parcialmente a dependência de fertilizantes sintéticos (Hungria *et al.*, 2013; Fukami *et al.*, 2018).

Estudos indicam que a presença de N mineral em doses moderadas (60–90 kg ha⁻¹) pode estimular a atividade rizosférica e a produção de exsudatos pelas raízes, favorecendo a colonização por *A. brasilense*. Essa condição, por sua vez, aumenta a FBN e a produção de fitormônios como o AIA, promovendo maior desenvolvimento radicular (Cassán *et al.*, 2020). O fenômeno é conhecido como "efeito de priming", no qual o N aplicado atua como um indutor metabólico que potencializa os benefícios da inoculação (Galindo *et al.*, 2022).

A resposta positiva dessa interação também está relacionada ao estágio fenológico da planta e às condições de estresse. Em situações de déficit hídrico, a combinação entre inoculação e adubação nitrogenada demonstrou maior eficiência no uso da água e maior acúmulo de massa seca de raízes, especialmente nas camadas de 10–20 cm (Cohen *et al.*, 2015). Neste estudo, este efeito foi observado nos tratamentos com inoculação associada à cobertura nitrogenada, os quais apresentaram incremento significativo na extração de N, P e Ca em relação aos demais tratamentos.

É importante destacar, entretanto, que doses excessivas de N podem inibir os efeitos da FBN devido à retroalimentação negativa sobre a atividade da nitrogenase (Baligar *et al.*, 2001). Portanto, a recomendação do manejo deve buscar equilíbrio entre oferta de N mineral e estímulo à microbiota promotora de crescimento.

2.4 RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DO TRIGO AO ESTRESSE HÍDRICO

O estresse hídrico é um dos principais fatores abióticos limitantes à produtividade do trigo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais onde a distribuição pluvial é irregular. A deficiência hídrica afeta diversos processos fisiológicos nas plantas, incluindo a expansão celular, a fotossíntese, a atividade enzimática e o metabolismo do N (Taiz *et al.*, 2017). Em condições de estresse moderado, as plantas de trigo desenvolvem mecanismos adaptativos que envolvem tanto respostas morfofisiológicas quanto alterações na expressão gênica.

Uma das respostas mais comuns é a redução da condutância estomática, visando minimizar a perda de água por transpiração, mas que também pode limitar a entrada de CO₂ e reduzir a taxa fotossintética. O índice SPAD, utilizado como medida indireta do conteúdo de clorofila, é uma ferramenta prática para monitorar esses efeitos em condições controladas ou de campo (Cohen *et al.*, 2015).

O estresse hídrico também modula a produção de fito-hormônios como o ácido abscísico (ABA), o qual desempenha papel fundamental na sinalização do estresse e na ativação de respostas como fechamento estomático e síntese de proteínas protetoras (Pereira *et al.*, 2022). Em situações de estresse severo pode haver inibição da divisão e expansão celular nas raízes, comprometendo o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade e a absorção de nutrientes essenciais, como cálcio e fósforo (Taiz *et al.*, 2017).

A compreensão dessas respostas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo que visem aumentar a resiliência da cultura, como a seleção de cultivares tolerantes e o uso de inoculantes que promovem o crescimento radicular.

2.5 DISTRIBUIÇÃO RADICULAR DO TRIGO EM SOLOS ÁCIDOS

A distribuição radicular do trigo em solos tropicais e subtropicais é fortemente influenciada pela acidez do solo, um dos principais fatores limitantes ao aprofundamento das raízes. Em solos com pH abaixo de 5,5, especialmente nos horizontes subsuperficiais, há aumento da solubilidade do Al^{3+} , o qual torna-se tóxico para as plantas. O Al^{3+} em níveis tóxicos inibe a divisão e alongação celular das raízes, provocando encurtamento do eixo principal e supressão do crescimento de raízes laterais (Kochian *et al.*, 2015). Isso compromete a absorção de água e nutrientes nas camadas mais profundas, restringindo a eficiência do uso dos recursos edáficos.

Latossolos Vermelhos distróficos, comuns nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, frequentemente apresentam saturação por Al^{3+} superior a 50% abaixo dos 20 cm de profundidade (CQFS-RS/SC 2016). Essa condição agrava a limitação do crescimento radicular, especialmente em sistemas agrícolas que não adotam práticas de correção do perfil do solo, como a aplicação de gesso agrícola ou calagem profunda (Caires *et al.*, 2016).

Alguns cultivares de trigo apresentam mecanismos fisiológicos de tolerância ao Al^{3+} , como a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes. Esses compostos, principalmente malato e citrato, formam complexos estáveis com o Al^{3+} , impedindo sua entrada nas células (Delhaize *et al.*, 2022). No entanto, esses mecanismos têm alto custo metabólico, podendo consumir até 15% dos fotoassimilados da planta (Ryan *et al.*, 2021).

