

**UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**SINERGISMO ENTRE ADUBAÇÃO FOSFATADA E**  
**MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES PARA USO EFICIENTE DO**  
**FÓSFORO EM SUCESSÃO SOJA/MILHO**

**THAYS MENDONÇA OLIVEIRA**  
*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS – BRASIL**  
**2025**

**THAYS MENDONÇA OLIVEIRA**

**SINERGISMO ENTRE ADUBAÇÃO FOSFATADA E MICRORGANISMOS  
SOLUBILIZADORES PARA USO EFICIENTE DO FÓSFORO EM SUCESSÃO  
SOJA/MILHO**

**Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae***

**RIO VERDE  
GOIÁS - BRASIL**

**2025**

Universidade de Rio Verde  
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

O52s Oliveira, Thays Mendonça

Sinergismo entre adubação fosfatada e microrganismos solubilizadores para uso eficiente do fósforo em sucessão soja/milho. / Thays Mendonça Oliveira. — 2025.

44 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão.

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2025.

Inclui lista de figuras.

1. *Bacillus subtilis*. 2. Monoamônio fosfato. 3. *Priestia megaterium*. 4. Atividade Enzimática do solo. I. Cantão, Veridiana Cardozo Gonçalves. II. Título.

CDD: 631.85

Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

THAYS MENDONÇA OLIVEIRA

**SINERGISMO ENTRE ADUBAÇÃO FOSFATADA E MICRORGANISMOS  
SOLUBILIZADORES PARA USO EFICIENTE DO FÓSFORO EM SUCESSÃO  
SOJA/MILHO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

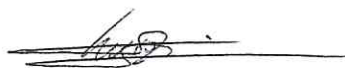
APROVAÇÃO: 27 de junho de 2025



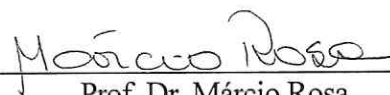
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão  
Presidente da Banca Examinadora  
Membro – PPGPV/UniRV



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Juliana Silva Rodrigues Cabral  
Coorientadora  
Membro – FA/UniRV



Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza  
Membro Externo – IFGoiano/Rio Verde



Prof. Dr. Márcio Rosa  
Membro – PPGPV/UniRV



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Jessyca Adriana Gomes Florêncio da Silva  
Membro - PPGPV/UniRV

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que se manteve sempre presente em minha vida, me fortalecendo e me guiando durante essa trajetória.

Aos meus pais, Alessandra Borges Mendonça Oliveira e Rony Bel Franck de Oliveira por se fazerem presentes em minha vida, me apoiarem e contribuírem para a finalização desta etapa.

A minha irmã, Thallyta Mendonça Oliveira e a minha avó, Laides Borges Mendonça, por todo suporte e apoio durante este período.

A minha orientadora, Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, por toda confiança depositada e por todo incentivo, tornando essa vitória realidade.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de aprendizado e crescimento tanto profissional como pessoal.

Ao curso de Mestrado em Produção Vegetal da Universidade de Rio Verde (UniRV).

À minha orientadora, Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão por sua orientação firme, dedicação incansável e incentivo constante ao longo de toda a elaboração desta dissertação. Sua experiência, paciência e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu coorientadores, Dr. Ricardo de Castro Dias e Dra. Juliana Silva Rodrigues Cabral, pelo seu tempo concedido a me ajudar durante toda minha caminhada no mestrado.

Aos Doutores Jéssyca Adriana Florêncio Gomes da Silva e Augusto Matias de Oliveira, pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, Alessandra Borges Mendonça Oliveira e Rony Bel Franck de Oliveira, obrigada por todo amor, apoio incondicional e ensinamentos que me acompanharam em cada etapa da vida. Foi com o exemplo de vocês de honestidade, esforço e dedicação que aprendi o valor da educação e da perseverança.

À minha irmã, Thallyta Mendonça Oliveira e meu cunhado Eduardo Bueno de Moraes, agradeço por serem meu apoio constante. A amizade de vocês e parceria tornaram este caminho mais leve e significativo.

À minha querida avó, Laides Borges Mendonça, minha profunda gratidão por todo o amor, pelas orações e pela fé inabalável em mim. Sua força, ternura e exemplo de vida foram uma inspiração diária ao longo desta jornada.

Aos membros da banca examinadora deste trabalho, por aceitarem o convite em contribuir com o aperfeiçoamento da redação do presente estudo.

Aos meus colegas da Universidade, Wanessa Thais, Mariana Andrade, Emerson, Maria Eduarda, Laryssa, Murilo Assis, Eduardo, Izaon, Joaquim e a todos os alunos Veri's Team que de alguma forma ajudaram com o experimento.

Aos colaboradores do laboratório multiusuários, Eduardo e Rodrigo, por toda ajuda com as análises do experimento.

A todos os Docentes da Universidade de Rio Verde, que agregou meus conhecimentos durante o período em que fui discente do PPGPV.

Ao IGA (Instituto Goiano de Agricultura) por ter me dado a oportunidade de conduzir o experimento.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido.

A todos os meus amigos que considero íntimos e próximos, que estiveram comigo, intercedendo por meio de suas orações e me dando apoio e motivação nos momentos que precisei.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Soja e Milho.....	2
2.2 Sistema do Fósforo: solo e planta.....	3
2.3 Microrganismos solubilizadores de fósforo e atividades enzimáticas.....	4
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	6
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
4.1 Resultados.....	9
4.2 Discussão.....	21
5 CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Adubação fosfatada e microrganismos sobre número de vagens por planta (A), grãos por vagem (B) e peso de mil grãos (C) em soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO.....	10
FIGURA 2	Adubação fosfatada e microrganismos sobre a clorofila (A), o teor de fósforo foliar (B) e teor de fósforo nos grãos (C) em soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO.....	11
FIGURA 3	Adubação fosfatada e microrganismos sobre a produtividade da soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO.....	12
FIGURA 4	Adubação fosfatada e microrganismos sobre as respostas fotoquímicas da soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (A) taxa de fechamento dos centros de reação do FS II (M0); (B) rendimento quântico máximo da fotoquímica primária ( $\phi P_0$ ); (C) probabilidade de um éxciton capturado transferir um elétron além da quinona A ( $\psi E_0$ ); (D) rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo $t = 0$ ( $\phi E_0$ ); (E) rendimento quântico de dissipação de energia ( $\phi D_0$ ); (F) índice de desempenho fotoquímico do PSII (PIABS); (G) fluxo de absorção específico para o centro de reação (ABS/RC); (H) taxa máxima de captura de excitação do PSII (TR0/RC); (I) fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no tempo $t=0$ (ET0/RC); (J) fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (DI0/RC).....	13
FIGURA 5	Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo disponível (A) e atividade bioquímica do solo no cultivo de soja em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (B) $\beta$ -glicosidade; (C) arilsulfatase; (D) Fosfatase ácida; (E) Fosfatase alcalina e (F) Glomalina (PSRG-FE).....	15
FIGURA 6	Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo foliar (A) e a produtividade (B) em milho segunda safra cultivado em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO.....	17

FIGURA 7 Adubação fosfatada e microrganismos sobre as respostas fotoquímicas de milho segunda safra cultivado em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (A) taxa de fechamento dos centros de reação do FS II (M0); (B) rendimento quântico máximo da fotoquímica primária ( $\phi P_0$ ); (C) probabilidade de um éxciton capturado transferir um elétron além da quinona A ( $\psi E_0$ ); (D) rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo  $t = 0$  ( $\phi E_0$ ); (E) rendimento quântico de dissipação de energia ( $\phi D_0$ ); (F) índice de desempenho fotoquímico do PSII (PIABS); (G) fluxo de absorção específico para o centro de reação (ABS/RC); (H) taxa máxima de captura de excitação do PSII (TR0/RC); (I) fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no tempo  $t=0$  (ET0/RC); (J) fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (DI0/RC)..... 18

FIGURA 8 Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo disponível (A) e atividade bioquímica do solo no cultivo de milho segunda safra em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (B)  $\beta$ -glicosidade; (C) arilsulfatase; (D) Fosfatase ácida; (E) Fosfatase alcalina e (F) Glomalina (PSRG-FE)..... 19

## RESUMO

OLIVEIRA, T. M., UniRV - Universidade de Rio Verde, junho de 2025. **Sinergismo entre adubação fosfatada e microrganismos solubilizadores para uso eficiente do fósforo em sucessão soja/milho.** Orientador: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão. Co-orientadores: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias; Dra. Juliana Silva Rodrigues Cabral

O fósforo (P) é um nutriente fundamental para desenvolvimento das plantas, sendo culturas como soja e milho altamente responsivas à sua aplicação. Ele atua em processos vitais como fotossíntese, respiração, formação de raízes e frutos. Solos brasileiros, especialmente os Latossolos, possuem baixa disponibilidade de P devido à forte ligação com óxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e a formação de precipitados com Fe, Al e cálcio. Nesse contexto, microrganismos solubilizadores de P têm se mostrado alternativas promissoras. Eles transformam o fósforo insolúvel em formas disponíveis para as plantas. Assim, contribuem diretamente para a ciclagem e disponibilidade de P no solo. Portanto, o trabalho teve como objetivo avaliar a adubação fosfatada associada a microrganismos solubilizadores visando uso eficiente do fósforo para cultivos sustentáveis de soja e milho. O trabalho foi conduzido em campo, no Instituto Goiano de Agricultura- IGA. Adotou-se o delineamento de blocos casualizados com 4 repetições em parcelas de 25 m<sup>2</sup>. As culturas instaladas no campo foram soja e milho em sistema de sucessão. Os tratamentos foram compostos pelas doses de 0,0; 19,5; 39,0; 58,5 e 78,0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, associadas a 150 mL ha<sup>-1</sup> de *Bacillus subtilis*+ *Priestia megaterium*. Além destes, foi adotado um tratamento controle absoluto, sem adição de P e microrganismos. As doses representam aplicações de 0; 25; 50; 75 e 100% da recomendação para P usando-se o fertilizante monoamônio fosfato (MAP). Foram avaliados na cultura da soja: número de vagem por planta, número de grãos por vagem, peso de mil grãos, fluorescência da clorofila *a*, teores de P foliares e grãos, produtividade, processos fotoquímicos e análises bioquímicas (glomalina, β-glicosidase, aril-sulfatase e fosfatases ácida e alcalina), na cultura do milho, foram avaliados: teor de P foliar, produtividade, processos fotoquímicos e análises bioquímicas (glomalina, β-glicosidase, aril-sulfatase e fosfatases ácida e alcalina). Através dos resultados obtidos, foi possível observar que a associação entre doses reduzidas de fertilizante fosfatado (MAP) e os microrganismos aumenta a disponibilidade e a eficiência de uso do fósforo no solo, favorecendo sua absorção pelas culturas de soja e milho. A prática também melhora a produtividade, os níveis foliares de fósforo, o desempenho fotoquímico e a atividade biológica do solo, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo em Latossolos do Cerrado.

