

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

RAFAELA SILVA GREGORIO LIMA

**EFEITO RESIDUAL DE BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO E
APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO NA SOJA, SOBRE A PRODUTIVIDADE DE AVEIA
PRETA NA ROTAÇÃO**

Ilha Solteira - SP

2025

RAFAELA SILVA GREGORIO LIMA

**EFEITO RESIDUAL DE BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO E
APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO NA SOJA, SOBRE A PRODUTIVIDADE DE AVEIA
PRETA NA ROTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andreotti

Ilha Solteira – SP

Novembro de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- L732e Lima, Rafaela Silva Gregorio.
 Efeito residual de bactérias solubilizadoras de fosfato e aplicação de magnésio na soja, sobre a produtividade de aveia preta na rotação / Rafaela Silva Gregorio Lima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
 35 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025
- Orientador: Marcelo Andreotti
- Inclui bibliografia
1. *Avena strigosa*. 2. *Bacillus subtilis*. 3. Coinoculação. 4. Plantas de cobertura. 5. *Priestia megaterium*. 6. Sistema plantio direto, Sustentabilidade agrícola.

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRÔNOMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Efeito residual de bactérias solubilizadoras de fosfato e aplicação de magnésio na soja, sobre a produtividade de aveia preta na rotação

ALUNO: *Rafaela Silva Gregório Lima* RA: *202052011*

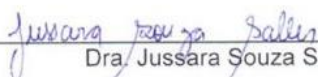
ORIENTADOR: Marcelo Andreotti

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 98

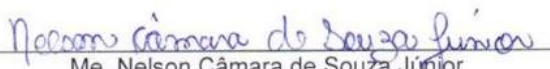
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Andreotti
Presidente (Orientador)



Dra. Jussara Souza Salles



Me. Nelson Câmara de Souza Júnior



Documento assinado digitalmente
RAFAELA SILVA GREGÓRIO LIMA
Data: 07/07/2026 17:52:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Rafaela Silva Gregório Lima

Ilha Solteira, 26 de novembro de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico,

A todos que acreditaram em mim, que proporcionaram oportunidades e contribuíram, de alguma forma, para que eu conseguisse chegar até aqui. Durante esses cinco anos de graduação, nunca duvidaram da minha capacidade, empenho e dedicação, acompanhando com orgulho e alegria cada pequena conquista da minha trajetória. Jamais esquecerei daqueles que me ofereceram cuidado, amor e incentivo incondicional. Em especial, à minha mãe Luciana Silva e ao meu pai Ricardo Gregorio Lima, que me deram todo o suporte necessário, acreditando nos meus sonhos e fazendo o possível para que eles se tornassem realidade.

E, com todo o meu carinho, dedico também ao meu avô Otaides Cruvinel, que semeou a paixão pelo trabalho no campo e o amor por esta profissão que escolhi seguir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me abençoado, fortalecido e guiado durante todos esses anos. Foi Ele quem me mostrou o caminho a seguir, em quem confiei cada dia da minha vida e cada desafio enfrentado. Sou grata por ter sentido Sua presença em todos os momentos dessa caminhada acadêmica, sustentando-me, protegendo-me e concedendo-me sabedoria e coragem para chegar até aqui.

Aos meus irmãos Maria Angélica Silva Lima e Antony Gregorio Silva Lima, que sempre estão comigo em todos os momentos, torcem pelos meus objetivos e se alegram com minhas conquistas. Sou grata por ter irmãos maravilhosos, e que também me alegro com felicidade deles.

À República Bola Gato, onde morei durante toda a graduação em Ilha Solteira, sendo minha segunda casa. Foi ali que tive o privilégio de conhecer e me tornei amiga de pessoas maravilhas, como a Gabriela Boldrine, Ana Beatriz Marchi, Giovanna Queiroz Matara, Leticia Schenaide. Sou grata por todos os momentos vividos de alegria e tempos difíceis, por todas as experiências compartilhadas, que foram essenciais para o meu crescimento durante esse período, sem vocês a faculdade não teria as melhores lembranças.

Às demais Republicas sendo SeuKupira, Pró-Álcool e Canta Galo, onde fiz amigos que serão sempre bons parceiros de vida, também compartilhamos tempos de felicidades, dividindo experiências e criando laços verdadeiros. Foram muitas histórias criadas, que guardarei em meu coração e memória.. Em especial ao Guilherme Nunes, meu amigo de turma, que tanto me incentivou e juntos colecionamos memórias dentro e fora da faculdade, sou grata por termos cultivado essa amizade que perdura.

Ao professor, Marcelo Andreotti, por me orientar com profissionalismo e competência, sempre disponibilizando seu tempo para retirada de dúvidas e ensinamentos, confiando em meu trabalho. Tenho muita admiração pelo seu trabalho. Muito obrigada por tudo.

À Equipe Andreotti, agradeço àqueles que me fizeram crescer não apenas como profissional, mas também como pessoa, ensinando-me o verdadeiro valor do trabalho em equipe. Compartilhamos muitos momentos especiais, tanto de

aprendizado e dedicação, quanto de leveza e descontração, que levarei comigo com muito carinho.

Ao Nelson Câmara de Souza Júnior, visto que sem seu suporte e auxílio, teria sido impossível o desenvolvimento desse trabalho. Sou grata por ter tido você ao meu lado nesse período.

À FEIS/Unesp por todos esses anos de aprendizado, crescimento e conquistas. Cada experiência vivida contribuiu para moldar minha trajetória pessoal e profissional de maneira profunda e inesquecível. Levo comigo não apenas o conhecimento adquirido, mas também a gratidão e o orgulho de ter feito parte desta instituição que foi essencial para a construção dos meus sonhos e do meu futuro.

À toda minha família que sempre me apoiou. Em especial minha avó Maria Helena Silva, a Marlene Gregorio e meu avô Antônio Lima, que cuidaram, me estenderam a mão e se alegrarão com as minhas conquistas.

A todos os profissionais que, ao longo destes anos, contribuíram para o meu crescimento profissional. Cada aprendizado, conselho e oportunidade de vivência foram essenciais para minha formação e amadurecimento na área. Sou especialmente grata a João Paulo Malacarne, Rômulo Moraes, por terem me acolhido, compartilhado conhecimento e servido como inspiração de profissionalismo e dedicação à Agronomia .

A todos, meu imenso carinho e gratidão eterna.

RESUMO

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis é essencial para o equilíbrio produtivo e ambiental dos sistemas agrícolas. O Sistema Plantio Direto (SPD) tem se destacado por promover a conservação do solo e a eficiência no uso de nutrientes, principalmente quando associado à rotação de culturas e ao uso de bioinsumos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito residual da aplicação de bactérias solubilizadoras de fosfato e da aplicação foliar de magnésio na soja sobre o desenvolvimento e a produtividade da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) cultivada em sucessão, no município de Selvíria – MS, durante a safra 2023/24. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3x2, onde foram avaliados três tratamentos com bactérias (*Bradyrhizobium japonicum* nas sementes (controle), combinação de *B. japonicum* nas sementes + *Bacillus subtilis* + *Priestia megaterium* no sulco; *B. japonicum* nas sementes + *B. subtilis* + *P. megaterium* nas sementes), com presença ou ausência de magnésio via foliar, tendo como fonte o sulfato de magnésio na dose padrão de 8 kg ha⁻¹, em estágio V₆ da soja. Os resultados demonstraram que a inoculação bacteriana, especialmente com *Bradyrhizobium*, *B. subtilis* e *P. megaterium* coinoculados via semente, favoreceu o acúmulo de biomassa e os teores de nutrientes na aveia preta, evidenciando o efeito residual positivo das bactérias sobre o solo e a cultura subsequente. Não foram observados efeitos na interação e na aplicação foliar de magnésio, pela não limitância do teor nutricional desse nutriente no solo, explicado pela alta fertilidade, devido a condução em sistema plantio direto de longa duração. Esse trabalho, confirma que uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas desse gênero, tem maior eficiência quando aplicadas na cultura da soja via semente e que seu efeito perdura ao longo do ciclo agrícola. O uso via sulco, tem sua eficiência reduzida, apresentando resultados intermediários. A barreira da palhada e a competição intraespecífica entre as espécies de bactérias presentes na dinâmica do solo pode diminuir a eficiência dessa aplicação. Conclui-se que o uso de bactérias promotoras de crescimento representa uma estratégia eficaz para fortalecer a sustentabilidade e a eficiência produtiva de sistemas agrícolas tropicais sob plantio direto consolidado.