A limitação do crescimento radicular vertical também promove redistribuição de biomassa para as camadas superficiais e intermediárias (10–20 cm), onde as raízes se

concentram na tentativa de explorar melhor a zona de maior fertilidade. Assim, a compreensão dos fatores que afetam a arquitetura radicular do trigo em solos ácidos é crucial para o manejo sustentável da fertilidade e da água no sistema produtivo.

2.6 CALAGEM COMO ESTRATÉGIA DE CORREÇÃO DA ACIDEZ

A calagem é a prática agrícola mais utilizada para corrigir a acidez do solo, sendo fundamental para neutralizar o Al^{3+} tóxico, elevar o pH e aumentar a saturação por bases. Esse manejo influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular das culturas, especialmente em solos tropicais fortemente intemperizados (Raij, 2008).

Em solos com elevada acidez, como nos Latossolos, a aplicação de corretivos agrícolas (geralmente calcários dolomítico ou calcítico) permite neutralizar os íons H^+ e Al^{3+} nas camadas superficiais do solo. Contudo, o efeito da calagem tende a se restringir à camada arável, devido à baixa mobilidade dos carbonatos no perfil do solo (Caires *et al.*, 2016). Isso significa que, embora a calagem promova boas condições para a germinação e o estabelecimento inicial das plantas, nem sempre é suficiente para corrigir a acidez em subsuperfície.

Estudos de longo prazo em sistema plantio direto demonstram que a aplicação de calcário na superfície pode, ao longo dos anos, causar melhorias em profundidade por meio do transporte de íons por lixiviação e atividade biológica (Roscoe *et al.*, 2006).

2.7 GESSAGEM E MELHORIA DO SUBSOLO

A gessagem consiste na aplicação de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como fonte de cálcio e enxofre, sendo amplamente recomendada para corrigir problemas de acidez em subsuperfície (20–60 cm), onde a calagem apresenta limitações devido à baixa mobilidade dos carbonatos. O gesso é um sal bem mais solúvel que o carbonato de cálcio que permite o fornecimento de cálcio em profundidade e a redução da toxicidade por Al^{3+} ao ser movimentado para o subsolo com a água das chuvas ou irrigação (Sumner, 1995; Raij, 2008).

A atuação do gesso ocorre principalmente por troca de cátions no complexo de troca do solo. O Ca^{2+} fornecido pelo gesso se movimenta com o sulfato (SO_4^{2-}) na forma de par iônico (CaSO_4^0) e, no subsolo, o Ca^{2+} é deslocado pelo Al^{3+} , formando AlSO_4^+ , cuja espécie de Al não é tóxica às plantas. Além disso, o SO_4^{2-} também forma o par iônico MgSO_4^0 , que contribui para a migração do magnésio da superfície para o subsolo (Caires *et al.*, 2016).

Do ponto de vista agrônomo, a gessagem promove o aprofundamento do sistema radicular das plantas, ampliando a zona explorada pelas raízes para absorção de água e nutrientes. Em trigo, a aplicação de gesso tem sido associada ao aumento da massa seca de raízes em profundidade, maior extração de cálcio e enxofre e melhoria da tolerância ao estresse hídrico. A dose de gesso pode ser recomendada com base no teor de argila e no aumento de cálcio em subsuperfície. O mais novo método de recomendação de gesso para aplicação em superfície em sistema plantio direto se baseia na elevação da saturação por cálcio na capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe) do solo (Caires; Guimarães, 2018). A gessagem associada à calagem e ao uso de inoculantes integram práticas de manejo sustentável do solo em agricultura de conservação baseada no sistema plantio direto.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da inoculação de *A. brasilense* na performance de plantas de trigo crescidas sem e com restrição de água.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar a influência da inoculação de *A. brasilense*, sem e com adição de N em cobertura, nos índices de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total, e também na extração de N, P, K, Ca, Mg e S pelas plantas de trigo crescidas sem e com restrição hídrica.

Avaliar a massa seca da parte aérea e das raízes de plantas de trigo em função da inoculação das sementes com *A. brasilense*, sem e com adição de N em cobertura, na ausência e presença de déficit hídrico;

4 HIPÓTESES

A inoculação de sementes de trigo com *Azospirillum brasilense*, especialmente quando associada à adubação nitrogenada em cobertura, aumenta a massa seca de raízes e da parte aérea, bem como a extração de nutrientes pelas plantas, particularmente em condições de déficit hídrico.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O presente estudo foi realizado utilizando amostras de solo coletadas na Fazenda Escola "Capão da Onça", pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). O solo utilizado classifica-se como Latossolo Vermelho textura média, caracterizado por alta acidez. Inicialmente, realizou-se incubação do solo com calcário dolomítico durante um período de 90 dias, com o objetivo de elevar a saturação por bases para 70%. Durante todo esse período, a umidade do solo foi mantida rigorosamente na capacidade de campo (CC) através de irrigações controladas.