**Palavras-chave:** *Bacillus subtilis*; Monoamônio fosfato; *Priestia megaterium*. Atividade Enzimática do solo

## ABSTRACT

OLIVEIRA, T. M, UniRV - University of Rio Verde, Jun 2025. **Synergism between phosphate fertilization and solubilizing microorganisms for efficient use of phosphorus in soybean/corn succession.** Advisor: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão. Co-Advisor: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias; Dra. Juliana Silva Rodrigues Cabral.

Phosphorus (P) is a fundamental nutrient for plant development, with crops such as soybeans and corn being highly responsive to its application. It acts in compound processes such as photosynthesis, respiration, root and fruit formation. Brazilian soils, especially Latosols, have low P availability due to the strong bond with iron (Fe) and aluminum (Al) oxides and the formation of precipitates with Fe, Al and calcium. In this context, P solubilizing microorganisms present promising alternatives. They transform insoluble phosphorus into forms available to plants, thus providing direct cycling and availability of P in the soil. Therefore, the study aimed to evaluate phosphate fertilization associated with solubilizing microorganisms that occur in the efficient use of phosphorus for sustainable soybean and corn crops. The work was continuous in the field, at the Goiano Institute of Agriculture - IGA. A randomized block design with 4 replications in 28 m<sup>2</sup> plots was adopted. The crops planted in the field were soybean and corn in a succession system. The treatments consisted of doses of 0.0; 19.5; 39.0; 58.5 and 78.0 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, associated with 150 mL ha<sup>-1</sup> of *Bacillus subtilis* + *Priestia megaterium*. In addition, a treatment with absolute control was adopted, without the addition of P and microorganisms. The doses represent applications of 0; 25; 50; 75 and 100% of the recommendation for P using the monoammonium phosphate (MAP) fertilizer. The following were evaluated in soybean crops: number of grains per plant, number of grains per pod, thousand-grain weight, chlorophyll *a* fluorescence, leaf and grain P levels, productivity, photochemical processes and biochemical analyses (glomalin, β-glucosidase, arylsulfatase and acid and alkaline phosphatases); in corn crops, the following were evaluated: leaf P level, productivity, photochemical processes and biochemical analyses (glomalin, β-glucosidase, arylsulfatase and acid and alkaline phosphatases). Through the results obtained, it was possible to observe that the association between reduced doses of phosphate fertilizer (MAP) and microorganisms increases the availability and efficiency of phosphorus use in the soil, favoring its absorption by soybean and corn crops. The practice also improved productivity, foliar phosphorus levels, photochemical performance and soil biological activity, contributing to the sustainability of the production system in Cerrado Oxisols.

**Keywords:** *Bacillus subtilis*; Monoammonium phosphate; *Priestia megaterium*; soil enzyme activity.

# 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) e o milho (*Zea mays* L.) desempenham papéis cruciais na agricultura brasileira, contribuindo significativamente para a produção de grãos, a segurança alimentar global e a economia nacional (CONAB, 2024). A prática do sistema de cultivo soja-milho é amplamente adotada, promovendo uma utilização mais eficiente das terras agrícolas, aumentando a produtividade e promovendo a sustentabilidade agrícola (BALBINOT JUNIOR et al., 2018).

Um elemento essencial para a produção dessas culturas é o fósforo (P), que é vital para o crescimento das plantas. O fósforo desempenha funções fundamentais na fotossíntese, respiração, transporte de energia e na formação de raízes, flores e frutos (MARSCHNER, 2012). A deficiência de fósforo manifesta-se inicialmente pelo escurecimento das folhas, seguido de amarelecimento, começando nas bordas e progredindo para o centro, especialmente durante a floração e o enchimento dos grãos (ROSOLEM et al., 2006). Tal deficiência pode resultar em crescimento reduzido, maturação precoce, menor produtividade e grãos de qualidade inferior (SÁ et al., 2017).

Nos solos brasileiros, a disponibilidade de fósforo é frequentemente limitada, particularmente em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, que possuem alta capacidade de fixação de fósforo devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (NOVOTNY et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021). Conseqüentemente, os agricultores recorrem ao uso intensivo de fertilizantes fosfatados, o que acarreta custos elevados e potenciais impactos ambientais, como a poluição hídrica e a eutrofização (WITHERS et al., 2015).

Para aumentar a eficiência e a sustentabilidade do uso do fósforo, se torna importante explorar alternativas viáveis. Uma dessas alternativas é a utilização de microrganismos solubilizadores de fósforo (MSP), que têm a capacidade de converter o fósforo insolúvel do solo em formas assimiláveis pelas plantas, por meio da produção de ácidos orgânicos, sideróforos e enzimas fosfatases (OWEN et al., 2015; RODRIGUES; SILVA, 2021). Esses microrganismos, que incluem bactérias e fungos, são fundamentais para o ciclo do fósforo no solo, promovendo o crescimento das plantas (KALYANI et al., 2021).

A inoculação com microrganismos solubilizadores de fosfato pode promover o crescimento das plantas e aumentar a produtividade das culturas, além de reduzir a necessidade de fertilizantes minerais (ADELUPO et al., 2020). Contudo, o êxito dessa prática é condicionado por diversos fatores, incluindo a quantidade de fertilizante aplicada, o tipo de solo

e os microrganismos selecionados (PEREIRA et al., 2023). Embora existam estudos que investigam separadamente o efeito das doses de fósforo ou da inoculação com MSP em culturas agrícolas, há uma escassez de pesquisas sobre a interação desses dois fatores em sistemas integrados, como o de soja-milho. Essa lacuna de conhecimento dificulta a implementação de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis.

No Brasil, as culturas de soja e milho são representadas como sendo uma das principais culturas, sendo cultivada em diversas regiões. No entanto, o uso ineficiente de fósforo nas áreas agrícolas constitui um desafio significativo para os produtores dessas culturas. Assim, a busca por fontes alternativas e sustentáveis de fósforo, aliada ao uso de MSP, emerge como uma estratégia promissora para aumentar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção de soja e milho (VASSILEV et al., 2020; SANTOS et al., 2021).

Partindo-se das hipóteses que a associação entre *Bacillus subtilis* e *Priestia megaterium* (*Bacillus megaterium*) com o fertilizante monoamônio fosfato (MAP) promove o aumento dos teores de fósforo nos tecidos vegetais e maior produtividade em culturas como soja e milho. O uso integrado desses microrganismos com a adubação fosfatada possibilita a redução das doses de fertilizantes minerais, sem comprometer o desempenho agrônômico das culturas. Essa sinergia entre microrganismos solubilizadores e fertilizantes fosfatados contribui para a melhoria de indicadores de sustentabilidade, como a eficiência de uso do fósforo no sistema produtivo. Assim, objetivou-se avaliar a adubação fosfatada associada a microrganismos solubilizadores de fósforo, visando promover o uso eficiente desse nutriente para cultivos sustentáveis de soja e milho. Especificamente, buscou-se: comparar a eficiência agrônômica de diferentes doses de fósforo, utilizando o monoamônio fosfato (MAP) como fonte, em associação com a inoculação de microrganismos solubilizadores nos cultivos de soja e milho; avaliar os efeitos dessa combinação na disponibilidade de fósforo e na atividade enzimática do solo; e analisar o impacto no desempenho fisiológico das plantas e na produtividade das culturas em condições de campo.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Soja e Milho**

A soja (*Glycine max* L.) e o milho (*Zea mays* L.) constituem as duas principais culturas agrícolas do Brasil, tanto em termos de área cultivada quanto em volume de produção,

desempenhando papéis estratégicos na economia nacional e nas exportações do agronegócio brasileiro (CONAB, 2024; EMBRAPA, 2024). A produção de soja na safra 2023/2024 foi estimada em aproximadamente 150 milhões de toneladas, cultivadas em mais de 45 milhões de hectares, resultado de investimentos contínuos em tecnologia, melhoramento genético e intensificação do manejo agrícola (EMBRAPA, 2024). Por sua vez, o milho, com destaque para a segunda safra, conhecida como milho safrinha, alcançou uma produção de cerca de 120 milhões de toneladas no mesmo período, correspondendo a mais de 70% da produção total do cereal no país (CONAB, 2024).

O estado de Goiás destaca-se nacionalmente como um dos principais produtores de ambas as culturas. É o quarto maior produtor de soja, com aproximadamente 4,5 milhões de hectares cultivados e uma produção estimada em 16 milhões de toneladas (IBGE, 2024). Além disso, no estado de Goiás, a região sudoeste possui a maior área plantada de milho, com 937 mil hectares na safra 2023/24 e ocupa a terceira posição na produção de milho nacional, com mais de 14 milhões de toneladas, sendo a maior parte proveniente do cultivo em segunda safra, logo após a colheita da soja (SEAPA-GO, 2024). As condições edafoclimáticas favoráveis, a ampla disponibilidade de áreas mecanizáveis e o uso intensivo de tecnologias explicam o avanço significativo da agricultura goiana nas últimas décadas (LOPES et al., 2023).

A integração entre soja e milho, por meio de sistemas de sucessão e rotação, tem desempenhado um papel crucial na otimização do uso da terra, no aumento da produtividade e na melhoria da rentabilidade das propriedades rurais. Contudo, esse modelo produtivo apresenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Entre os principais desafios estão a degradação do solo e a baixa eficiência no uso de nutrientes, com ênfase no fósforo, cuja disponibilidade em solos tropicais é frequentemente limitada (SILVA et al., 2022; PEREIRA et al., 2023).

## **2.2 Sistema do Fósforo: solo e planta**

A deficiência de fósforo nos solos é um dos principais obstáculos para a agricultura no país, já que esse elemento é vital para o crescimento das plantas e afeta diretamente a produtividade das colheitas (NOVAIS et al., 2006). Os solos do Brasil frequentemente apresentam baixos níveis de fósforo disponível para as plantas, devido à natureza dos minerais de fosfato presentes e aos processos de fixação desse nutriente (BÜNEMANN et al., 2016). Essa limitação é particularmente crítica no Cerrado, onde predominam solos ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, exigindo atenção especial à adubação fosfatada para o cultivo da

soja, uma cultura altamente exigente (MARIN et al., 2015). Diversas estratégias estão sendo desenvolvidas para aumentar sua disponibilidade no solo, como o uso de fertilizantes fosfatados, a aplicação de microrganismos solubilizadores de fósforo e práticas de manejo voltadas à redução da fixação do nutriente (SIQUEIRA et al., 2019).

Entre os elementos essenciais para as plantas, o fósforo (P) é um dos mais limitantes para o crescimento, e sua deficiência está associada à redução do perfilhamento, atraso na floração, menor desenvolvimento radicular e diminuição na quantidade e tamanho de folhas e grãos (ECHEVERRIA et al., 2024). Apesar de sua baixa absorção pelas plantas, o fósforo é amplamente utilizado no Brasil como fertilizante corretivo e de manutenção, especialmente em culturas de grande escala (VILAR et al., 2013). A aplicação de fertilizantes fosfatados, mesmo diante da limitação dos recursos naturais de fósforo, tornou-se uma prática comum, resultando no acúmulo excessivo do nutriente em muitos solos agrícolas (RAYMOND et al., 2020).