Palavras-chave: *Avena strigosa*, *Bacillus subtilis*, coinoculação, plantas de cobertura, *Priestia megaterium*, sistema plantio direto, sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

The adoption of sustainable agricultural practices is essential for the productive and environmental balance of agricultural systems. The No-Till Farming System (NTFS) has stood out for promoting soil conservation and efficiency in nutrient use, especially when associated with crop rotation and the use of bio-inputs. This work aimed to evaluate the residual effect of the application of phosphate-solubilizing bacteria and foliar application of magnesium in soybeans on the development and productivity of black oats (*Avena strigosa* Schreb.) cultivated in succession, in the municipality of Selvíria – MS, during the 2023/24 growing season. The experimental design adopted was a randomized block design in a 3x2 factorial scheme, where three treatments with bacteria were evaluated (*Bradyrhizobium japonicum* on seeds (control), combination of *B. japonicum* on seeds + *Bacillus subtilis* + *Priestia megaterium* in the furrow; *B. japonicum* on seeds + *B. subtilis* + *P. megaterium* on seeds), with or without magnesium applied via foliar spray, using magnesium sulfate as the source at a standard dose of 8 kg ha⁻¹, at the V6 stage of soybean. The results demonstrated that bacterial inoculation, especially with *Bradyrhizobium*, *B. subtilis*, and *P. megaterium* co-inoculated via seed, favored biomass accumulation and nutrient levels in black oats, highlighting the positive residual effect of the bacteria on the soil and the subsequent crop. No effects were observed on the interaction and foliar application of magnesium, due to the non-limiting nutritional content of this nutrient in the soil, explained by the high fertility resulting from long-term no-till farming. This work confirms that the use of plant growth-promoting bacteria of this genus is more efficient when applied to soybean crops via seed and that its effect lasts throughout the agricultural cycle. Application via furrow application has reduced efficiency, showing intermediate results. The barrier of crop residue and intraspecific competition between bacterial species present in the soil dynamics can decrease the efficiency of this application. It is concluded that the use of plant growth-promoting bacteria represents an effective strategy to strengthen the sustainability and productive efficiency of tropical agricultural systems under consolidated no-till farming.

Keywords: *Avena strigosa*, *Bacillus subtilis*, co-inoculation, cover crops, *Priestia megaterium*, no-till system, agricultural sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dados meteorológicos de precipitação acumulada, temperatura média, máxima e mínima, no período de condução experimental no município de Selvíria/MS, 2024.	21
Figura 2 - Coleta e amostragem de solo da área experimental no município de Selvíria/MS, 2023.	22
Figura 3 - Semeadura da aveia preta sob palhada de soja em solo sob SPD consolidado no município de Selvíria/MS, 2024.	24
Figura 4 - Coleta das plantas, parte aérea e raízes; lavagem; pesagem da matéria fresca da cultura da aveia preta no município de Selvíria/MS, 2024.	25
Figura 5 - Análise química de macro e micronutrientes, conforme o método de Malavolta et al. (1997).	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização da fertilidade do solo na camada de 0,00-0,20 m, antes da semeadura da aveia preta, em área sob sistema plantio direto no município de Selvíria/MS	22
Tabela 2 - Resultados de produtividade da cultura da soja (PGS), população da aveia preta (POP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca de raízes (MFR), massa seca de raízes (MSR), massa fresca total da aveia (MFT), massa seca total da aveia (MST), em função das bactérias e da aplicação foliar de Mg na soja antecessora, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24.....	28
Tabela 3 - Resultados para os acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) magnésio (Mg), enxofre (S-SO ₄ ⁻), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), na massa seca da aveia preta em função das bactérias e da aplicação foliar de Mg na soja antecessora, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Aveia Preta (<i>Avena strigosa</i> Schieb).....	14
2.2 Sistema Plantio Direto (SPD).....	15
2.3 Plantas de cobertura como adubo verde	16
2.4 Produção de soja sob SPD	17
2.5 O papel das bactérias <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Priestia megaterium</i> e <i>Bradyrhizobium japonicum</i> no metabolismo vegetal	18
2.6 Uso de Magnésio na cultura da soja	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Características do local e histórico da área experimental.....	20
3.2 Delineamento experimental e condução do projeto.....	22
3.3 Análise estatística	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5. CONCLUSÃO	35
6. BIBLIOGRAFIA	36

1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna enfrenta o desafio de conciliar altos níveis de produtividade com a preservação dos recursos naturais. Nesse contexto, o Sistema Plantio Direto (SPD) tem se destacado como uma das práticas mais eficientes de manejo conservacionista, pois proporciona a manutenção da estrutura e da fertilidade do solo, reduzindo perdas por erosão e promovendo maior sustentabilidade (Derpsch *et al.*, 2010; Franchini *et al.*, 2012). Os princípios básicos do SPD — o não revolvimento do solo, a manutenção da palhada e a rotação de culturas — atuam de forma conjunta, favorecendo a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, essenciais para o desenvolvimento equilibrado das plantas (Bayer *et al.*, 2006; Costa *et al.*, 2015).

A rotação de culturas é um componente essencial do SPD, pois contribui para a ciclagem de nutrientes, o controle de plantas daninhas e a interrupção de ciclos de pragas e doenças, além de favorecer a formação de matéria orgânica (MO) e o aumento da capacidade de retenção de água no solo (Fernandes *et al.*, 2024). Dentre as espécies utilizadas como cobertura, destaca-se a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), uma gramínea de inverno amplamente cultivada no Sul e Centro-Oeste do Brasil, reconhecida por sua rusticidade, tolerância à acidez e elevada produção de biomassa, o que a torna uma importante opção para sistemas de rotação e integração lavoura-pecuária (Assmann *et al.*, 2010; Carvalho *et al.*, 2017).

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), por sua vez, é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro e apresenta alta capacidade de interação simbiótica com microrganismos do solo. A inoculação de bactérias promotoras de crescimento (BPCP) e fixadoras de nitrogênio, como as dos gêneros *Bradyrhizobium*, *Bacillus subtilis* e *Priestia megaterium*, tem mostrado resultados expressivos na fixação biológica de nitrogênio (FBN), na solubilização de fósforo e na produção de fitormônios vegetais, como auxinas e giberelinas, que estimulam o crescimento radicular e aumentam a eficiência na absorção de nutrientes (Hungria *et al.*, 2015; Fernandes *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Além disso, o efeito residual dessas bactérias no solo pode favorecer o desempenho das culturas cultivadas em sucessão, como a aveia preta, por meio da melhoria das condições microbiológicas e químicas do solo (Silva *et al.*, 2023).