As unidades experimentais consistiram em colunas cilíndricas de policloreto de vinila (PVC), com dimensões padronizadas de 50 cm de altura por 15 cm de diâmetro. Essas colunas foram preenchidas de forma estratificada: os primeiros 10 cm (camada superficial) receberam o solo corrigido com calcário, enquanto os 40 cm inferiores (10-50 cm) foram preenchidos com solo ácido não corrigido, simulando assim condições típicas de um subsolo com limitações químicas para o crescimento das raízes. Visando simular uma situação prática bastante comum, as condições do subsolo foram melhoradas mediante aplicação de gesso agrícola. A dose de gesso foi definida de acordo com o método proposto por Caires & Guimarães (2018). O gesso (dose equivalente a $6,5 \text{ t ha}^{-1}$) foi aplicado sobre a superfície das colunas de solo 30 dias antes da semeadura. Em seguida, foi feita irrigação com uma quantidade de água equivalente a 50 mm por tonelada de gesso, sendo o volume total de água dividido em várias aplicações durante os 30 dias anteriores à semeadura.

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi realizado em estufa climatizada da UEPG, utilizando-se o delineamento em blocos ao acaso, no esquema fatorial 3×2 , com três repetições. Os fatores estudados foram: sem inoculação, com inoculação de *A. brasilense* e com inoculação de *A. brasilense* mais aplicação de N em cobertura; e sem e com déficit hídrico. A inoculação das sementes de trigo foi realizada com inoculante líquido contendo as estirpes AbV5 e AbV6 ($2 \times 10^8 \text{ UFC mL}^{-1}$), na dose de $2,5 \text{ mL kg}^{-1}$ de sementes. Em todos os tratamentos foi feita adubação básica de semeadura com N, P, K e S e micronutrientes por meio da abertura de sulco no centro do tubo de PVC. Foram aplicados 1,77 g de superfosfato simples (03-17-00), 0,15 g de ureia (45-00-00) e 0,48 g de KCl (00-00-60). Para o fornecimento de micronutrientes, foram

adicionados em cada tubo 75 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 12 mg de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 44 mg de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 36 mg de $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 11,4 mg de H_3BO_3 e 0,55 mg de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. O N em cobertura foi aplicado na forma de ureia, em dose equivalente a 80 kg N ha^{-1} , no perfilhamento das plantas.

A semeadura foi realizada no dia 11 de agosto de 2021 com oito sementes de trigo, cultivar TBio Tibagi, em cada coluna e, depois do desbaste após a emergência, foram mantidas quatro plantas de trigo por coluna. A determinação da CC do solo foi realizada por meio do método de saturação: o solo foi completamente saturado com água, e o volume retido após drenagem gravitacional foi anotado. Com base nesse valor, foram definidos os volumes correspondentes a 80% (sem déficit hídrico) e 40% (com déficit hídrico) da CC, aplicados como regimes hídricos após a semeadura. A manutenção dos regimes hídricos foi realizada por meio de pesagem individual dos tubos diariamente, com a devida complementação de água, dependendo da condição hídrica, durante todo o período de condução do experimento

5.3 AVALIAÇÕES

As avaliações foram realizadas aos 50 dias após a emergência. A primeira avaliação consistiu na medição do índice SPAD que fornece uma estimativa indireta dos teores de clorofila *a* e *b* presentes nas folhas, e da clorofila total que é obtida através da soma dos valores de *a* e *b*. Essa medição foi realizada com auxílio de um clorofilômetro portátil (ClorofiLOG), tomando-se o cuidado de efetuar as leituras sempre na mesma posição foliar e no mesmo horário do dia para minimizar variações. As leituras foram realizadas na folha-bandeira durante o período da manhã, entre 9:00 h e 11:00 h.

Para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA), as plantas foram cortadas rente ao solo e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60°C até atingirem massa constante. O mesmo procedimento de secagem foi adotado para a determinação da massa seca de raízes (MSR); porém, neste caso, primeiramente os tubos foram serrados verticalmente e depois as camadas de raízes foram seccionadas para serem tratadas separadamente uma das outras e depois foi feito o processo de lavagem de maneira cuidadosa em peneira com malha de 0,5 mm para separar as raízes do solo. Após a secagem, tanto a parte aérea quanto as raízes foram pesadas em balança de precisão.

Logo após a determinação da MSPA das plantas de trigo, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S, por meio dos métodos descritos em

Malavolta *et al.* (1997). Em seguida, a extração de nutrientes pela parte aérea das plantas foi determinada multiplicando-se a concentração de cada nutriente analisado pela MSPA das plantas.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% com o auxílio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). Na ausência de interação significativa entre os tratamentos, os dados foram comparados pelas médias das observações. Nos casos em que foi detectada interação significativa entre os fatores estudados (inoculação × disponibilidade hídrica), procedeu-se o desdobramento das interações para permitir a interpretação mais adequada dos resultados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TEORES DE CLOROFILA *a*, *b* e total

Os valores médios do índice SPAD para clorofila *a*, *b* e total não apresentaram diferenças significativas em resposta à inoculação com *A. brasilense*, ao déficit hídrico (DH) ou à interação entre esses fatores (Tabela 1). A ausência de efeitos significativos pode ser atribuída à estabilidade do conteúdo de clorofila nas folhas, mesmo sob condições de déficit hídrico. Esses resultados sugerem que o déficit hídrico, na intensidade aplicada, não reduziu a concentração de clorofila e que a inoculação com *A. brasilense* também não promoveu incremento desse pigmento nas condições avaliadas.