O fósforo desempenha funções essenciais nos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas, incluindo a fotossíntese, a síntese de ácidos nucleicos e a regulação enzimática, estando presente no solo em formas inorgânicas e orgânicas, sujeitas a transformações influenciadas por fatores físicos, químicos e biológicos (SILVEIRA et al., 2023). Conforme Vance et al. (2003), o fósforo é vital na transferência de energia celular e na regulação de processos metabólicos cruciais para o desenvolvimento vegetal. Ademais, ele participa diretamente do metabolismo de carboidratos e lipídios, impactando a síntese de amido, açúcares e componentes estruturais das células (RAGHOTHAMA, 1999).

### **2.3 Microrganismos solubilizadores de fósforo e atividades enzimáticas**

O alto custo e a escassez de disponibilidade do fertilizante superfosfato representam um desafio significativo para o setor agrícola. Entretanto, os biofertilizantes emergem como uma alternativa sustentável e viável para suprir essa demanda (BENEDUZI et al., 2008). Diversos pesquisadores destacam a contribuição de bactérias, especialmente do gênero *Bacillus*, na promoção do crescimento das plantas e na melhoria da nutrição fosfatada (ARAÚJO, 2008; TAVANTI et al., 2020). Contudo, existem aproximadamente 360 espécies de *Bacillus*, e nem todas compartilham as mesmas características, sendo fenotipicamente e genotipicamente heterogêneas (SLEPECKY; HEMPHILL, 2006).

Microrganismos solubilizadores de fosfato (MSP) são organismos bacterianos ou fúngicos que possuem a capacidade de converter formas insolúveis de fósforo, como os fosfatos presentes no solo, em formas solúveis que podem ser facilmente absorvidas pelas plantas. Os

MSP são comumente encontrados no solo e na rizosfera, desempenhando um papel crucial na ciclagem de nutrientes e na fertilidade do solo (WANG et al., 2023). Conforme destacado por Pavinato et al. (2021), esses microrganismos têm a capacidade de estabelecer associações com as raízes das plantas, promovendo a solubilização das formas de fósforo menos disponíveis no solo. Essa estratégia pode contribuir para a redução da necessidade de adubação fosfatada.

*B. subtilis* contribui para o desenvolvimento das plantas por meio de mecanismos diretos e indiretos. Os mecanismos diretos incluem a fixação e solubilização de nutrientes essenciais para as plantas, enquanto os indiretos envolvem a produção de substâncias que combatem patógenos, como antibióticos e enzimas que promovem processos biometabólicos (ROMAGNA et al., 2019).

Outra espécie importante é o *B. megaterium*, atualmente denominado como *Priestia megaterium*, que tem a capacidade de solubilizar fósforo e potássio, além de produzir fitormônios que estimulam o crescimento das plantas (KOPP et al., 2024). Esta bactéria, amplamente utilizada como inoculante de solo, foi responsável por aumentar a absorção de nutrientes em várias culturas (RIBEIRO et al., 2018). Marulanda et al. (2010) demonstraram que a inoculação de *Priestia megaterium* (*B. megaterium*) em plantas de milho resultou em um aumento significativo da biomassa radicular, da área foliar e da condutância hídrica nas raízes, refletindo diretamente em uma maior eficiência no uso da água pela planta.

Embora os microrganismos desempenhem um papel crucial em vários processos no solo, seu uso como indicador de qualidade biológica do solo ainda é restrito, principalmente porque a maioria dos métodos disponíveis são mais complexos e exigem mais tempo para gerar resultados. Existem diversas metodologias para avaliar a microbiota do solo, seja pela quantificação de sua população, como na determinação do carbono da biomassa microbiana, ou pela medição de sua atividade, como a respiração basal e a atividade de várias enzimas do solo, sendo que estas últimas podem analisar a dinâmica da ciclagem de nutrientes (SILVEIRA, 2007).

As enzimas não apenas funcionam como catalisadores nas reações metabólicas que ocorrem dentro das células dos organismos vivos (SANTOS et al., 2024), mas também desempenham um papel essencial fora das células. Elas participam de diversas reações que promovem a decomposição de resíduos orgânicos, como ligninases, celulasas, proteases, glucosidases e galactosidases, além de estarem envolvidas na ciclagem de nutrientes, incluindo fosfatases, amidases, urease e sulfatase, e na formação de matéria orgânica e estrutura do solo (MENDES et al., 2018). O uso de análises de atividade enzimática como indicadores altamente sensíveis, especialmente Beta-glicosidade e arilsulfatase, tem sido comprovado no Cerrado (PEIXOTO et al., 2010).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo no município de Montividiu, Goiás, durante 2023/2024. A área onde o estudo foi desenvolvido estava localizada na coordenada no Instituto Goiano de Agricultura (IGA), sob um LATOSSOLO VERMELHO, cuja fertilidade encontrava-se construída, resultando em condições químicas sem limitações para o cultivo de grãos.

O clima da região de Montividiu assemelha-se à Rio Verde, Aw Tropical (Köppen), apresentando duas estações climáticas bem definidas, sendo o período seco e ameno ocorrendo de abril a setembro e, de outubro a março, quente e chuvoso (LOPES SOBRINHO et al., 2020). Entretanto, os dados climatológicos da estação experimental do IGA de setembro de 2023 a 15 de março de 2024 mostraram temperatura máxima do ar diária média de 35°C, temperatura mínima do ar diária média de 18°C e precipitação média de 134 mm (1/09/2023 a 15/03/2024).

O experimento foi conduzido adotando-se o desenho experimental em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas experimentais foram compostas por 10 linhas de semeadura contendo 5 metros de comprimento e espaçadas entre si a 0,5 m. Cada parcela apresentou a área de 25 m<sup>2</sup>.

Os tratamentos foram compostos por doses de fósforo associadas a *Bacillus* (0, 25, 50, 75 e 100% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + 150 mL ha<sup>-1</sup> de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Priestia megaterium* (CNPMS B119)). O fertilizante monoamônio fosfato (MAP, 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + 11% N) foi fonte utilizada para atender as doses citadas anteriormente, sendo a aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup> a dose de referência para 100%. Assim, os tratamentos corresponderam a 0; 19,5; 39,0; 58,5 e 78,0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Além destes, foi adotado um tratamento controle absoluto, sem adição de P e microrganismos. Ressalta-se que os tratamentos foram aplicados no sulco de plantio. Para padronizar a quantidade de N aplicado no sulco em função do uso do MAP, utilizou-se ureia, mantendo-se 16,5 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura. Em função da fertilidade adequada do solo, o KCl foi fornecido em cobertura em doses de manutenção.

As culturas de soja (Soy combate IPRO, material precoce, com ciclo médio de 113 dias, grupo de maturação 7.4 e população de 220-300 mil plantas ha<sup>-1</sup>, semeadura: 30/10/2023, colheita:29/02/2024) e milho (MG597, híbrido simples e precoce, com ciclo médio de 145 dias e população de plantas de 50-62 mil plantas ha<sup>-1</sup>, semeadura: 13/03/2024, colheita:08/07/2024) foram utilizadas como planta indicadora do efeito dos tratamentos. Foram avaliados na soja os componentes de rendimento compostos por: número de vagens por planta (5 plantas por

parcela), número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos, produtividade (área útil de 12 m<sup>2</sup> por parcelas), teor de fósforo foliar e no grão (extração via úmida nítrico perclórica), fluorescência da clorofila *a* e as análises bioquímicas (Glomalina, Beta-glucosidase, Aril Sulfatase e Sulfatase Alcalina e Ácida). Na cultura do milho foram analisados os seguintes parâmetros: produtividade (área útil de 12 m<sup>2</sup> por parcelas), teor de fósforo foliar, fluorescência da clorofila *a*, e as análises bioquímicas (Glomalina, Beta-glucosidase, Aril Sulfatase e Sulfatase Alcalina e Ácida).

A eficiência fotoquímica do Fotossistema A foi mensurada em folhas mantidas no escuro por 30 minutos, utilizando-se a função O-J-I-P. Para a avaliação da fluorescência transiente rápida, empregou-se um fluorômetro portátil (FluorPen FP 100, Photon System Instruments, República Tcheca) com um pulso de luz saturante de 3000 μmol (fótons) m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (STRASSER et al., 2000). As medições foram realizadas no terço superior das plantas de soja e de milho. As variáveis de fluorescência analisadas incluíram: a taxa de fechamento dos centros de reação do Fotossistema II (M0), a probabilidade de um éxciton capturado transferir um elétron além da quinona A (ψE0), o rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo t=0 (φE0), o rendimento quântico de dissipação de energia (φDo), o rendimento quântico máximo da fotoquímica primária (φPo), o índice de desempenho fotoquímico do PSII (PIABS), o fluxo de absorção específico para o centro de reação (ABS/RC), a taxa máxima de captura de excitação do PSII (TR0/RC), o fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no tempo t=0 (ET0/RC) e o fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (DIO/RC).

As atividades enzimáticas foram determinadas por colorimetria com base na liberação de *p*-nitrofenol após a incubação com substratos tamponados. O pH dos tampões foi ajustado para corresponder ao pH ideal de cada ensaio enzimático. Os substratos utilizados para as enzimas testadas incluíram: *p*-nitrofenil sulfato para arilsulfatase (AryI, EC 3.1.6.1) (TABATABAI; BREMNER, 1970), *p*-nitrofenil-fosfato para as fosfatases ácida (AcP, EC 3.1.3.2) e alcalina (AlkP, EC 3.1.3.1) (EIVAZI; TABATABAI, 1977), e *p*-nitrofenil-β-D-glicosídeo para β-1,4-glicosidase (BG, EC 3.2.1.21) (EIVAZI; TABATABAI, 1988). Para cada ensaio enzimático, foram pesadas amostras de 1 g (equivalente ao peso fresco) foram misturadas com 4 mL de tampão e 1 mL do substrato, seguindo-se uma incubação de 1 hora a 37 °C. Após a incubação, 1 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,5 M e 4 mL de Tris (hidroximetil) aminometano (THAM, 0,1 M, pH 12) foram adicionados ao sobrenadante para interromper a reação da BG; para as demais enzimas, a mesma quantidade de CaCl<sub>2</sub> foi adicionada com 4 ml de NaOH e a absorbância foi medida em espectrofotômetro a 410 nm após filtração das amostras. A proteína do solo relativa a glomalina facilmente extraível (PSRG-FE) foi extraída conforme a

metodologia de Wright e Updahvava, (1998). Foram pesados 1g de solo, adicionados 8 mL de citrato de sódio (20  $\mu$ M a pH 7.0) e submetidos à autoclave por 30 minutos. Após autoclavagem, procedeu-se a centrifugação dos extratos por 15 minutos. Os teores de proteína foram quantificados a partir do método de determinação de proteínas de Bradford (BRADFORD, 1976), em espectrofotômetro, usando a equação da curva de proteína padrão que foi obtido por albumina de soro bovino (BSA) como uma proteína padrão purificada.