Outro fator relevante na produtividade e nutrição vegetal é o magnésio (Mg), elemento essencial na composição da clorofila e na ativação de enzimas envolvidas na fotossíntese e no metabolismo energético das plantas (Rodrigues *et al.*, 2020). A aplicação foliar de magnésio em culturas como a soja pode melhorar a eficiência fotossintética e o transporte de assimilados, além de potencializar a disponibilidade de nutrientes para culturas subsequentes (Branquinho *et al.*, 2017) pela maior produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. A integração entre o manejo biológico e o manejo nutricional, portanto, constitui uma estratégia promissora para otimizar a produtividade e promover sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis.

Dessa forma, compreender o efeito residual de bactérias solubilizadoras de fosfato e da aplicação foliar de magnésio na soja sobre o desenvolvimento e a produtividade da aveia preta em sucessão é fundamental para o avanço das práticas de manejo integradas no SPD. Acredita-se que o efeito do uso de BPCP e do Mg foliar na cultura da soja, possa perdurar para a cultura de cobertura, afetando seu desenvolvimento nutricional e produção total de matéria seca. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos desses tratamentos na produtividade e nos parâmetros agronômicos da aveia preta cultivada em rotação com a soja, contribuindo para o aprimoramento técnico-científico do uso de bioinsumos e nutrientes minerais suplementares no contexto da agricultura sustentável brasileira.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aveia Preta (*Avena strigosa* Schieb)

A aveia preta é uma gramínea de ciclo hibernal (semeadura no outono/inverno), que se destaca pela rusticidade, tolerância à acidez do solo, baixa exigência nutricional e boa adaptação em regiões do Sul do Brasil, além dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul (Derpsch; Calegari, 1992). Essa espécie apresenta elevada resposta à adubação com nitrogênio (N) e fósforo (P), o que contribui de forma significativa para incremento da produção de biomassa. Assmann *et al.* (2010) relataram uma produção de 7.348 kg ha⁻¹ de matéria seca em cultivo sem adubação; contudo, os autores destacam que, com a inoculação das sementes, manejo adequado e a aplicação de fertilizantes, é possível alcançar valores superiores, desde que as condições climáticas não representem um fator limitante.

A aveia encontra-se entre as principais culturas de inverno cultivadas mundialmente. No contexto brasileiro, destaca-se como a segunda cultura de inverno em importância, registrando um crescimento de 14% na área cultivada entre as safras de 2016 e 2017. O estado do Rio Grande do Sul concentra mais de 70% dessa produção nacional (CONAB, 2017). Entre os fatores que impulsionaram a expansão da cultura, destaca-se a utilização da forragem como alternativa para alimentação animal (Sgarbossa *et al.*, 2020).

Essa espécie forrageira promove cobertura eficiente do solo, uma vez que apresenta elevada produção de matéria seca (PMS). A palhada proveniente da aveia, assim como de outras culturas, possui a capacidade de mitigar as variações do regime térmico no solo, principalmente por refletir parte da radiação solar, evitando que esta incida diretamente sobre a superfície e provoque aquecimento excessivo, o que contribui para reduzir possíveis danos às culturas durante os períodos mais quentes do ano (Bortoluzzi; Eltz, 2000).

Os resíduos provenientes de gramíneas, como é o caso da aveia preta, apresentam lenta taxa de decomposição, devido à elevada relação C/N, o que contribui para uma maior proteção do solo. Aspectos como a facilidade de aquisição de sementes, implantação do cultivo, rápido estabelecimento inicial e elevada produção de matéria seca fazem desta cultura uma espécie de cobertura promissora para uso em SPD. . Entretanto, o uso de gramíneas como cobertura apresenta como limitação a deficiência temporária de N nos estádios iniciais das culturas em sucessão. Isso ocorre porque, durante o processo de decomposição da palhada, a biomassa microbiana do solo promove a imobilização do N reduzindo sua disponibilidade para a cultura subsequente, o que pode resultar em sintomas de deficiência nutricional e queda na produtividade (Bortolini *et al.*, 2000).

2.2 Sistema Plantio Direto (SPD)

A principal finalidade do SPD é reduzir os impactos ocasionados pelo sistema convencional de cultivo. No Brasil, sua adoção iniciou-se por volta da década de 1970, com o intuito de mitigar os processos erosivos do solo. Esse método baseia-se na ausência de revolvimento do solo ou em revolvimento mínimo (apenas no sulco de semeadura), assim, evitando práticas que provoquem a desagregação do solo e aproveitando a palhada remanescente da cultura antecessora. Dessa forma, o solo

preserva suas propriedades químicas, físicas e biológicas, o que contribui para o desempenho e produtividade da cultura em sucessão, desde que as práticas técnicas sejam executadas adequadamente. Para que o sistema seja eficiente, é indispensável a observância dos três princípios fundamentais: não revolvimento do solo, manutenção da cobertura com palhada e diversificação por meio da rotação de cultura (Silva, 2023).

De acordo com a FEBRAPDP (2021), que apresenta dados da EMATER, EMBRAPA e IAPAR, entre os anos de 2017 e 2018 a área sob SPD no Brasil atingiu aproximadamente 33,06 milhões de hectares, evidenciando a ampla difusão e consolidação dessa prática como estratégia eficiente de produção agrícola. Silva (2023) destaca que as principais vantagens da adoção do SPD incluem: redução ou até eliminação das operações de preparo do solo, mitigação da erosão, diminuição da incidência de plantas daninhas (PD) em função da cobertura do solo, interrupção do ciclo de pragas, incremento de MO, maior disponibilidade de nutrientes, estímulo à atividade de organismos benéficos e aumento da capacidade de retenção de água no solo. Para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, o autor ressalta a necessidade de considerar fatores como a compactação do solo, a eficiência do maquinário, o manejo integrado de PD e a avaliação criteriosa da germinação.

O SPD, associado à Integração Lavoura-Pecuária (ILP), constitui uma tecnologia que contribui para a melhoria das propriedades do solo. Esses sistemas favorecem o acúmulo de palhada, além de aprimorar atributos físicos, químicos e biológicos do solo, podendo inclusive auxiliar na recuperação de pastagens degradadas. O SPD pode ser adotado anualmente e apresenta potencial de promover melhorias nas características do solo em maior intensidade do que outros sistemas de manejo (Macedo, 2009). A qualidade desses atributos proporciona condições adequadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas, além de estimular a multiplicação de organismos benéficos no solo (Doran; Parkin, 1994).

2.3 Plantas de cobertura como adubo verde

A adubação verde é uma prática agrícola sustentável que consiste no cultivo de plantas, geralmente leguminosas e/ou gramíneas, com o objetivo de melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, além de fornecer nutrientes às culturas subsequentes. Essas plantas, conhecidas como plantas de cobertura, podem

ser incorporadas ao solo ou deixadas sobre a superfície como palhada, contribuindo para o aumento da MO, fixação biológica de nitrogênio (FBN), ciclagem de nutrientes e proteção contra erosão (Carvalho *et al.*, 2017).