Tabela 1. Clorofila *a* (CLF *a*), clorofila *b* (CLF *b*) e clorofila total (CLF total) em plantas de trigo considerando a inoculação (I) das sementes com *Azospirillum brasilense* (AbV5-AbV6) e adição de N em cobertura, sem e com déficit hídrico (DH).

Tratamento	Índice SPAD		
	CLF <i>a</i>	CLF <i>b</i>	CLF Total
Inoculação (I)			
Sem I	23,63 a	10,82 a	34,44 a
Com I	22,71 a	10,56 a	33,26 a
Com I + N	23,20 a	11,06 a	34,26 a
DMS	1,25	0,81	1,92
Déficit Hídrico (DH)			
Sem DH	22,94 a	10,71 a	33,68 a
Com DH	23,41 a	10,92 a	34,33 a
DMS	0,83	0,54	0,81
CV (%)	3,41	4,73	3,56
		<i>P</i> > <i>F</i>	
Inoculação (I)	0,182	0,276	0,241
Déficit Hídrico (DH)	0,233	0,409	0,260
I × DH	0,899	0,367	0,948

CV: coeficiente de variação. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

A clorofila *a* foi mais abundante que a clorofila *b* em todos os tratamentos, o que é esperado, dado seu papel principal na fotossíntese. Sob as condições experimentais adotadas, a inoculação de *A. brasilense* nas sementes de trigo, independentemente da adição de N em

cobertura, não influenciou significativamente os índices de clorofila nas folhas, tanto em condição de déficit hídrico quanto de disponibilidade hídrica adequada.

6.2 MASSA SECA DA PARTE AÉREA E MASSA SECA DE RAÍZES

6.2.1 Massa Seca da Parte Aérea (MSPA)

Houve interação significativa entre inoculação e déficit hídrico ($P = 0,043$) para a MSPA, indicando que o efeito da inoculação foi dependente das condições hídricas impostas (Tabela 2). De forma geral, o tratamento com inoculação associada à aplicação de N em cobertura (Com I + N) apresentou os maiores valores de MSPA. Já, os tratamentos sem inoculação ou apenas com inoculação sem N apresentaram menor acúmulo de biomassa aérea,

Tabela 2. Massa seca parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) considerando a inoculação (I) das sementes com *Azospirillum brasilense* (AbV5-AbV6) e adição de N em cobertura, sem e com déficit hídrico (DH).

Tratamento	MSPA	Massa seca de raiz (MSR)		
		0-10 cm	10-20 cm	20-50 cm
Inoculação (I)	g vaso ⁻¹	----- g dm ⁻³ -----		
Sem I	11,83 b	0,47 a	0,27 b	0,29 a
Com I	11,75 b	0,49 a	0,27 b	0,28 a
Com I + N	14,5 a	0,50 a	0,32 a	0,26 a
DMS	1,93	0,09	0,05	0,04
Déficit Hídrico (DH)				
Sem DH	12,50 a	0,48 a	0,23 b	0,33 a
Com DH	12,89 a	0,49 a	0,33 a	0,22 b
DMS	1,28	0,06	0,03	0,03
CV%	9,59	11,55	11,11	9,92
$P > F$				
Inoculação (I)	0,004	0,636	0,029	0,325
Déficit Hídrico (DH)	0,513	0,745	<0,001	<0,001
I × DH	0,043	0,049	0,032	0,419

CV: coeficiente de variação. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

com variações conforme a presença ou ausência de déficit hídrico. Esses resultados sugerem que a eficiência da inoculação com *A. brasilense* no desenvolvimento da parte aérea do trigo foi influenciada pela disponibilidade hídrica, sendo potencializada pela combinação com a adubação nitrogenada. Por outro lado, o déficit hídrico, isoladamente, não exerceu influência significativa na MSPA, com médias semelhantes entre os tratamentos com déficit hídrico (12,89 g vaso⁻¹) e sem déficit hídrico (12,50 g vaso⁻¹). A ausência de resposta ao déficit pode estar associada à curta duração do estresse ou à resiliência fisiológica do trigo sob as condições impostas.

O desdobramento da interação entre inoculação e déficit hídrico para a MSPA do trigo revelou que, na ausência de déficit hídrico, o maior acúmulo de MSPA foi observado no tratamento com inoculação associada à adição de N (14,33 g vaso⁻¹), diferindo significativamente da inoculação sem N (10,50 g vaso⁻¹) (Tabela 3). Sob déficit hídrico, a inoculação associada à adição de N (14,66 g vaso⁻¹) promoveu maior valor de MSPA em comparação ao tratamento sem inoculação (11,00 g vaso⁻¹). Além disso, observou-se que o déficit hídrico aumentou significativamente a MSPA apenas no tratamento com inoculação (de 10,50 para 13,00 g vaso⁻¹). Esses resultados reforçam que a resposta à inoculação depende das condições hídricas e da adubação nitrogenada (Tabela 3).