A análise estatística foi realizada por meio do pacote AgroR (SHIMIZU et al., 2024) e as representações gráficas foram elaboradas utilizando o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016), ambos no ambiente R (R CORE TEAM, 2023). A análise de variância foi conduzida considerando um experimento em delineamento em blocos casualizados (DBC), com um fator quantitativo (doses de  $P_2O_5$ ) e a inclusão de um tratamento adicional (controle absoluto).

O delineamento foi balanceado, e as análises foram realizadas com base em um modelo de efeitos fixos. A verificação dos pressupostos do modelo foi efetuada por meio dos seguintes testes: Shapiro-Wilk, para avaliar a normalidade dos resíduos; Bartlett, para a homogeneidade das variâncias; e Durbin-Watson, para a independência dos erros. Quando se detectou diferença significativa entre os níveis do fator principal, procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão polinomial de primeiro e segundo grau. Ademais, quando o tratamento adicional diferiu significativamente dos tratamentos pertencentes ao fator quantitativo, realizou-se uma comparação pontual adicional com base na diferença entre a média observada e o valor predito pelo modelo. As médias e respectivos erros-padrão foram calculados por tratamento, sendo que, para o tratamento adicional, a média foi calculada separadamente com  $n = 4$  repetições.

Para fins comparativos, realizou-se a predição do valor estimado pelo modelo de regressão no ponto correspondente ao tratamento adicional ( $x = 0$ ). Com base na variância residual do modelo e no erro-padrão da média do tratamento adicional, calculou-se a diferença mínima significativa (DMS). A diferença absoluta entre a média observada do tratamento adicional e o valor estimado pelo modelo foi comparada à DMS. Quando essa diferença foi superior à DMS, considerou-se que o tratamento adicional diferiu significativamente da tendência ajustada pelos tratamentos quantitativos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados

A figura ilustra a resposta do número de vagens por planta (Figura 1A), número de grãos por vagem (Figura 1B) e peso de mil grãos (Figura 1C) da soja à aplicação de doses de  $P_2O_5$  (0, 19,5, 39,0, 58,5 e 78,0  $kg\ ha^{-1}$ ), na presença ou ausência de microrganismos solubilizadores de fósforo (MSP). O tratamento controle absoluto (dose 0  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , sem aplicação de MSP) é indicado pelo quadrado vermelho, enquanto os demais tratamentos (círculos pretos) representam a combinação de fósforo mineral com MSP. A linha de regressão ajustada para os tratamentos P + MSP foi do tipo polinomial de segunda ordem, com coeficientes estatisticamente significativos ( $p \leq 0,05$ ). A baixa magnitude do  $R^2$  indica que apenas 19,8% da variabilidade observada é explicada pelas doses de  $P_2O_5$  aplicadas nos tratamentos com MSP, sugerindo que a maior parte da variação se deve a fatores não considerados no modelo. A Diferença Mínima Significativa (DMS) foi de 8,42, delimitada pelas linhas tracejadas vermelhas na figura. Ao comparar a média do tratamento controle absoluto com os demais tratamentos P + MSP, observa-se que os tratamentos com adição de 39,0 e 78,0  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  apresentaram médias estatisticamente diferentes do controle, pois estão fora da faixa delimitada pela DMS (Figura 1A).

Os resultados indicam que as doses de P + MSP não influenciaram significativamente o número de grãos por vagem em relação ao tratamento controle. Entretanto, com base na DMS, observa-se que a média geral das aplicações de P mostra-se estatisticamente diferente do controle absoluto (Figura 1B).

O peso de mil grãos foi significativamente influenciado pela aplicação de doses de  $P_2O_5$ , ajustando-se a um modelo quadrático, com um coeficiente de determinação indicando que aproximadamente 47,3% da variação dos dados pode ser explicada pelas doses de fósforo associadas aos MSP. Observou-se um comportamento ligeiramente crescente nas doses mais altas, sugerindo uma resposta positiva do parâmetro às maiores disponibilidades de fósforo com MSP. O tratamento controle absoluto, representado pelo quadrado vermelho, apresentou PMG semelhante ao dos demais tratamentos, indicando que a resposta foi sutil, mas consistente com o aumento das doses de fósforo e MSP (Figura 1C).

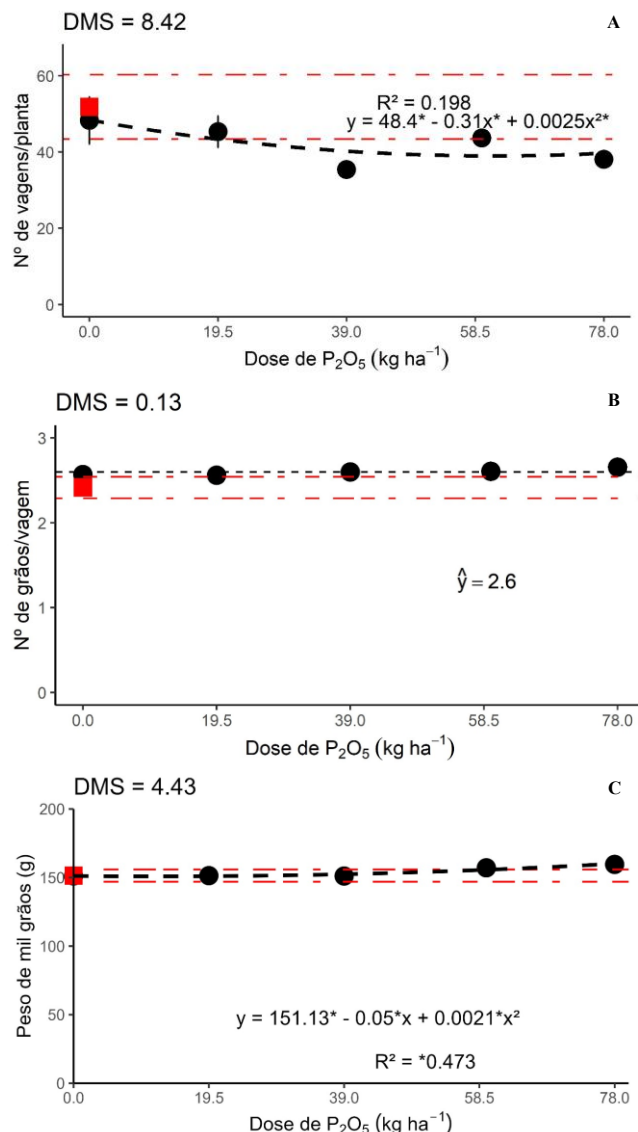


FIGURA 1 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre número de vagens por planta (A), grãos por vagem (B) e peso de mil grãos (C) em soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A aplicação de diferentes doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não resultou em alterações significativas no índice de clorofila foliar da soja. No tratamento controle, a média foi de aproximadamente 40, enquanto os tratamentos P + MSP apresentaram valores agrupados em torno de 36,8. A análise estatística, baseada na DMS (4,31), indicou que as diferenças entre o controle e cada um dos tratamentos P + MSP foram inferiores a esse limite, sugerindo a ausência de diferença estatística significativa entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). Não foi ajustado um modelo de regressão para os tratamentos P + MSP, nem foi apresentado valor de R<sup>2</sup>, evidenciando a inexistência de uma tendência significativa entre o aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e a variação no índice de clorofila

foliar. Os valores médios mantiveram-se estáveis ao longo das doses avaliadas, sem padrão de incremento ou redução (Figura 2A).

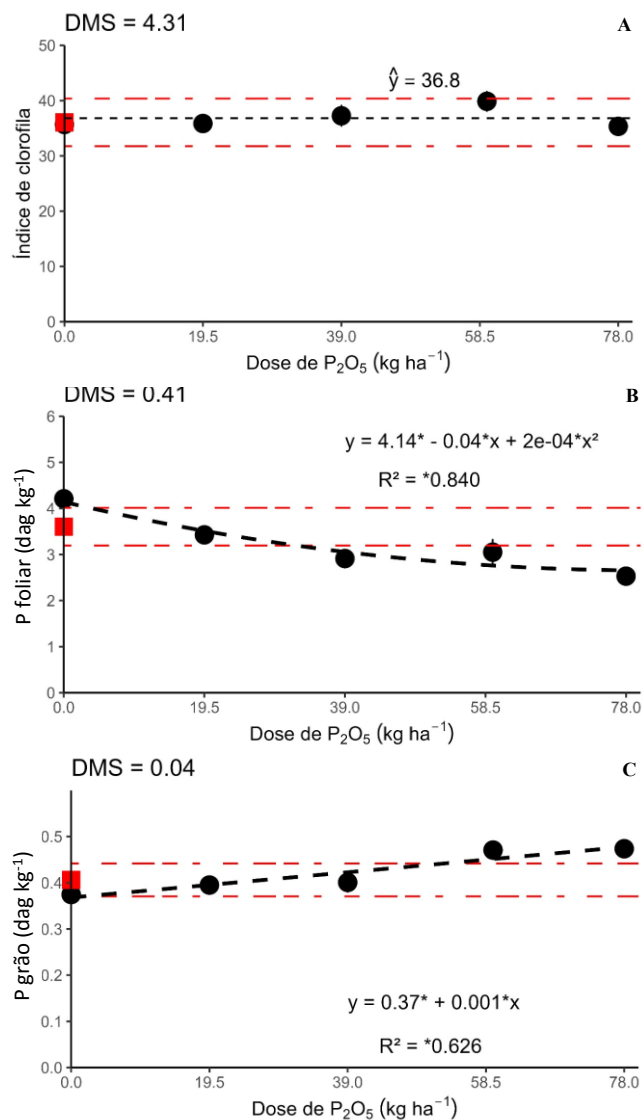


FIGURA 2 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre a clorofila (A), o teor de fósforo foliar (B) e teor de fósforo nos grãos (C) em soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

Os valores de P foliar para os tratamentos P + MSP variaram de 4,2 dag kg<sup>-1</sup> (0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP) a 3,0 dag kg<sup>-1</sup> (78,0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP). Observou-se que apenas o tratamento com 19,5 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP não apresentou diferença significativa em relação ao controle absoluto (DMS = 0,41). A análise de regressão para os tratamentos P + MSP revelou uma equação quadrática ajustada aos dados, com um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) indicando que 84% da variação na concentração de P foliar pode ser explicada pelas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> associadas

aos MSP. A linha de regressão sugere uma diminuição gradual na concentração de P foliar à medida que as doses de  $P_2O_5$  aumentam.

A análise estatística, fundamentada na Diferença Mínima Significativa ( $DMS = 0,04 \text{ dag kg}^{-1}$ ), demonstrou que os tratamentos com 58,5 e 78,0  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  apresentaram teores de fósforo nos grãos significativamente superiores ao tratamento controle ( $p \leq 0,05$ ). Em contrapartida, os tratamentos com 0,0, 19,5 e 39,0  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  não diferiram estatisticamente do controle. O ajuste da regressão linear para os tratamentos P + MSP indica uma tendência de aumento linear do teor de fósforo nos grãos em função do incremento das doses de  $P_2O_5$  aplicadas na presença de MSP (Figura 2C).