No Brasil, diferentes estudos têm evidenciado os benefícios dessa prática em sistemas agrícolas diversificados. Sgarbossa *et al.* (2020) destacam que espécies como a aveia preta, apresentam elevada produção de biomassa e favorecem a cobertura do solo em sistemas agroflorestais, contribuindo para melhorias na sua estrutura e fertilidade. Outras pesquisas desenvolvidas no Cerrado apontam que o uso de espécies como milheto (*Pennisetum glaucum*), braquiárias (*Urochloa* spp.) e leguminosas como feijão-guandu (*Cajanus cajan*) e crotalária (*Crotalaria juncea*) promoveram incrementos na produtividade da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e aumento nos teores de carbono microbiano do solo (Silva *et al.*, 2023).

Além disso, sistemas de misturas com maior proporção de leguminosas mostraram-se eficientes no aporte de N. Em cultivos irrigados, essas misturas acumularam até 222 kg ha⁻¹ de N, sendo aproximadamente metade proveniente da FBN valor muito superior ao registrado em áreas mantidas apenas com vegetação espontânea (~60 kg ha⁻¹) (Souza *et al.*, 2022).

Outra pesquisa de longo prazo no Sul do Brasil evidenciou que a associação entre plantas de cobertura no inverno e o SPD contribuiu para o sequestro de carbono (C) no solo e aumento da produtividade do milho, reforçando o papel dessas práticas na sustentabilidade agrícola (Fernandes *et al.*, 2024). Assim, a adubação verde, além de fornecer nutrientes e melhorar a qualidade do solo, apresenta impactos positivos na produtividade das culturas e no equilíbrio ambiental, sendo uma estratégia de manejo cada vez mais relevante para sistemas de produção agrícola sustentáveis.

2.4 Produção de soja sob SPD

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) destaca-se como uma das principais commodities agrícolas do Brasil, sendo cultivada em diferentes regiões e sob distintas condições edafoclimáticas. A adoção de sistemas conservacionistas, como o SPD, tem se mostrado fundamental para garantir a sustentabilidade da produção e a manutenção da produtividade em longo prazo (Franchini *et al.*, 2012).

Pesquisas demonstram que a soja cultivada em SPD apresenta maior eficiência na utilização de nutrientes e melhor aproveitamento da água do solo em comparação

ao cultivo convencional. Isso se deve à proteção conferida pela palhada, que reduz a evapotranspiração e contribui para a ciclagem de nutrientes, especialmente N, fósforo (P) e potássio (K) (Bayer *et al.*, 2006). Além disso, a manutenção da palhada auxilia no controle de PD e na redução da erosão, promovendo maior estabilidade produtiva (Costa *et al.*, 2015).

Outro aspecto relevante é a interação entre o SPD e o uso de inoculantes biológicos na cultura da soja. Estudos apontam que a associação do SPD com bactérias fixadoras de nitrogênio, como *Bradyrhizobium spp.*, potencializa a FBN, no caso da soja, eliminando a necessidade de fertilização nitrogenada mineral e aumentando a produtividade de grãos (Hungria *et al.*, 2015). Isso torna o SPD uma tecnologia que integra manejo físico do solo e manejo biológico, contribuindo para sistemas agrícolas mais resilientes e de baixo impacto ambiental.

Em ensaios conduzidos em áreas de LATOSSOLO VERMELHO no Paraná, verificou-se que o SPD, associado à rotação de culturas e ao manejo adequado da fertilidade, proporcionou aumento da produtividade da soja em relação ao preparo convencional, sobretudo em condições de maior intensidade de chuvas (Franchini *et al.*, 2007). Esses resultados reforçam que a adoção prolongada do SPD contribui não apenas para ganhos imediatos de rendimento, mas também para a construção de um solo mais equilibrado e fértil ao longo dos ciclos agrícolas .

2.5 O papel das bactérias *Bacillus subtilis*, *Priestia megaterium* e *Bradyrhizobium japonicum* no metabolismo vegetal

O uso de microrganismos benéficos tem se consolidado como uma alternativa sustentável para melhorar as técnicas agrícolas e reduzir a dependência de insumos químicos. As BPCP ou *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR), são microrganismos do solo que interagem de forma positiva com o sistema radicular, promovendo benefícios ao crescimento, nutrição e tolerância das culturas a diferentes condições de estresse (Vesser *et al.*, 2020).

Dentre os gêneros de maior importância agrônômica destacam-se *Bacillus* e *Priestia*, amplamente estudados devido à sua capacidade de melhorar a absorção de nutrientes, favorecer o crescimento radicular e aumentar a produtividade agrícola. Essas bactérias podem ser encontradas naturalmente em solos agrícolas e florestais,

principalmente na rizosfera, região de maior atividade microbiológica em função da liberação de exsudatos radiculares (Kloepper; Schroth, 1978).

O gênero *Bacillus* é caracterizado por espécies formadoras de esporos, o que garante maior resistência a condições ambientais adversas, como os veranicos do Cerrado. Entre as espécies mais utilizadas em formulações agrícolas estão *B. subtilis* e *P. megaterium* (Syn. *B. megaterium*). O *B. subtilis* atua principalmente na produção de fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas, além de induzir resistência sistêmica nas plantas e inibir fitopatógenos por meio da produção de metabólitos antimicrobianos (Fernandes *et al.*, 2019). Já no caso da *P. megaterium*, essa se destaca pela sua capacidade de solubilizar P inorgânico e liberar enzimas hidrolíticas, aumentando a disponibilidade desse nutriente para as culturas agrícolas, especialmente em solos tropicais de baixa fertilidade (Silva *et al.*, 2021).

Um grupo de grande relevância agrônômica é o das bactérias do gênero *Bradyrhizobium spp.*, amplamente utilizadas na inoculação de leguminosas, como a soja. Essas bactérias estabelecem uma relação simbiótica com as raízes, formando nódulos radiculares nos quais ocorre o processo de FBN. Esse processo possibilita a conversão do N₂ atmosférico em formas assimiláveis pela planta, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Hungria *et al.*, 2015).

A associação dessas bactérias com as raízes ocorre por meio do reconhecimento entre moléculas sinalizadoras, como flavonoides liberados pela planta e fatores *Nod* sintetizados pelas bactérias, que desencadeiam a formação dos nódulos. Dentro dessas estruturas, as bactérias convertem o N₂ atmosférico em amônia (NH₃), fornecendo à planta parte significativa de sua demanda nutricional (Oliveira *et al.*, 2020).

A eficiência das BPCP no desenvolvimento vegetal pode ser observada por diferentes mecanismos: melhoria na absorção de nutrientes, produção de reguladores de crescimento, aumento da tolerância a estresses bióticos e abióticos e supressão de patógenos. Ensaios em culturas de interesse econômico, como a soja e o milho, mostram que a inoculação com *Bacillus spp.* e *Bradyrhizobium spp.* contribui significativamente para o incremento de produtividade, além de melhorar atributos do solo, como disponibilidade de P e N (Mendes *et al.*, 2019; Hungria *et al.*, 2015).