Tabela 3. Desdobramento da interação entre os tratamentos com inoculação (I) e déficit hídrico (DH) para a massa seca da parte aérea (MSPA) de trigo.

Tratamento	Déficit Hídrico (DH)		
	Sem	Com	
Inoculação (I)	----- g vaso ⁻¹ -----		<i>P</i> > <i>F</i>
Sem I	12,66 abA	11,00 bA	0,124
Com I	10,50 bB	13,00 abA	0,031
Com I + N	14,33 aA	14,66 aA	0,744
<i>P</i> > <i>F</i>	0,010	0,014	

Letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

6.2.2 Massa Seca de Raízes (MSR) na Camada de 0-10 cm

Os resultados mostraram que, embora a inoculação e o déficit hídrico não tenham alterado a MSR na camada de 0-10 cm quando analisados separadamente, houve interação significativa (*P* = 0,049) entre esses tratamentos (Tabela 2). O desdobramento dessa interação revelou que a bactéria modificou a resposta ao estresse: plantas não inoculadas aumentaram a

MSR sob déficit hídrico (de 0,420 para 0,523 g dm⁻³), seguindo o padrão clássico de alocação de carbono para raízes, enquanto as inoculadas não alteraram a MSR (Tabela 4). Como demonstrado por Cohen *et al.* (2015), a inoculação com *A. brasilense* redireciona a resposta ao estresse hídrico no trigo, podendo reduzir o crescimento radicular em favor de mecanismos metabólicos de tolerância, padrão que corrobora nossos resultados de tendência de diminuição de MSR em plantas inoculadas sob déficit.

Tabela 4. Desdobramento da interação entre os tratamentos com inoculação (I) e déficit hídrico (DH) para a massa seca de raízes de trigo na camada de 0-10 cm.

Tratamento	Déficit Hídrico (DH)		
	Sem	Com	
Inoculação (I)	----- g dm ⁻³ -----		<i>P</i> > <i>F</i>
Sem I	0,420 aB	0,523 aA	0,049
Com I	0,530 aA	0,447 aA	0,100
Com I + N	0,500 aA	0,507 aA	0,888
<i>P</i> > <i>F</i>	0,092	0,262	

Letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

6.2.3 Massa Seca de Raízes (MSR) na Camada de 10-20 cm

A MSR na camada de 10-20 cm foi maior nos tratamentos com inoculação + N em cobertura e sob déficit hídrico (Tabela 2). Porém, houve interação significativa (*P* = 0,032) entre os tratamentos de inoculação × déficit hídrico para MSR na camada de 10–20 cm. O desdobramento da interação mostrou que, sem déficit hídrico, o tratamento com inoculação + adição de N proporcionou maior MSR do que aquele com inoculação sem N ou o tratamento sem inoculação (Tabela 5), indicando possível efeito positivo da combinação no crescimento radicular em condições favoráveis de umidade, o que favorece o crescimento radicular, possivelmente pela maior disponibilidade de exsudatos radiculares que estimulam a atividade microbiana na rizosfera (Fukami *et al.*, 2018). A indução de déficit hídrico aumentou a MSR de 0,203 para 0,330 g dm⁻³ no tratamento sem inoculação, e de 0,197 para 0,340 g dm⁻³ no tratamento com inoculação de *A. brasilense*. Esses dados indicam que o déficit hídrico estimulou o aprofundamento das raízes, seguindo o padrão clássico de alocação de carbono para camadas intermediárias sob estresse (Pampana *et al.*, 2016). Isso só não aconteceu quando foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura.

Tabela 5. Desdobramento da interação entre os tratamentos com inoculação (I) e déficit hídrico (DH) para a massa seca de raízes de trigo na camada de 10-20 cm.

Tratamento	Déficit Hídrico (DH)		
	Sem	Com	
Inoculação (I)	----- g dm ⁻³ -----		<i>P > F</i>
Sem I	0,203 bB	0,330 aA	<0,001
Com I	0,197 bB	0,340 aA	<0,001
Com I + N	0,300 aA	0,337 aA	0,186
<i>P > F</i>	0,004	0,926	

Letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

6.2.4 Massa Seca de Raízes (MSR) na Camada de 20-50 cm

A MSR na camada de 20–50 cm não foi influenciada significativamente pela interação entre os tratamentos (Tabela 2). A inoculação com *A. brasilense*, com ou sem aplicação de N em cobertura, não influenciou significativamente a MSR nessa profundidade, com médias estatisticamente semelhantes entre os tratamentos (0,29; 0,28 e 0,26 g dm³ para os tratamentos sem inoculação, com inoculação, e com inoculação + N, respectivamente). Esses resultados sugerem que a inoculação não promoveu aumento no crescimento radicular em subsuperfície, o que pode estar relacionado a uma menor atividade da bactéria nessa profundidade, possivelmente devido à menor disponibilidade de exsudatos radiculares e oxigênio. Por outro lado, o fator déficit hídrico apresentou efeito significativo sobre a MSR. O déficit hídrico reduziu a massa de raízes na camada de 20–50 cm, de 0,33 para 0,22 g dm³. Essa redução indica que a limitação hídrica inibiu o aprofundamento do sistema radicular, concordando com os mecanismos descritos por Taiz *et al.* (2017) que demonstram a supressão do crescimento radicular em profundidade devido à redução na divisão e expansão celular sob condições de déficit hídrico. Esse efeito é particularmente relevante em solos tropicais, considerando que a combinação de déficit hídrico e acidez no subsolo (20–50 cm) pode restringir ainda mais o crescimento radicular (Rajj, 2008).