A produtividade de grãos de soja variou em resposta à aplicação de diferentes doses de  $P_2O_5$  associadas a MSP. A DMS ( $950,58 \text{ kg ha}^{-1}$ ) indicou que apenas o tratamento com 39,0  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  apresentou produtividade estatisticamente inferior ao controle absoluto. A ausência de curva de regressão sugere que não foi observada uma tendência significativa entre o aumento das doses de  $P_2O_5$  + MSP e a produtividade de grãos (Figura 3).

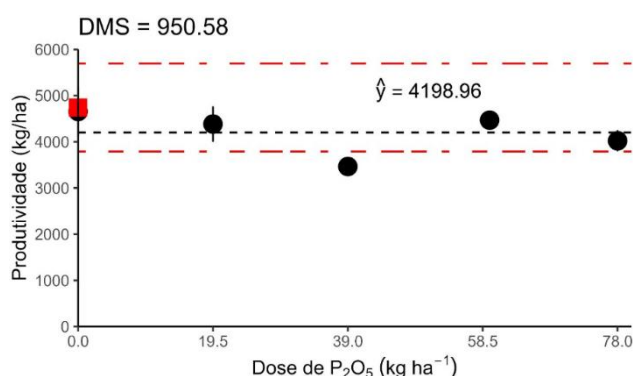


FIGURA 3 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre a produtividade da soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A aplicação de fósforo ( $P_2O_5$ ) em conjunto com MSP não resultou em alterações estatisticamente significativas nos parâmetros fotoquímicos associados à atividade do Fotossistema II (PSII) em plantas de soja. Em todos os parâmetros avaliados, as médias dos tratamentos P + MSP permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela DMS, sem diferenças estatísticas em relação ao controle. Ademais, não foram identificadas tendências lineares ou quadráticas que justificassem o ajuste de modelos de regressão (Figura 4).

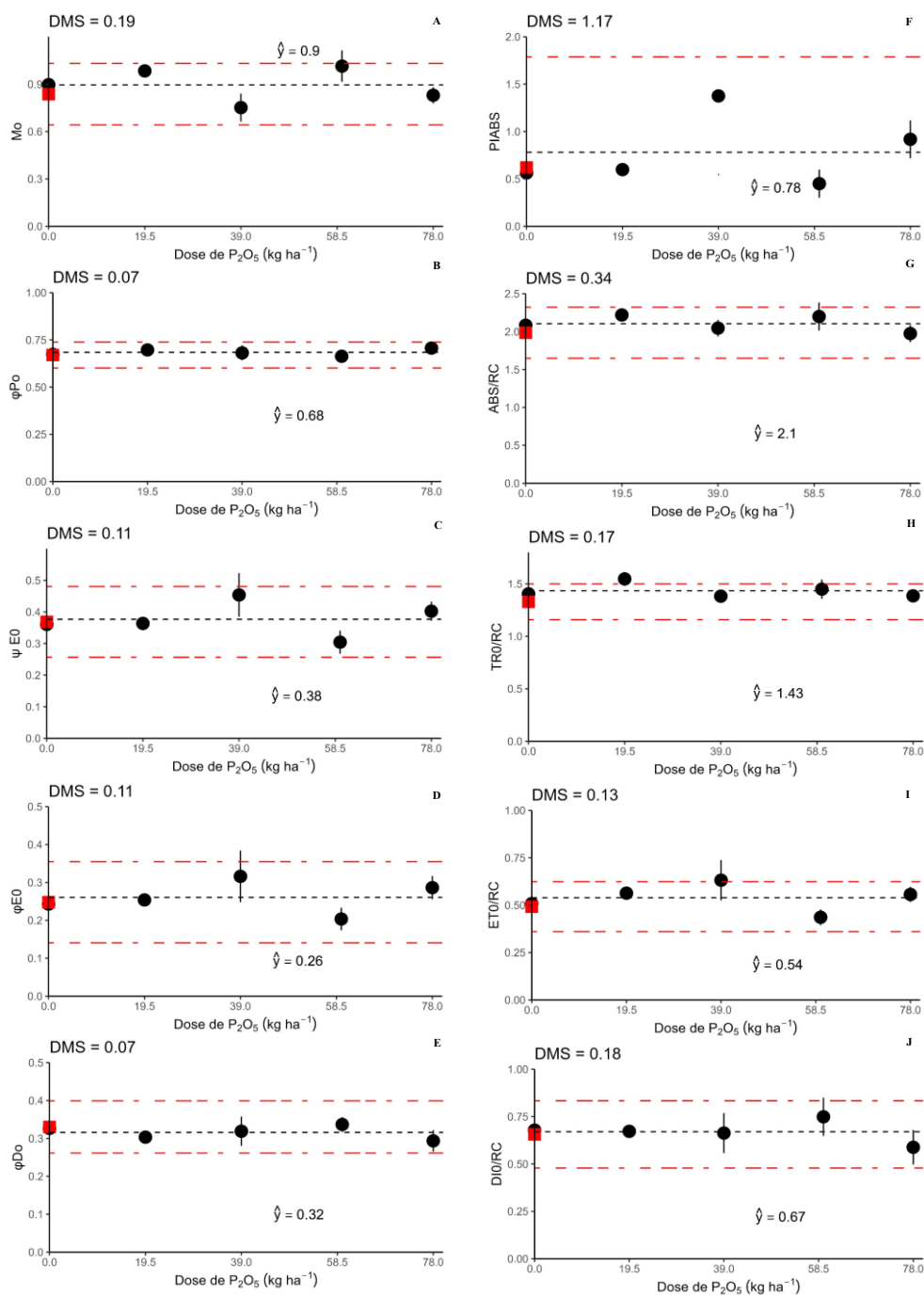


FIGURA 4 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre as respostas fotoquímicas da soja cultivada em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (A) taxa de fechamento dos centros de reação do FS II (M0); (B) rendimento quântico máximo da fotoquímica primária ( $\phi$ Po); (C) probabilidade de um éxciton capturado transferir um elétron além da quinona A ( $\psi$ EO); (D) rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo  $t = 0$  ( $\phi$ EO); (E) rendimento quântico de dissipação de energia ( $\phi$ Do); (F) índice de desempenho fotoquímico do PSII (PIABS); (G) fluxo de absorção específico para o centro de reação (ABS/RC); (H) taxa máxima de captura de excitação do PSII (TR0/RC); (I) fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no tempo  $t=0$  (ET0/RC); (J) fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (DI0/RC). Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

Os valores médios dos tratamentos com P + MSP mantiveram-se próximos às respectivas médias, o que reforça a estabilidade das variáveis diante dos tratamentos aplicados (Figura 4). A taxa de fechamento dos centros de reação do PSII (Figura 4A) e o rendimento quântico máximo da fotoquímica primária (Figura 4B) apresentaram comportamento uniforme entre os tratamentos, sugerindo que a eficiência inicial da fotossíntese foi preservada. Da mesma forma, os parâmetros relacionados ao transporte de elétrons, como a probabilidade de um éxciton transferir elétron além da quinona A (Figura 4C) e o rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo zero (Figura 4D), não variaram significativamente, indicando manutenção do fluxo eletrônico primário. As variáveis associadas à dissipação de energia, como o rendimento quântico de dissipação (Figura 4E) e o fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (Figura 4J), também permaneceram estáveis, sugerindo que os mecanismos de proteção fotoquímica não foram impactados. O índice de desempenho fotoquímico do PSII (Figura 4F), embora tenha oscilado entre os tratamentos, não apresentou diferenças significativas. Parâmetros relacionados à absorção e captura de energia, como ABS/RC (Figura 4G), TR<sub>0</sub>/RC (Figura 4H) e ET<sub>0</sub>/RC (Figura 4I), igualmente não foram afetados pelas doses de fósforo combinadas com MSP.

O teor de fósforo disponível no solo (P Mehlich-1) apresentou uma resposta significativa à aplicação das doses de 0, 19,5, 39,0, 58,5 e 78,0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP, seguindo um comportamento quadrático. Este padrão indica uma redução inicial no teor de fósforo no solo, seguida por um aumento nas doses mais altas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP. A análise baseada na Diferença Mínima Significativa revelou que o tratamento com 19,5 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> resultou em um teor de P significativamente inferior ao do controle absoluto ( $p \leq 0,05$ ). Em contraste, o tratamento com 0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP apresentou um valor superior ao controle absoluto, indicando um aumento significativo no teor de P disponível apenas devido à ação microbiana (Figura 5A).

A atividade da enzima β-glicosidase no solo apresentou uma resposta quadrática em relação às doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MSP. O modelo ajustado indica que 27,3% da variação na atividade enzimática é explicada pelos tratamentos. Observou-se aumento na atividade da β-glicosidase até a dose de 58,5 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, seguido de redução na dose de 78 kg ha<sup>-1</sup>, evidenciando um efeito de resposta negativa em altas concentrações de fósforo. A maior Diferença Mínima Significativa (DMS = 17,98 μg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) entre os tratamentos reforça que os efeitos do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sobre a atividade da enzima foram expressivos, especialmente na dose de 58,5 kg ha<sup>-1</sup>, que se destacou em relação ao controle absoluto. Isso sugere que a adubação fosfatada associada a MSP pode modular a atividade microbiana do solo, refletida na intensificação da atividade da

$\beta$ -glicosidase, enzima associada à ciclagem de carbono e à decomposição da matéria orgânica (Figura 5B).

A atividade da arilsulfatase no solo manteve-se estável frente à variação das doses de fósforo, não se ajustando a modelos matemáticos de tendência linear ou quadrática. A análise estatística mostra uma baixa amplitude entre os tratamentos, expressa pela DMS de 6,94  $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ , indicando que as diferentes doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , incluindo o tratamento controle, não promoveram diferenças estatisticamente significativas na atividade da enzima. Este resultado indica que não houve inibição enzimática associada ao aumento do fósforo disponível no solo (Figura 5C).