2.6 Uso de Magnésio na cultura da soja

O magnésio (Mg) desempenha papel fundamental na fisiologia da soja, participando diretamente da formação da clorofila, da ativação enzimática e do transporte e fotoassimilados, processo essenciais para o crescimento e a produtividade a cultura. Em condições de elevada demanda nutricional, a aplicação foliar desse nutriente pode complementar o suprimento radicular, favorecendo a eficiência fotossintética e o enchimento de grãos. Além disso, o Mg contribui para a manutenção do equilíbrio metabólico das plantas, aumentando sua tolerância a estresses bióticos e abióticos e melhorando o aproveitamento dos demais nutrientes absorvidos. Dessa forma, a suplementação foliar de Mg tem sido considerada uma estratégia promissora para otimizar o desempenho produtivo da soja, especialmente em sistema agrícolas intensivos e de alta produtividades (CAKMAK; YAZICI, 2010; GOU *et al.*, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características do local e histórico da área experimental

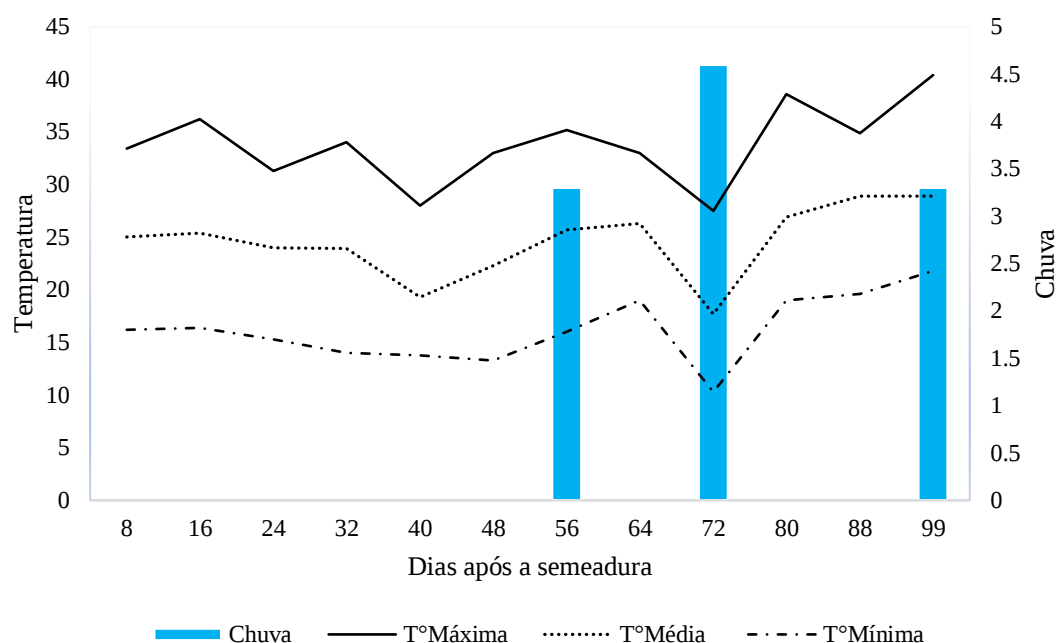
O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) – Setor de Produção Vegetal, associado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada no município de Selviria/MS, nas coordenadas geográficas 20°20'45"S e 51°24'25"W e altitude de 350 m.

De acordo com a classificação internacional de Köppen, o tipo de clima é Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Com precipitação média anual variado de 1200 até 1500 mm por ano e a temperatura média de 23,4 °C (Hernandez; Lemos-Filho; Buzetti, 1995). A área experimental trata-se de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, de textura argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Solo (Santos *et al.*, 2018). Durante o período de condução da cultura aveia preta, foram coletados os dados climáticos referentes ao período em campo (Figura 1).

A área experimental do estudo, possui irrigação por aspersão (pivô central) e um histórico de utilização de SPD há 15 anos, sempre com experimentos instalados anualmente com métodos conservacionistas (manutenção de palhada e rotação de

culturas), tendo a cultura antecessora a soja. Foi realizada coleta de solo no dia 01/10/2023, por meio de um perfurador de solo Sthil BT 45 (Figura 2), com objetivo de avaliar a fertilidade da área (Raij *et al.* 2001). Foram coletadas 20 amostras de solo na camada 0-0,20 m para obtenção de uma amostra composta, sendo alocadas em sacos plásticos, depois secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, na sequência avaliadas no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas da UNESP de Ilha Solteira, cujos resultados constam da Tabela 2.

Figura 1 - Dados meteorológicos de precipitação acumulada, temperatura média, máxima e mínima, no período de condução experimental no município de Selvíria/MS, 2024.



Fonte: Adaptado pela autora. Dados coletados do sistema de avaliação do grupo de Irrigação e Drenagem UNESP/FEIS.

Figura 2 - Coleta e amostragem de solo da área experimental no município de Selvíria/MS, 2023.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Tabela 1- Caracterização da fertilidade do solo na camada de 0,00-0,20 m, antes da semeadura da aveia preta, em área sob sistema plantio direto no município de Selvíria/MS

Camada	P _{resina}	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V
m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³							%
0-0,20	63	24	5,4	3,9	37	24	28	0	64,9	92,9	70

Nota: P: fósforo; MO: matéria orgânica; pH: potencial hidrogeniônico; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V: saturação por bases.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

3.2 Delineamento experimental e condução do projeto

A flora daninha foi dessecada na última semana de outubro e a soja foi semeada em 16 de novembro de 2023. O experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3×2, com 4 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Cada parcela experimental foi composta por 16 linhas (espaçadas de 0,50 m entrelinhas) de 10 m de comprimento, totalizando de 80 m² cada parcela. Foram avaliados 3 tratamentos com bactérias, sendo esses: *Bradyrhizobium japonicum* nas sementes (controle), combinação de *B. japonicum* nas sementes +

Bacillus subtilis + *P. megaterium* no sulco; *B. japonicum* nas sementes + *B. subtilis* + *P. megaterium* nas sementes, com ou sem a pulverização foliar do Mg em V₆ da soja.

A aplicação das bactérias seguiu a recomendação de cada produto (*Bradyrhizobium* e *Bacillus*). Para a inoculação com *B. japonicum* (estirpes Semia 5079 e 5080) via sementes, foi utilizado o inoculante líquido na dose recomendada pelo fornecedor (Soja – $2,0 \times 10^9$ UFC/mL). Para coinoculação com o *Bacillus* foi utilizado produto comercial (mistura de *B. subtilis* e *P. megaterium* na concentração de $4,0 \times 10^9$ UFC/mL) na dose recomendada pelo fabricante no tratamento de sementes (TS) e duas vezes a dose comercial para pulverização no sulco de semeadura. Para aplicação do produto a base de *Bacillus* na semente foi utilizada a dose padrão comercial de 100 mL do produto para cada 50 kg de sementes. Na aplicação via sulco, essa dose foi dobrada para 200 mL, aplicada com pulverizador costal, com volume de calda de 50 L ha⁻¹ diretamente sob sulco com vasão controlada. Os produtos comerciais utilizados foram aplicados nas sementes a sombra, momentos antes da semeadura, e para pulverização no sulco, juntamente com a operação de semeadura pela manhã.

A aplicação do Mg foi realizada no estágio V₆ da soja, realizada pela manhã (7-10 h), com trator acoplado com pulverizador de vazão de 400 L ha⁻¹. O produto utilizado para o fornecimento de Mg foi o sulfato de magnésio (MgSO₄), em uma dose padrão de 8 kg ha⁻¹ ajustada a partir de diferentes trabalhos da literatura (Rodrigues *et al.* 2020; Deliboran *et al.* 2011; Branquinho *et al.* 2017). Para adubação de semeadura foram utilizados 300 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 (N-P₂O₅-K₂O), segundo recomendação baseada na análise de solo e na metodologia de Quaggio *et al.* (2022). A colheita da soja foi realizada em 16 março de 2024, onde foram colhidas manualmente 3 linhas de 3 metros por parcela. A soja foi levada para o barracão, onde foi trilhada, pesada e determinado sua umidade. Após isso, os dados foram tabulados e os valores foram extrapolados para kg ha⁻¹ (13% de umidade- base úmida).