6.3 EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES

A inoculação com *A. brasilense* associada à adubação nitrogenada (Com I + N) promoveu aumento significativo na extração de alguns dos nutrientes pelas plantas de trigo, em

relação aos demais tratamentos de inoculação (Tabela 6). A extração de N, por exemplo, foi de 93,8 mg planta⁻¹ no tratamento com I + N, enquanto nos tratamentos sem inoculação e com inoculação sem N, os valores foram de 67,0 e 71,5 mg planta⁻¹, respectivamente. Esses dados indicam que a presença do inoculante isoladamente não foi suficiente para aumentar significativamente a extração de N, sendo o fornecimento complementar de N mineral determinante para esse resultado. Esses dados confirmam as observações de Hungria *et al.* (2013) que relataram incrementos de 20-35% na extração de N quando a inoculação foi combinada com a adubação nitrogenada.

Para o P (Tabela 6), observou-se diferença significativa entre os tratamentos, com os maiores valores no tratamento que combinou inoculação e adubação nitrogenada (9,8 mg planta⁻¹), seguido pela inoculação sem N (7,5 mg planta⁻¹) e o menor valor no controle sem inoculação (5,3 mg planta⁻¹). Esse incremento na extração de P com a combinação de inoculação + N está alinhado com os mecanismos descritos por Hungria *et al.* (2013)

Tabela 6. Extração dos nutrientes pelas plantas de trigo considerando a inoculação (I) das sementes com *Azospirillum brasilense* (AbV5-AbV6) e adição de N em cobertura, sem e com déficit hídrico (DH)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
Inoculação (I)	----- mg planta ⁻¹ -----					
Sem I	67,0 b	5,3 b	91,5 a	8,8 b	5,2 b	10,2 a
Com I	71,5 b	7,5 ab	95,9 a	9,1 b	5,2 b	10,4 a
Com I + N	93,8 a	9,8 a	109,0 a	11,9 a	6,9 a	11,8 a
DMS	19,5	2,7	21,6	2,7	1,5	4,0
Déficit Hídrico (DH)						
Sem DH	78,4 a	7,4 a	102,2 a	9,7 a	5,6 a	10,8 a
Com DH	76,6 a	7,7 a	95,4 a	10,2 a	5,9 a	10,9 a
DMS	13,0	1,8	14,4	1,8	1,0	2,7
CV (%)	15,9	22,7	13,8	17,0	15,9	23,4
	<i>P > F</i>					
Inoculação (I)	0,008	0,004	0,117	0,018	0,015	0,525
Déficit Hídrico (DH)	0,762	0,714	0,318	0,543	0,577	0,982
I × DH	0,850	0,108	0,260	0,227	0,172	0,722

Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

relacionados à maior produção de ácidos orgânicos na rizosfera e por Fernandes *et al.* (2006) relacionados ao aumento da exploração radicular. Para K e S, embora a extração tenha sido numericamente superior no tratamento I + N (K: 109,0 mg planta⁻¹; S: 11,8 mg planta⁻¹), não houve diferença significativa entre os tratamentos na extração de K e S pelas plantas de trigo.

Em relação ao Ca e Mg, a extração foi significativamente maior no tratamento com I + N (11,9 mg planta⁻¹ e 6,9 mg planta⁻¹, respectivamente), em comparação aos demais tratamentos, alinhando-se aos dados de Hungria *et al.* (2013) sobre a capacidade do *Azospirillum* em facilitar a assimilação de cátions, mesmo em solos com baixa saturação de bases, desde que haja o fornecimento complementar de N mineral.

O déficit hídrico não afetou significativamente a extração de nutrientes pelas plantas de trigo (Tabela 6). Esse comportamento pode estar relacionado ao curto período de estresse imposto ou à resiliência das plantas frente à limitação hídrica nas condições experimentais adotadas.

Esses achados reforçam o papel da inoculação com *A. brasilense* como tecnologia complementar ao manejo da adubação nitrogenada e sugerem benefícios indiretos também na extração de outros nutrientes, especialmente quando associada ao fornecimento adequado de N mineral.

7 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que a inoculação de *A. brasilense* associada à adubação nitrogenada em cobertura promoveu maior acúmulo de biomassa da parte aérea de plantas de trigo, mesmo sob déficit hídrico.