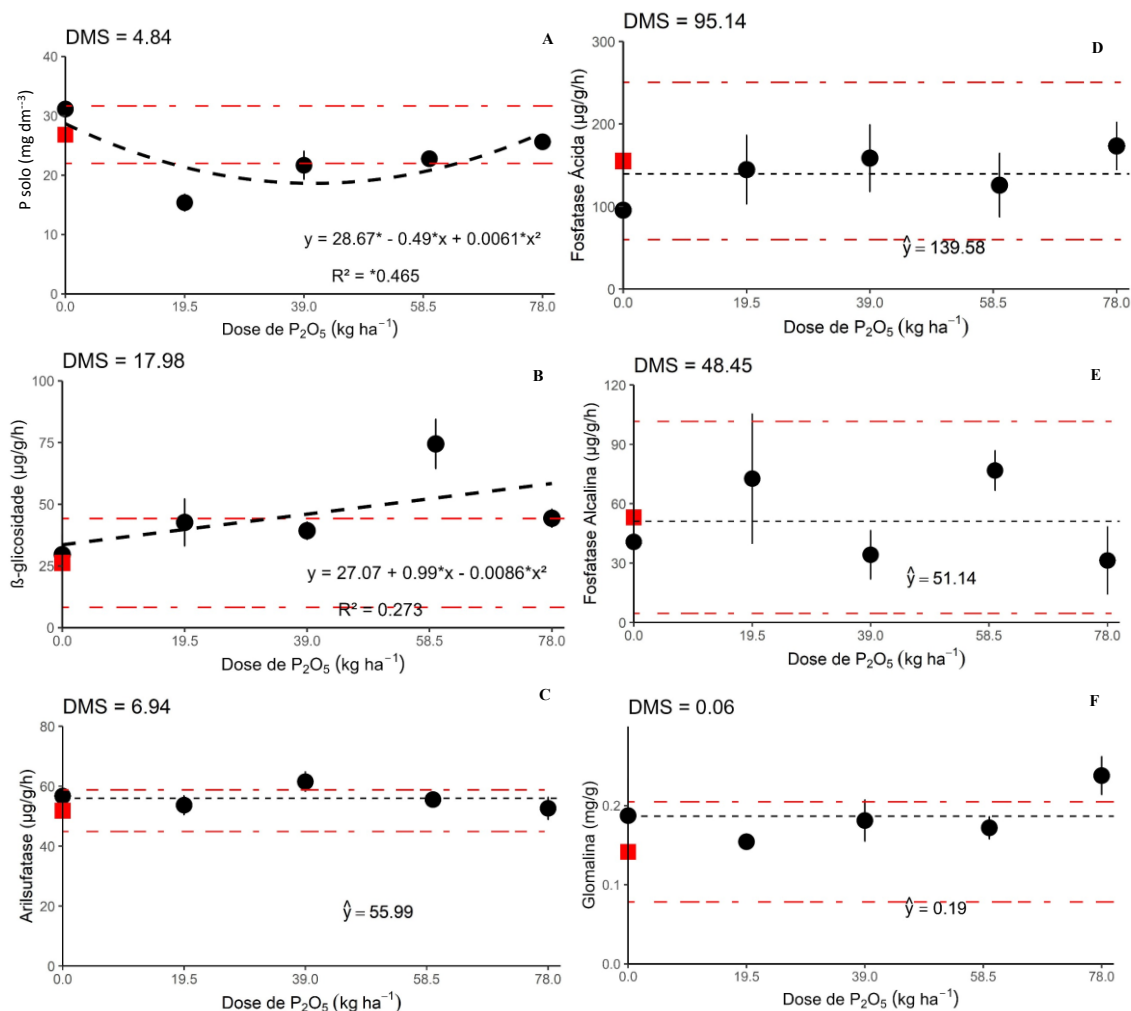


FIGURA 5 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo disponível (A) e atividade bioquímica do solo no cultivo de soja em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (B)  $\beta$ -glicosidade; (C) arilsulfatase; (D) Fosfatase ácida; (E) Fosfatase alcalina e (F) Glomalina (PSRG-FE). Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A atividade da enzima fosfatase ácida no solo, não apresentou variações significativas em resposta à aplicação das doses de  $P_2O_5$ , como evidenciado pela sobreposição dos intervalos de erro das médias e pelo elevado valor do DMS (95,14). A ausência de diferença entre os tratamentos sugere que a atividade da fosfatase ácida foi pouco sensível às variações nas doses de fósforo aplicadas, possivelmente devido à saturação da resposta enzimática ou à predominância de fatores edáficos e microbiológicos na regulação da atividade da enzima.

A atividade da enzima fosfatase alcalina no solo não foi significativamente influenciada pelas diferentes doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Essa ausência de efeito estatístico pode ser atribuída ao elevado valor do DMS ( $48,45 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), que limitou a detecção de diferenças entre os tratamentos. Além disso, as médias apresentaram amplas barras de erro, indicando alta variabilidade nos dados (Figura 5E).

O teor de glomalina no solo não foi significativamente influenciado pelas doses de  $P_2O_5$  aplicadas, mantendo-se em uma média geral de  $0,19 \text{ mg g}^{-1}$  e sem apresentar tendência de resposta aos níveis de adubação fosfatada. Houve uma variação discreta entre os tratamentos, com o maior valor médio registrado na dose de  $78 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , embora este não tenha diferido estatisticamente dos demais tratamentos, conforme evidenciado pela baixa DMS ( $0,06 \text{ mg g}^{-1}$ ). O tratamento  $0 P_2O_5 + \text{MSP}$  apresentou valor semelhante à média geral, indicando que a disponibilidade de fósforo no solo não promoveu alterações expressivas na produção de glomalina. Esses resultados sugerem que a produção dessa glicoproteína, associada à atividade de fungos micorrízicos arbusculares e à estabilidade estrutural do solo, pode ser regulada por fatores distintos da adubação fosfatada, como a colonização micorrízica e a qualidade da matéria orgânica (Figura 5F).

As doses de  $P_2O_5 + \text{MSP}$  exerceram uma influência significativa sobre o teor de fósforo nas folhas e na produtividade de grãos na cultura do milho (Figura 6). O teor de fósforo foliar apresentou uma resposta quadrática às doses de  $P_2O_5 + \text{MSP}$ . A Diferença Mínima Significativa ( $0,4 \text{ dag kg}^{-1}$ ) indicou que os tratamentos com  $39,0$  e  $58,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5 + \text{MSP}$  resultaram em valores significativamente superiores ao controle absoluto, enquanto os demais tratamentos ( $0 + \text{MSP}$ ,  $19,5$  e  $78,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) não diferiram estatisticamente do controle (Figura 6A).

A produtividade de grãos de milho apresentou um aumento linear em resposta à aplicação de  $P_2O_5$ , com uma DMS de  $757,29 \text{ kg ha}^{-1}$ . A análise estatística revelou que os tratamentos com  $58,5$  e  $78,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5 + \text{MSP}$  resultaram em produtividades significativamente superiores ao controle absoluto. Em contrapartida, os tratamentos com  $0$ ,

19,5 e 39,0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP apresentaram valores dentro da faixa da DMS, não diferindo estatisticamente do controle.

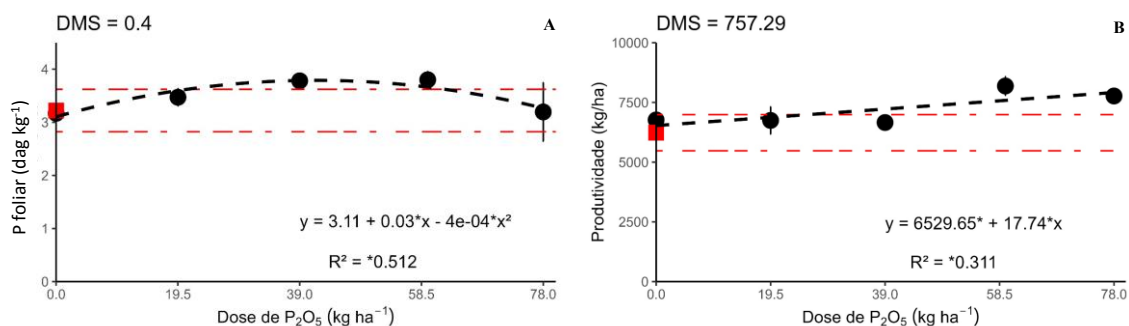


FIGURA 6 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo foliar (A) e a produtividade (B) em milho segunda safra cultivado em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A adubação fosfatada em conjunto com a inoculação de microrganismos solubilizadores de fósforo não resultou em alterações significativas nas variáveis fotoquímicas associadas à atividade do Fotossistema II (PSII) em plantas de milho cultivadas em sucessão à soja. De modo geral, os dados não revelaram diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos com P + MSP e o controle absoluto para as variáveis analisadas, conforme demonstrado pelas médias que permaneceram dentro dos limites da DMS (Figura 7).

A taxa de fechamento dos centros de reação do PSII (Figura 7A) apresentou uma média geral de 0,66, com todos os tratamentos situados dentro da faixa da DMS. O rendimento quântico máximo da fotoquímica primária (Figura 7B), a probabilidade de transferência de elétrons além da quinona A (Figura 7C), o rendimento quântico do transporte de elétrons (Figura 7D) e o rendimento quântico de dissipação de energia (Figura 7E) mantiveram médias estáveis, indicando a preservação da eficiência primária do PSII e dos mecanismos de dissipação térmica da energia absorvida. As variáveis integrativas e de fluxo energético — PIABS (Figura 7F), ABS/RC (Figura 7G), TR<sub>0</sub>/RC (Figura 7H), ET<sub>0</sub>/RC (Figura 7I) e DI<sub>0</sub>/RC (Figura 7J), também não diferiram.