A semeadura do experimento de aveia preta (Figura 3) foi realizada sob a palhada da soja, no dia 11/06/2024, mecanicamente com uso de semeadora-adubadora com mecanismo sulcador disco duplo para SPD, à uma profundidade de aproximadamente 0,03 m, com espaçamento de 0,34 m entre linhas. A densidade de semeadura foi de 80 sementes por m² para aveia preta, cultivar EMBRAPA – 29 (Garoa), com pureza de 98% e germinação de 80%, sem adubação de semeadura.

Como adubação de cobertura, no estágio de perfilhamento da aveia aplicou-se 250 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20. O delineamento experimental foi o mesmo da soja em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3×2, com 4 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais, a fim de testar o efeito residual dos tratamentos aplicados na cultura da soja antecessora.

Figura 3 - Semeadura da aveia preta sob palhada de soja em solo sob SPD consolidado no município de Selvíria/MS, 2024.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As avaliações agronômicas e a colheita da aveia preta foram realizadas em 14/09/2024, seguindo protocolo de amostragem padronizado (Figura 4). As plantas inteiras (parte aérea e raízes) foram coletadas em área de 1 m², com média de três pontos amostrais por parcela. O material foi posteriormente segmentado entre parte aérea (PA) e sistema radicular (SR). As raízes foram lavadas em água corrente e secas a sombra, enquanto que foi realizado a contagem do número de plantas para obtenção da população por m² e os resultados foram posteriormente convertidos para plantas ha⁻¹. Tanto as raízes quanto a parte aérea coletada foram pesadas para determinação da produção de matéria fresca (MF) por metro quadrado (m²). Para PA coletada, foram feitas subamostras do material para alocação na estufa. Em seguida, o material foi embalado em sacos de papel identificados e seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Após a secagem, realizou-se nova pesagem para quantificar a produção de matéria seca (MS) da cultura, com os valores convertidos para kg ha⁻¹.

Figura 4. Coleta das plantas, parte aérea e raízes; lavagem; pesagem da matéria fresca da cultura da aveia preta no município de Selvíria/MS, 2024.

Figura 4 - Coleta das plantas, parte aérea e raízes; lavagem; pesagem da matéria fresca da cultura da aveia preta no município de Selvíria/MS, 2024.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

O material seco foi moído e enviado ao Laboratório de Nutrição de Plantas da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (SP) para análise química de macro e micronutrientes (Figura 5), conforme o método de Malavolta *et al.* (1997). Com base nos teores de nutrientes por espécie e parte da planta, foi calculado o acúmulo total de nutrientes na MS, considerando a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e raízes da aveia preta.

Figura 5 - Análise química de macro e micronutrientes, conforme o método de Malavolta *et al.* (1997).



Fonte: Elaborado pela própria autora.

3.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram tabulados e analisados com o auxílio do software R versão 4.3.2 (*Development Core Team*, 2024). Os resultados foram submetidos a análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilk. Constatado resultado significativo pelo teste F, para a presença do inoculante comercial e aplicação de Mg, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O pacote utilizado para realização da análise estatística foi o “ExpeDes.pt” no software R.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à produtividade da soja (PGS) e aos parâmetros agronômicos da aveia preta estão apresentados na Tabela 3. De modo geral, verificou-se efeito significativo da aplicação foliar de magnésio (Mg) sobre a PGS, enquanto a inoculação bacteriana apresentou influência marcante sobre as variáveis relacionadas ao crescimento e acúmulo de biomassa da aveia preta em sucessão.

A PGS foi superior no tratamento com aplicação de Mg, alcançando 3.729 kg ha⁻¹ na presença do nutriente, representando incremento de aproximadamente 40%. Esse resultado confirma a importância do Mg suplementar na fotossíntese e na translocação de fotoassimilados, uma vez que é componente essencial da clorofila e participa ativamente da formação de ATP e da assimilação de C (Rodrigo *et al.*, 2020; Branquinho *et al.*, 2017). Além disso, o aumento na PGS reflete o adequado manejo nutricional no sistema de SPD, que favorece a disponibilidade e absorção de nutrientes, conforme observado por Bayer *et al.* (2006) e Franchini *et al.* (2012).

Com relação à aveia preta cultivada em sucessão, observou-se efeito significativo da inoculação bacteriana sobre todas as variáveis avaliadas. O tratamento com inoculação nas sementes combinando *Bradyrhizobium japonicum*, *B. subtilis* e *P. magaterium*, apresentou os maiores valores de população (282.700 plantas ha⁻¹), massa verde da parte aérea (5.531 kg ha⁻¹), massa seca da parte aérea (2.243 kg ha⁻¹), massa verde da raiz (1.167 kg ha⁻¹) e massa seca da raiz (631 kg ha⁻¹). Esses resultados indicam que o efeito residual das bactérias solubilizadoras de fosfato (PO₄⁻³) e promotores de crescimento foi determinante para melhor desempenho da aveia preta em sucessão à soja.

O gênero *Bacillus*, especialmente *B. subtilis* e *P. megaterium*, é reconhecido por sua capacidade de solubilizar P e produzir fitormônios, como auxinas e giberelinas, (que estimulam o desenvolvimento radicular e aumentam a absorção de nutrientes (Fernandes *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Assim, o incremento observado na biomassa da aveia preta pode estar associado à liberação residual de P no solo e à manutenção da atividade microbiana após o cultivo da soja. Além disso, a coinoculação nas sementes possibilita maior colonização rizosférica, o que se refletiu em maior produção de matéria seca total (MST) (2.874 kg ha⁻¹).

	Soja		Aveia Preta					
	PGS	POP	MFPA	MSPA	MFR	MSR	MFT	MST
Tratamentos	kg ha ⁻¹	Plantas ha ⁻¹ x 1000	kg ha ⁻¹					
Pulverização (P)								
sem Mg	2700 b	210,80	4349	1775	867	445	5262	2277
com Mg	3792 a	207,90	4629	1914	914	526	5495	2383
Inoculação (I)								
controle	3056	164,50 b	3601 b	1451 b	601 c	321 b	4504 b	1955 b
sulco	3285	179,90 b	4334 ab	1839 ab	903 b	504 a	4935 b	2161 b
semente	3397	282,70 a	5531 a	2243 a	1167 a	631 a	6698 a	2874 a
Pr > Fc								
Pulverização (P)	0,001*	0,14 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,66 ^{ns}
Inoculação (I)	0,44 ^{ns}	0,001*	0,02*	0,02*	0,0001*	0,0001*	0,007*	0,009*
P × I	0,30 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,75 ^{ns}
Média Geral	3246	209,00	4489	1844	890	485	5379	2330
DMS	462,18	5,60	1590	647	224	144	1637	703
CV (%)	16,36	18,22	22,74	22,48	19,69	23,28	23,83	23,62

*significativo $p \leq 0,05$; ^{ns} não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: *B. japonicum*; sulco: *Bradyrhizobium japonicum* + combinação de *B. subtilis* e *P. megaterium* no sulco; semente: *B. japonicum* + combinação *B. subtilis* e *P. megaterium* nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância; CV: coeficiente de variação; DMS: diferença mínima significativa..

Fonte: Dados da pesquisa da autora.