A restrição hídrica influenciou a distribuição da massa de raízes de trigo ao longo da coluna de solo, aumentando-a na camada de 10–20 cm e reduzindo-a na camada de 20–50 cm. Porém, o déficit hídrico não alterou os teores de clorofila e a absorção de nutrientes pelas plantas, sugerindo que o estresse de seca aplicado não comprometeu a assimilação de nutrientes e o desenvolvimento vegetativo das plantas.

A inoculação com *A. brasilense* pode ser uma estratégia complementar ao manejo da adubação nitrogenada, especialmente em ambientes com restrições hídricas. Estudos futuros poderiam avaliar o impacto desses tratamentos na performance produtiva de grãos em diferentes cultivares de trigo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 921–950, 2001.
- CAIRES, E.F; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H.A.W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. **Pedosphere**, v. 26, p. 474-485, 2016.
- CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 1987–1995, 2018.
- CASSÁN, F.; VAZQUEZ, S.; ALBARRACÍN, V. H.; *et al.* *Azospirillum brasilense*: a model for plant growth promotion. In: DIALLO, S.; TADDEI, F.; CHEN, Y. (Ed.). **Microbial models: from environmental to industrial sustainability**. Cham: Springer, 2020. p. 245–260, 2020.
- COHEN, A. C. *et al.* *Azospirillum brasilense* ameliorates the metabolic response to drought in wheat seedlings. **Plant and Soil**, v. 391, n. 1–2, p. 383–397, 2015.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2023/2024**. Brasília, DF, v. 11, 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 21 abril. 2025
- DELHAIZE, E. *et al.* Mechanisms of aluminium resistance in plants and the role of Al-activated malate transporter (ALMT) genes. **New Phytologist**, v. 236, n. 2, p. 610–622, 2022.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Trigo: o cereal da saúde**. Passo Fundo: EMBRAPA-Trigo, 2015. 28 p. (Documentos, 125). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/trigo/publicacoes>>. Acesso em 29 de mar. 2025
- FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0c372c04-8b29-4093-bba6-8674b1d237c7/content>>. Acesso em: 12 de mai. 2025
- FERNANDES, M. S. *et al.* **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. Ed. Viçosa, MG. editora: SBCS 2006. 670p
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FUKAMI, J. *et al.* Root colonization pattern and nitrogen fixation ability of *Azospirillum brasilense* mutants affected in auxin biosynthesis. **Archives of Microbiology**, v. 200, p. 279–289, 2018.

GALINDO, F. S. *et al.* Priming effect of *Azospirillum brasilense* and N fertilization on wheat yield and nitrogen efficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1–12, 2022.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAÚJO, R. S. **Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo**. Londrina: EMBRAPA-Soja, 2013. (Documentos 325).

HUNGRIA, M. *et al.* Coinoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 52, p. 1–13, 2016.

KOCHIAN, L. V. *et al.* How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 66, p. 571–598, 2015.

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

PAMPANA, S. *et al.* Reduced growth and nitrogen uptake during water deficit are mitigated by silicon application in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 488, 2016.

PIRES, J. L. F. **A importância do trigo para a sustentabilidade da agricultura brasileira**. EMBRAPA-Trigo, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/23416523/artigo---a-importancia-do-trigo-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 21 abril 2025.

PEREIRA, M. T. J. *et al.* Physiological and molecular mechanisms associated with drought stress tolerance in cereals: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 201, p. 104965, 2022.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas, Instituto Agronômico, 2008. 233p.

ROSCOE, R. *et al.* Long-term effects of liming and tillage systems on soil acidity and productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 88, p. 30–38, 2006.

RYAN, P. R. *et al.* Costs and benefits of aluminium resistance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 11, p. 3925–3938, 2021.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4

SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N.S.; STEWART, B.A. (Eds.) **Subsoil management techniques**. Lewis Publ., Athens, 1995. p. 147-185.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., & MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2017. 858 p.



INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense* E USO DE GESSO NA AMENIZAÇÃO DOS EFEITOS DE ESTRESSE HÍDRICO E ACIDEZ NO SUBSOLO EM PLANTAS DE TRIGO

Murilo Freitas (PIBIC/CNPq/FA/UEPG), Alex Pinto Matos, Kauane Poliane Kampa, Murilo de Oliveira Delgobo; Vanderson Modolon Duarte; Dion Cristovão Orlonski, Eduardo Fávero Caires, e-mail: edufcaires@gmail.com.

Universidade Estadual de Ponta Grossa/Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola

Ciências Agrárias/Agronomia/Ciência do solo/Fertilidade do Solo e Adubação

Palavras-Chave: *Inoculante; fosfogesso; Triticum aestivum L., nitrogênio; déficit hídrico*

Resumo

Um experimento foi realizado em estufa climatizada, em colunas de solo com 50 cm, para estudar os efeitos da inoculação de *Azospirillum brasilense*, sem e com nitrogênio (N) em cobertura, da aplicação de gesso e do estresse hídrico na produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR) de trigo. As respostas mais relevantes na produção de MSPA e de MSR de trigo com a inoculação foram observadas na presença de N e estresse hídrico. O uso de gesso aumentou a MSR na camada de 20-50 cm na ausência de estresse hídrico e não influenciou a MSPA. O estresse hídrico aumentou a MSR na camada de 10-20 cm e reduziu a MSR na camada de 20-50 cm, sem alterar a MSPA.