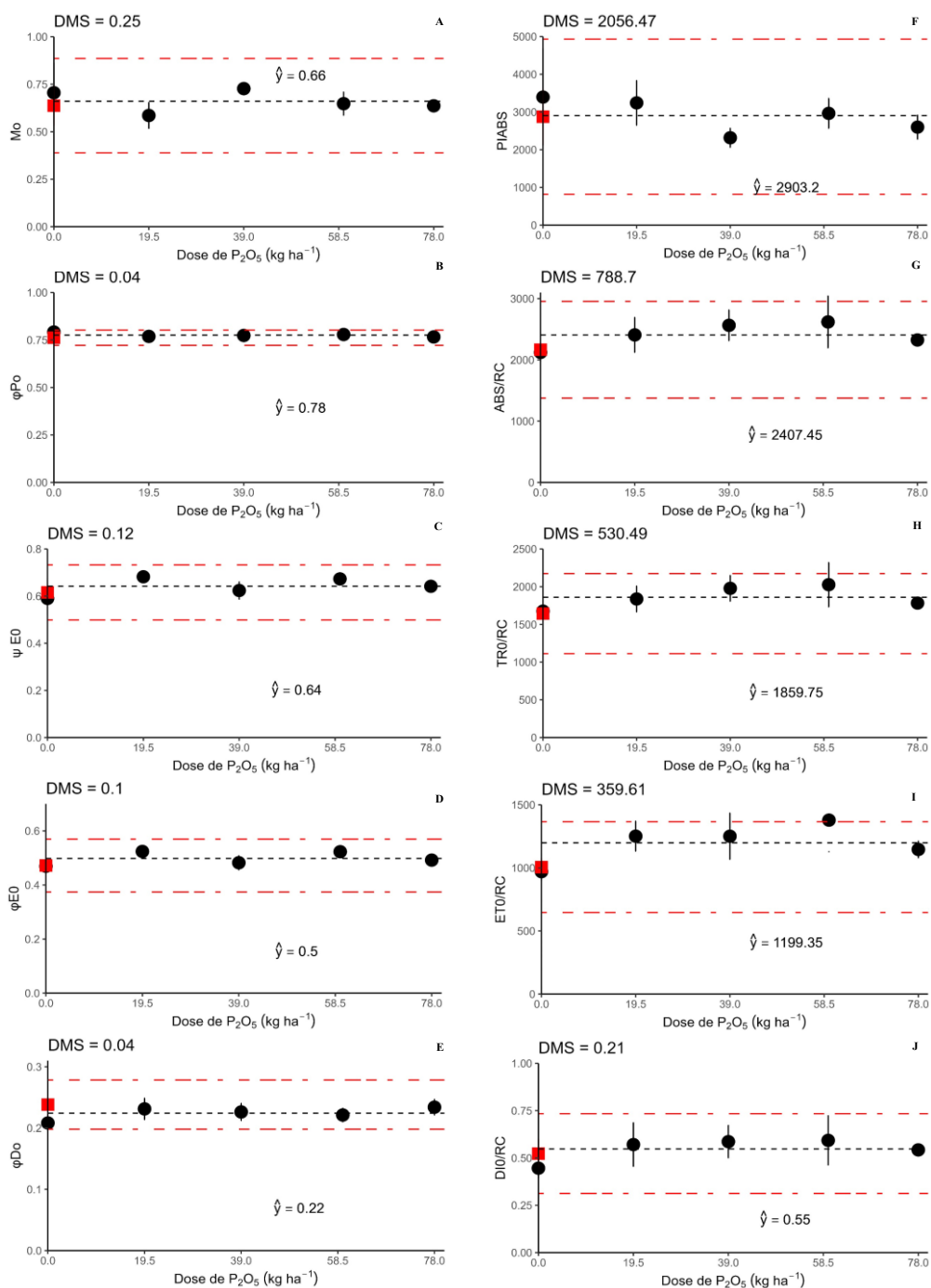


FIGURA 7 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre as respostas fotoquímicas de milho segunda safra cultivado em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (A) taxa de fechamento dos centros de reação do FS II (M0); (B) rendimento quântico máximo da fotoquímica primária ( $\phi Po$ ); (C) probabilidade de um éxciton capturado transferir um elétron além da quinona A ( $\psi E0$ ); (D) rendimento quântico do transporte de elétrons no tempo  $t = 0$  ( $\phi E0$ ); (E) rendimento quântico de dissipação de energia ( $\phi Do$ ); (F) índice de desempenho fotoquímico do PSII (PIABS); (G) fluxo de absorção específico para o centro de reação (ABS/RC); (H) taxa máxima de captura de excitação do PSII (TR0/RC); (I) fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no tempo  $t=0$  (ET0/RC); (J) fluxo específico de energia dissipada pelas clorofilas (DI0/RC). Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A aplicação de fósforo ( $P_2O_5$ ) em conjunto com microrganismos solubilizadores de fósforo (MSP) apresentou efeitos variáveis nos teores de fósforo disponível no solo em áreas cultivadas com milho de segunda safra. A média geral dos tratamentos com MSP foi de  $18,13 \text{ mg dm}^{-3}$ , com um desvio mínimo significativo (DMS) de  $6,1 \text{ mg dm}^{-3}$ . O tratamento que utilizou  $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  associado a MSP demonstrou um teor de fósforo significativamente superior ao controle absoluto. De maneira semelhante, o tratamento com  $39,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  mais MSP também apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao controle, com um aumento considerável do fósforo disponível no solo. Em contraste, os tratamentos com  $58,5$  e  $78,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  mais MSP resultaram em valores significativamente inferiores ao controle absoluto, situando-se abaixo da faixa do DMS (Figura 8A).

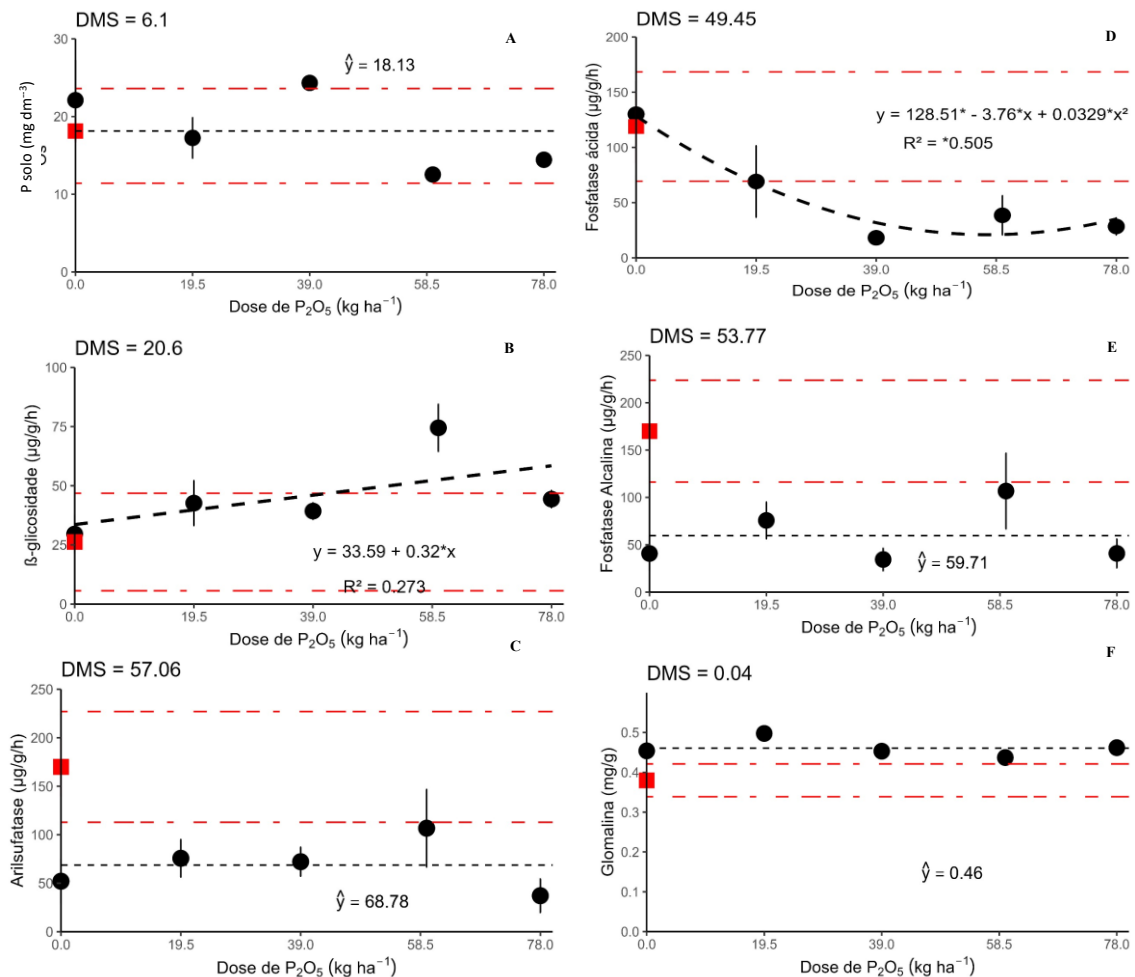


FIGURA 8 - Adubação fosfatada e microrganismos sobre o teor de fósforo disponível (A) e atividade bioquímica do solo no cultivo de milho segunda safra em Latossolo Vermelho de Rio Verde, GO. (B)  $\beta$ -glicosidade; (C) arilsulfatase; (D) Fosfatase ácida; (E) Fosfatase alcalina e (F) Glomalina (PSRG-FE). Médias acima ou abaixo do desvio mínimo significativo (DMS) diferem significativamente do tratamento controle absoluto (quadrado vermelho).

A atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase no solo cultivado com milho apresentou uma tendência de aumento linear em resposta às doses de  $P_2O_5$ . O coeficiente de determinação ajustado na equação indica que 27,3% da variação na atividade da enzima foi explicada pela adubação fosfatada. Observou-se um incremento na atividade até a dose de  $58,5 \text{ kg ha}^{-1}$ , seguido por uma leve redução na dose mais alta ( $78 \text{ kg ha}^{-1}$ ), embora os valores ainda se mantivessem superiores ao controle. A Diferença Mínima Significativa (DMS =  $20,6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) evidencia uma variação expressiva entre os tratamentos, com o controle absoluto apresentando o menor valor médio de atividade enzimática (Figura 8B).

Os valores médios da atividade da arilsulfatase oscilaram entre 43 e  $107 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , com uma média geral de  $68,78 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Observou-se um aumento na atividade até a dose de  $58,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , onde se registrou o valor máximo, seguido por uma redução acentuada na dose mais alta ( $78 \text{ kg ha}^{-1}$ ). O tratamento controle absoluto apresentou uma atividade significativamente superior, com valor médio de  $165 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Este resultado supera todos os demais tratamentos com aplicação de fósforo, conforme evidenciado pela comparação com o desvio mínimo significativo de  $57,06 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Figura 8C).

A atividade da enzima fosfatase ácida no solo demonstrou uma resposta significativa às doses de  $P_2O_5$  aplicadas, ajustando-se a uma equação quadrática com um coeficiente de determinação de 0,505. Observou-se uma redução acentuada na atividade enzimática com o aumento das doses de fósforo + MSP, especialmente até a dose de  $39,0 \text{ kg ha}^{-1}$ . Os valores médios variaram entre 23 e  $130 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , sendo o maior valor registrado no tratamento sem aplicação de  $P_2O_5$  e o menor na dose de  $39,0 \text{ kg ha}^{-1}$ . O tratamento controle absoluto apresentou uma atividade média de aproximadamente  $120 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , estatisticamente superior a todos os tratamentos com aplicação de fósforo e MSP, conforme o desvio mínimo significativo igual a  $49,45 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Figura 8D).

A atividade da enzima fosfatase alcalina no solo foi influenciada pelas doses de  $P_2O_5$  aplicadas, variando entre aproximadamente 39 e  $113 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , com um valor médio geral de  $59,71 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . O tratamento controle absoluto apresentou atividade média de  $65 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , significativamente superior à dos tratamentos com fósforo, conforme indicado pelo desvio mínimo significativo de  $53,77 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Figura 8E).

O teor de glomalina no solo cultivado com milho em sucessão à soja não respondeu às doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Os valores variaram entre 0,43 e  $0,50 \text{ mg g}^{-1}$ , com média geral de  $0,46 \text{ mg g}^{-1}$ . Embora os tratamentos com aplicação de fósforo tenham mostrado, em geral, teores ligeiramente superiores ao controle absoluto, essas diferenças não ultrapassaram a DMS

de 0,04 mg g<sup>-1</sup>, indicando ausência de efeito estatístico significativo das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Tais resultados sugerem que a produção de glomalina, uma glicoproteína relacionada à presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), não foi sensivelmente impactada pelas doses crescentes de fósforo aplicadas. A estabilidade nos teores de glomalina indica resiliência da atividade micorrízica frente à adubação fosfatada no sistema de sucessão soja-milho, possivelmente em função de condições favoráveis proporcionadas pelos resíduos culturais e pela microbiota estabelecida (Figura 8F).