O tratamento com aplicação das bactérias no sulco também apresentou desempenho superior ao controle, embora em menor magnitude, evidenciando que os métodos de inoculação influenciam a eficiência do estabelecimento microbiano e, consequentemente, o aproveitamento dos nutrientes residuais. Esse comportamento é semelhante ao descrito por Hungria *et al.* (2015), que observaram maior simbiose e acúmulo de biomassa quando a inoculação foi realizada diretamente nas sementes, proporcionando contato mais efetivo entre os microrganismos e o sistema radicular. Sendo assim, os resultados desse estudo mostram que o uso desse gênero de BPCP, tem sua maior eficiência na aplicação via semente da soja. Esse resultado corrobora com o de Fiuza *et al.* (2022), que trabalhando com essas BPCP também constatou esse comportamento. Solos em SPD consolidado tendem a ter um alto aporte de palhada no solo, o que confere uma barreira física para aplicação dos microrganismos no sulco.

A ausência de interação significativa entre os fatores ($P \times I$) para as variáveis avaliadas indica que o efeito das bactérias foi independente da aplicação foliar de Mg. No entanto, a tendência de maiores valores médios na presença de Mg sugere possível sinergia entre o nutriente e os microrganismos, visto que o Mg atua como cofator enzimático em processos metabólicos associados à fotossíntese e à absorção de P (Carvalho *et al.*, 2017) ou pelo maior acúmulo de Mg e nutrientes na soja com o Mg foliar. De modo geral, a não constatação de resultados para interação e para o uso de Mg está ligada ao bom manejo do solo em SPD consolidado. O solo em questão tem uma alta disponibilidade de Mg, proveniente do equilíbrio da fertilidade do solo, o que atendeu a demanda da cultura mesmo nas áreas sem o efeito residual da aplicação foliar na soja.

De maneira geral, os resultados demonstram que o efeito residual das bactérias solubilizadoras de P aplicadas na soja exerceram influência positiva sobre a produtividade e o desenvolvimento da aveia preta na rotação, confirmando o papel desses microrganismos na melhoria das propriedades químicas e biológicas do solo. Esses achados estão em concordância com estudos que relatam que sistemas com inoculação microbiana e adubação verde em SPD proporcionam maior acúmulo de biomassa e sustentabilidade produtiva (Fernandes *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023). Portanto, a adoção de práticas integradas, como a coinoculação bacteriana e o manejo nutricional com Mg, associadas ao SPD, representa uma estratégia eficaz

para otimizar o desempenho das culturas e promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tropicais.

Os resultados referentes aos acúmulos de macro e micronutrientes na parte aérea da aveia preta estão apresentados na Tabela 4, considerando o efeito residual das bactérias solubilizadoras de PO_4^{-3} e da aplicação foliar de Mg sobre a cultura antecessora de soja. De forma geral, observou-se que os tratamentos com inoculação bacteriana promoveram incrementos significativos nas concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, em comparação ao tratamento controle. Para os micronutrientes o destaque foi a inoculação das bactérias via sementes.

Tabela 3 - Resultados para os acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) magnésio (Mg), enxofre (S-SO₄-), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), na massa seca da aveia preta em função das bactérias e da aplicação foliar de Mg Mg na soja antecessora, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S-SO ₄ ⁻	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----					-----g ha ⁻¹ -----				
Pulverização (P)										
sem Mg	41,10	7,78	30,21	7,53	3,71	9,82	74,0	3829	438,0	65,0
com Mg	45,27	8,24	31,72	7,64	4,30	10,68	76,0	4125	516,0	68,0
Inoculação (I)										
controle	34,61 b	3,88 c	21,60 c	6,78 b	3,36 b	6,25 b	51,0 b	2260 c	320,0 b	55,0 b
sulco	39,62 b	6,27 b	30,50 b	7,06 b	4,00 ab	11,02 a	71,0 b	3660 b	410,0 b	60,0 b
semente	55,32 a	13,88 a	40,82 a	8,91 a	4,66 a	13,49 a	100,0 a	6000 a	690,0 a	85,0a
Pr > Fc										
Pulverização (P)	0,31 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,65 ^{ns}
Inoculação (I)	0,001*	0,001*	0,0001*	0,01*	0,03*	0,001*	0,001*	0,001*	0,001*	0,001*
P × I	0,62 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,56 ^{ns}
Média Geral	43,18	8,02	30,96	7,58	4,00	10,25	76,0	3,98	480,0	67,0
DMS	12,08	1,84	8,28	1,74	1,15	2,63	20,0	1180	170,0	19,0
CV (%)	21,91	17,99	20,95	18,02	22,53	20,12	25,00	23,35	25,76	22,89

*significativo $p \leq 0,05$; ^{ns} não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: *B. japonicum*; sulco: *Bradyrhizobium japonicum* + combinação de *B. subtilis* e *P. megaterium* no sulco; semente: *B. japonicum* + combinação *B. subtilis* e *P. megaterium* nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância; CV: coeficiente de variação; DMS: diferença mínima significativa.

Fonte: Dados da pesquisa da autora.

A inoculação de bactérias promotoras de crescimento, especialmente aquelas dos gêneros *Bacillus* e *Bradyrhizobium*, contribuiu para o aumento do teor de N, o que pode ser explicado pela ação indireta dessas bactérias na FBN e na ciclagem de nutrientes. Segundo Hungria *et al.* (2015), a simbiose entre *Bradyrhizobium spp.* e leguminosas promove o maior acúmulo de N no sistema produtivo, resultando em efeito residual positivo sobre as culturas subsequentes. No presente estudo, a maior disponibilidade de N observada na aveia indica que parte do nutriente fixado pela soja permaneceu no solo e foi posteriormente aproveitado pela gramínea.

O aumento nos teores de P nos tratamentos com inoculação também evidencia a eficiência das bactérias solubilizadoras de PO_4^{3-} , como *P. megaterium* e *Bacillus subtilis*, conhecidas pela capacidade de liberar o P de formas insolúveis, tornando-o disponível para as plantas (Silva *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2019). Esse efeito é particularmente importante em solos tropicais, como os de Cerrado, onde grande parte do P encontra-se retido em complexos de ferro e alumínio, limitando sua disponibilidade. Assim, o aumento do P na parte aérea da aveia preta reflete não apenas o efeito residual da inoculação, mas também a melhoria das condições químicas do solo após o cultivo da soja.

Com relação ao K e ao Mg, os maiores teores foram observado no tratamento com coinoculação das BPCP via semente.. Esse resultado sugere possível sinergia entre o elemento e a atividade microbiana, uma vez que o Mg atua como cofator enzimático em diversas reações metabólicas e pode favorecer a absorção de outros nutrientes (Rodrigues *et al.*, 2020). O aumento no teor de Mg na parte aérea também demonstra a eficiência do uso de BPCP na cultura da soja, mostrando que esse efeito perdura em solos sob SPD de longa duração.

Os teores de Ca também apresentaram elevação significativa nos tratamentos coinoculados via semente, o que pode estar relacionado ao melhor desenvolvimento do sistema radicular da aveia (SRA), promovido pela ação de *Bacillus subtilis* e *P. megaterium*, que estimulam a produção de fitormônios, como auxinas e giberilinas (Fernandes *et al.*, 2019). Plantas com raízes mais vigorosas exploram maior volume de solo e, conseqüentemente, absorvem mais nutrientes, o que contribui para a formação de tecidos estruturais mais resistentes e saudáveis. As BPCP do gênero *B. subtilis* e *P. megaterium* também atuam na solubilização de S-SO_4^- e de

micronutrientes (Fernandes et al., 2019; Silva et al., 2021), o que beneficia o conteúdo mineral na planta e explica os resultados nutricionais obtidos.