Introdução

O trigo é o cereal mais cultivado durante o inverno na região Sul do Brasil. As bactérias promotoras de crescimento de plantas correspondem a um grupo de microrganismos benéficos que possuem capacidade de colonizar a superfície das raízes. O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é capaz de aumentar o crescimento do sistema radicular das plantas. O presente estudo teve o objetivo de avaliar os efeitos da inoculação de *Azospirillum brasilense* associada ao uso de gesso na amenização dos efeitos de estresse hídrico e acidez no subsolo em plantas de trigo.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em estufa climatizada da Universidade Estadual de Ponta Grossa em tubos de PVC com 15 cm de diâmetro e 50 cm de altura. Os primeiros 10 cm dos tubos foram preenchidos com solo corrigido com calcário. Os 40 cm restantes dos tubos foram preenchidos com solo contendo alta acidez. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso no esquema fatorial $3 \times 2 \times 2$, com três repetições. Os fatores estudados foram: sem inoculação, com inoculação e com inoculação mais aplicação de N; sem e com aplicação gesso; e sem e com limitação de água. A inoculação foi realizada com as estirpes AbV5 e AbV6, na dose de 2,5 mL kg⁻¹ de sementes. Para todos os tratamentos foi feita adubação na semeadura com N, P, K e S. O N em cobertura foi aplicado na forma de ureia, na dose de 80 kg N ha⁻¹. O gesso foi aplicado antes da semeadura sobre a superfície, na dose de 6,5 ha⁻¹ (CAIRES & GUIMARÃES, 2018). A semeadura do trigo, cv. TBio Tibagi, foi realizada no dia 11/08/2021, colocando-se oito sementes em cada tubo e, depois do desbaste, foram mantidas quatro plantas por tubo. As plantas de trigo foram submetidas a dois regimes hídricos por meio de manutenção da umidade do solo a

80% (sem limitação de água) e 40% (com limitação de água) da capacidade de campo. A produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR), nas camadas 0–10, 10–20 e 20–50 cm, foram avaliadas aos 50 dias após a emergência. Os dados foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Resultados e Discussão

A inoculação com N e estresse hídrico apresentaram respostas mais relevantes na MSPA e na MSR de trigo (Tabela 1). A aplicação de gesso aumentou a MSR na camada de 20-50 cm na ausência de estresse hídrico, e não influenciou a MSPA. O estresse hídrico aumentou a MSR na camada de 10-20 cm e reduziu a MSR na camada de 20-50 cm, mas não alterou a MSPA.

Tabela 1. Massa seca parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) considerando a inoculação (I) de sementes sem e com adição de N, gesso (G) estresse hídrico (EH).

Tratamento	MSPA	Massa seca de raiz (MSR)		
		0-10 cm	10-20 cm	20-50 cm
Inoculação (I)	g vaso ⁻¹	g dm ⁻³		
Sem I	11,83 b	0,43 b	0,25 b	0,28 a
Com I	11,96 b	0,48 ab	0,26 b	0,26 a
Com I + N	13,58 a	0,51 a	0,33 a	0,27 a
DMS	1,19	0,06	0,03	0,02
Gesso (G)				
Sem G	12,22 a	0,46 a	0,28 a	0,27 a
Com G	12,69 a	0,49 a	0,28 a	0,28 a
DMS	0,80	0,04	0,02	0,02
Estresse (EH)				
Sem EH	12,42 a	0,48 a	0,23 b	0,30 a
Com EH	12,50 a	0,47 a	0,33 a	0,24 b
DMS	0,80	0,04	0,02	0,02
CV%	9,3	13,1	10,52	9,75
		P > F		
Inoculação (I)	0,019	0,019	<0,001	0,089
Gesso (G)	0,236	0,184	0,506	0,270
Estresse (EH)	0,832	0,508	<0,000	<0,001
I x G	0,062	0,209	0,041	0,037
I x EH	0,043	0,001	<0,001	0,023
G x EH	0,439	0,282	0,738	<0,001

Conclusões

As respostas mais relevantes na produção de MSPA e MSR de trigo com a inoculação de *A. brasilense* ocorreram na presença de N e estresse hídrico. O uso de gesso aumentou a MSR na camada de 20-50 cm na ausência de estresse hídrico. O estresse hídrico aumentou a MSR na camada de 10-20 cm e reduziu a MSR na camada de 20-50 cm, sem alterar a MSPA.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), à Fundação Araucária, ao CNPq, ao Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires e à toda equipe do Laboratório de Fertilidade do Solo da UEPG (LabFer).

CAIRES, E.F.; GUIMARÃES, A.M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. *Agronomy Journal*, v. 110, p. 1987-1995, 2018.