De modo geral, observa-se que a inoculação bacteriana, , proporcionou melhorias significativas nos teores foliares de nutrientes, refletindo maior eficiência fisiológica e potencial produtivo da aveia preta cultivada em sucessão à soja. Esses resultados corroboram com os de Silva et al. (2023) e Fernandes et al. (2024), que também constataram que sistemas integrados de manejo biológico e adubação equilibrada favorecem a sustentabilidade e a produtividade das culturas em SPD.

Dessa forma, os resultados (Tabela 4) demonstram que o efeito residual das bactérias solubilizadoras de fosfato e promotoras de crescimento não apenas influenciam o acúmulo de biomassa (Tabela 3), mas também melhoram o estado nutricional da aveia preta. Essa sinergia entre microbiologia do solo e manejo mineral reforça a importância da inoculação e da nutrição equilibrada como ferramentas para otimizar a eficiência dos sistemas agrícolas tropicais

Portanto, pode-se afirmar que a adoção de bactérias solubilizadoras de PO_4^{3-} e BPCP , , é uma prática eficiente e sustentável, capaz de melhorar as condições químicas, físicas e biológicas do solo, promovendo ganhos agronômicos e ambientais. Esses resultados reforçam a importância de práticas integradas de manejo biológico e mineral na construção de sistemas produtivos resilientes e sustentáveis, contribuindo para a consolidação da agricultura de base ecológica e de alta eficiência no Cerrado brasileiro.

5. CONCLUSÃO

O efeito residual das bactérias solubilizadoras de PO_4^{3-} e promotoras de crescimento aplicadas na cultura da soja exerceram influência positiva sobre o desenvolvimento e a produtividade da aveia preta cultivada em sucessão, no SPD. A inoculação com bactérias dos gêneros *Bradyrhizobium*, *Bacillus subtilis* e *P. megaterium* via sementes promoveram incrementos nos componentes de crescimento da aveia preta, refletido em maior população de plantas, maior acúmulo de MFPA e MSPA e MSR, e, conseqüentemente, maior MST. Esse desempenho indica a ação benéfica das bactérias na solubilização de P, produção de fitormônios e estímulo do sistema radicular, resultando em maior aproveitamento dos nutrientes remanescentes no solo após o cultivo da soja. Pelo maior acúmulo de nutrientes na parte aérea da aveia preta o uso de inoculantes bacterianos em associação com o manejo adequado de nutrientes na soja se mostra uma estratégia sustentável para otimizar a eficiência dos sistemas de rotação de culturas e aumentar a produtividade agrícola em solos tropicais sob PD.

6. BIBLIOGRAFIA

ASSMANN, T. S.; ASSMANN, A. L.; ASSMANN, J. M.; SOARES, A. B.; BORTOLLI, M. A. Produção de gado de corte e de pastagem de aveia em sistema de integração lavoura-pecuária em presença e ausência de trevo e nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, n. 7, p. 1387–1397, 2010.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, v. 86, p. 237–245, 2006.

BORTOLINI, C. G.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 4, p. 897–903, 2000.

BORTOLUZZI, E. C.; ELTZ, F. L. F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 2, p. 449–457, 2000.

BRANQUINHO, I. D.; MOURA, E. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Magnésio na fisiologia e nutrição de plantas: funções e interações nutricionais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, n. 5, p. 1–14, 2017.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops, Peachtree Corners*, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; AIDAR, S. T. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: usos e perspectivas. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2016/2017*. Brasília: CONAB, 2017.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; LOPES, M. T. G. Soil quality under different tillage systems in crop-livestock integration. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 10, p. 1009–1019, 2015.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. *Plantas para adubação verde de inverno*. Londrina: IAPAR, 1992. 80 p. (IAPAR Circular, 73).

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.

DELIBORAN, L. C.; SILVA, V. R.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A. Qualidade física do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 1, p. 153–162, 2011.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, v. 35, p. 1–21, 1994.

EMBRAPA. *Plano Diretor da Embrapa*. Brasília: EMBRAPA, 2020.

FEBRAPDP (Org.). *Evolução da área de plantio direto no Brasil*. Londrina: FEBRAPDP, 2021.

FERNANDES, A. J.; SOUSA, R. M.; GOMES, C. A. *Bacillus subtilis* como bactéria promotora de crescimento de plantas: mecanismos e aplicações agrícolas. *Revista Brasileira de Agrociência*, v. 25, n. 2, p. 112–121, 2019.

FERNANDES, J. L.; MENEZES, R. S. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, N. R. Cover cropping and no-tillage enhance soil carbon sequestration and maize productivity in Southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 242, p. 106–118, 2024.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E.; LAZARINI, E. Effects of no-tillage on soybean yield and soil fertility in Paraná State, Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 92, p. 110–120, 2007.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. *Field Crops Research*, v. 137, p. 178–185, 2012.

GUO, W.; NAZIM, H.; LIANG, Z.; YANG, D. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. *The Crop Journal*, Beijing, v. 4, n. 2, p. 83-91, 2016.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Alternativas de inoculação com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* em soja: avanços e perspectivas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 9, p. 791–815, 2015.

KLOEPPER, J. W.; SCHROTH, M. N. Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria*, p. 879–882, 1978.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, p. 133–146, 2009.

MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 37, n. 5, p. 634–663, 2019.

OLIVEIRA, D. P.; SANTOS, F. M.; COSTA, M. R. Mecanismos de associação simbiótica entre *Bradyrhizobium* spp. e leguminosas: avanços recentes. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 43, n. 3, p. 56–68, 2020.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS JÚNIOR, D.; CANTARELLA, H.; BOARETTO, R. M. *Calagem e adubação com magnésio em sistemas de produção agrícola*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 2022.

RAIJ, B. V. et al. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. (Boletim técnico, 100).

RODRIGUES, M.; PEREIRA, W. L. M.; LIMA, M. A. Influência do magnésio na fotossíntese e produtividade da soja. *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 2, p. 275–286, 2020.

SGARBOSSA, J.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F.; NARDINI, C.; CRISTO, E.; OLIVEIRA, D.; CARON, B. O. Morfologia, crescimento e produtividade da aveia preta cultivada

em sistemas agroflorestais no sul do Brasil. *Agricultural Systems*, v. 184, p. 102911, 2020.

SILVA, E. M. Tudo o que você precisa saber sobre plantio direto. *Blog Aegro*, 2023.

SILVA, R. A.; SOUZA, F. R.; ALMEIDA, L. F.; OLIVEIRA, C. A. Cover crops to improve soybean productivity in the Brazilian Cerrado. *Agronomy*, v. 15, n. 5, p. 1083, 2023.

SILVA, V. F.; LIMA, J. A.; BARBOSA, R. M. *Bacillus megaterium* como agente solubilizador de fósforo e promotor de crescimento vegetal. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 4, p. 2450–2462, 2021.

SOUZA, P. H.; LOPES, M. A.; CASTRO, J. G.; BARROS, D. F. Legume-based cover crop mixtures maximize biomass and nitrogen inputs in irrigated fruit systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 123, p. 159–172, 2022.

VESSER, M.; PEREIRA, L. A.; CARDOSO, R. P. Bactérias promotoras de crescimento de plantas: contribuições para a agricultura sustentável. *Ciência Rural*, v. 50, n. 7, p. e20190654, 2020.