## 4.2 Discussão

Os efeitos do sinergismo entre adubação fosfatada e microrganismos solubilizadores para uso eficiente do fósforo em sucessão soja/milho revelaram um complexo intercâmbio entre fatores bióticos e abióticos. Isto também foi evidenciado na literatura (BALOCH, 2025). Os resultados mostram respostas diferenciadas entre as culturas, bem como modulações complexas nos processos do solo, fornecendo uma visão diversificada para o manejo sustentável de nutrientes.

De forma concisa, o estudo demonstrou que, enquanto a cultura do milho exibiu um incremento linear robusto na produtividade de grãos e uma resposta quadrática positiva no teor de fósforo foliar com a aplicação combinada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MSP (Figura 6), a soja apresentou um padrão mais inconsistente. Para a soja, observou-se uma influência parcial nos componentes de rendimento, com baixa variabilidade explicada pelos tratamentos em alguns parâmetros, e até mesmo uma produtividade de grãos inferior ao controle absoluto em uma das doses avaliadas (Figura 3). No entanto, o teor de fósforo nos grãos da soja demonstrou uma tendência linear crescente, apesar de uma resposta quadrática decrescente no P foliar (Figura 2B, 2C).

Em ambas as culturas, a eficiência fotoquímica da clorofila *a*, medida por diversos parâmetros do Fotossistema II, permaneceu estável e inalterada pelos tratamentos (Figuras 4 e 7).

No solo, a disponibilidade de P (P Mehlich-1) manifestou um comportamento quadrático e dinâmico, influenciado pela presença dos MSP e pelas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figuras 5A e 8A). As atividades de enzimas como β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase foram sensivelmente moduladas, enquanto a fosfatase alcalina e a glomalina apresentaram maior resiliência às intervenções dos tratamentos (Figuras 5B-F e 8B-F).

A divergência nas respostas entre soja (cultura C3) e milho (cultura C4) é uma informação central. A maior eficiência de uso do fósforo e a capacidade de resposta do milho à

adubação fosfatada e aos MSP, manifestada pelo incremento linear na produtividade, são consistentes com a sua fisiologia de planta C<sub>4</sub>, que frequentemente apresenta maior demanda e absorção de nutrientes sob condições otimizadas (VEN et al., 2019, PRASANNA et al., 2025). Essa resposta mais acentuada no milho pode indicar que, para esta cultura, a combinação de P mineral e a ação dos MSP resultou em uma superação mais eficaz de limitações nutricionais, facilitando a absorção de P de forma que se traduziu diretamente em ganhos agronômicos.

Em contrapartida, a resposta da soja, mais inconstante em termos de produtividade, sugere que fatores intrínsecos à cultura, variações genéticas da cultivar ou interações com outras condições edafoclimáticas não diretamente controladas pelo experimento possam ter exercido influência preponderante sobre o rendimento (SANTOS et al., 2023). A alta produtividade observada no tratamento sem a aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sugere que a atividade microbiana associada aos bioinsumos pode ter contribuído para a solubilização do fósforo nativo, atendendo parcialmente às necessidades da cultura, como destacado por Oliveira et al. (2021). Ademais, Nogueira et al. (2020) demonstraram que a aplicação de *Bacillus subtilis* pode aumentar a solubilização de fósforo no solo e promover o crescimento das raízes, o que pode explicar a produtividade relativamente alta mesmo com doses menores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

A baixa magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para alguns parâmetros da soja reforça essa hipótese, indicando a atuação de variáveis não contempladas no modelo (WICKHAM, 2016). No entanto, o aumento linear do fósforo nos grãos da soja é um resultado de grande importância, destacando a capacidade de translocação do nutriente para o produto final, o que tem implicações diretas na qualidade nutricional e valor comercial (KRUEGER et al., 2013, SINGH et al., 2018). Segundo Sousa et al. (2022), a ação das bactérias solubilizadoras de fósforo pode facilitar a liberação de formas indisponíveis do nutriente no solo, principalmente através da produção de ácidos orgânicos, o que resulta em maior translocação de fósforo para órgãos de reserva, como os grãos. Isso pode explicar o aumento linear observado neste estudo.

A estabilidade dos parâmetros fotoquímicos em ambas as culturas, mesmo com variações na disponibilidade de P, sugere que a fotossíntese basal não foi o principal limitador sob as condições experimentais ou que a amplitude das doses de P não induziu estresse fotossintético que gerasse alterações detectáveis na eficiência do Fotossistema II (STRASSER et al., 2000). Santos et al. (2023) relatam que a integridade do PSII na soja permaneceu estável sob diferentes condições de fertilização fosfatada. Lima et al. (2022), observaram a manutenção da estabilidade energética no PSII do milho sob diferentes fontes de fósforo e bioinoculantes. Este resultado sugere que o sistema fotossintético do milho se manteve funcional, mesmo com

variações nas doses de fósforo, possivelmente devido à maior eficiência no uso do nutriente, uma característica comum em plantas C4 (TAIZ et al., 2017).

A dinâmica do fósforo disponível no solo revelou-se complexa. A observação de que o tratamento com 0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na presença de MSP resultou em um teor de P disponível superior ao controle absoluto evidencia a significativa capacidade dos MSP em solubilizar o fósforo nativo ou fixado no solo (SHARMA et al., 2013; IQBAL et al., 2023). Essa descoberta é corroborada por vasta literatura que descreve a bioeficácia desses microrganismos na mobilização de formas indisponíveis de P, por meio da produção de ácidos orgânicos e fosfatases (RICHARDSON et al., 2009; RAWAT et al., 2020). Contudo, a redução do P disponível em doses mais elevadas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP, especialmente no milho, sugere um fenômeno de "diluição microbiana" ou "feedback negativo" na atividade dos MSP, onde a alta disponibilidade de P mineral pode suprimir a expressão de genes relacionados à solubilização de fosfato nos microrganismos, uma resposta adaptativa bem documentada (FREITAS et al., 2023). Além disso, a absorção intensiva pelas plantas em crescimento vigoroso poderia ter superado a taxa de liberação de P, resultando em menores teores residuais.

As atividades enzimáticas do solo atuaram como bioindicadores fundamentais da saúde e funcionalidade do ecossistema rizosférico. O aumento da atividade da β-glicosidase, ligada à ciclagem do carbono e à decomposição da matéria orgânica (WANG et al., 2023), sugere uma intensificação da atividade microbiana geral e da mineralização de nutrientes em resposta à adubação fosfatada e à presença dos MSP. Em contraste, a redução da atividade da fosfatase ácida e da arilsulfatase em presença de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> adicional é um comportamento amplamente reconhecido na ecologia microbiana do solo, representando uma estratégia de conservação de energia e recursos pelos microrganismos (LI et al., 2024). Quando o P inorgânico está prontamente disponível, a produção de enzimas que mobilizam P de fontes orgânicas ou de enxofre é reduzida (ALIPANAH et al., 2018).

A maior atividade de fosfatase ácida no controle e no tratamento 0 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + MSP, em particular na soja, corrobora que, em condições de menor disponibilidade de P, o solo e sua microbiota ativam mecanismos de mobilização de P orgânico para suprir as demandas das plantas (TABATABAI; DICK, 2002; RICHARDSON et al., 2022; WANG et al., 2023). A resiliência do teor de glomalina, glicoproteína essencial para a agregação do solo e produzida por fungos micorrízicos arbusculares (FMA), às variações nas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é relevante. Isso pode indicar uma estabilidade intrínseca da comunidade de FMA no Latossolo Vermelho estudado, ou que outros fatores, como a qualidade da matéria orgânica e a sucessão de culturas

soja-milho, desempenham um papel mais dominante na manutenção da glomalina (YANG et al., 2014; LI et al., 2022).

Em termos de implicações, este estudo avança o entendimento da interação entre a adubação fosfatada mineral e a inoculação com MSP em sistemas agrícolas tropicais. A demonstração clara dos benefícios de produtividade para o milho e da melhoria na qualidade dos grãos de soja (teor de P) ressalta o potencial da bioinoculação como estratégia para otimizar o uso de fósforo, reduzir a dependência de fertilizantes minerais e promover a sustentabilidade da produção agrícola (ZHANG et al., 2019; LIANG et al., 2024).

Os padrões observados nas atividades enzimáticas do solo oferecem ferramentas valiosas para monitorar a saúde do solo e a eficiência do manejo do P, agindo como bioindicadores da funcionalidade microbiana (WANG et al., 2023; DAUNORAS et al., 2024). Teoricamente, a resposta diferenciada entre culturas C3 e C4 fornece *insights* fundamentais sobre a ecofisiologia da nutrição de P (CUI, 2021) em sistemas de sucessão e/ou rotação de culturas, sugerindo que estratégias de manejo de MSP podem precisar ser ajustadas para cada espécie (JOBE et al., 2020).

Para pesquisas futuras, é aconselhável aprofundar a investigação através de estudos de longa duração para avaliar os efeitos residuais e a longo prazo da adubação fosfatada e dos MSP na fertilidade do solo e na dinâmica microbiana. É crucial identificar e caracterizar estirpes nativas e de alto desempenho de MSP para Latossolos brasileiros, além de avaliar suas interações com diferentes materiais genéticos de soja e milho. A otimização das doses e métodos de aplicação, bem como a investigação da sinergia entre MSP e outros bioinsumos, como fungos micorrízicos, poderia maximizar os benefícios. Além disso, a inclusão de análises de custo-benefício e impacto ambiental é indispensável para apoiar a aplicação desses resultados em práticas agrícolas em larga escala.

Sendo assim, a combinação de adubação fosfatada com microrganismos solubilizadores de fósforo em Latossolos Vermelhos apresenta um potencial promissor para otimizar o manejo do P, mostrando efeitos que variam significativamente entre culturas como soja e milho e modulando de forma dinâmica a bioquímica do solo. Os resultados destacam a complexidade das interações entre planta, microrganismo, solo e nutriente, reiterando que o sucesso da bioinoculação não depende apenas da presença do microrganismo, mas de sua integração sinérgica com práticas de adubação adequadas, abrindo caminho para sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

Os resultados deste estudo confirmam, em parte, as hipóteses propostas, evidenciando que a associação entre *Bacillus subtilis*, *Priestia megaterium* e o fertilizante monoamônio

fosfato (MAP) promove benefícios expressivos no uso eficiente do fósforo no sistema de sucessão soja-milho. Na cultura do milho, a aplicação de MAP associada aos microrganismos solubilizadores de fósforo (MSP) resultou em aumento significativo na produtividade de grãos e nos teores de P foliar, especialmente nas doses mais altas, confirmando a primeira hipótese para essa cultura. Na soja, embora os efeitos sobre a produtividade tenham sido menos consistentes, observou-se incremento linear nos teores de P nos grãos, destacando a contribuição da bioinoculação para a qualidade nutricional da produção.

A segunda hipótese, de que o uso integrado de MSP e adubação fosfatada permite reduzir as doses de fertilizantes minerais sem comprometer o desempenho agrônômico, foi parcialmente corroborada. Em ambos os cultivos, os tratamentos com doses intermediárias de MAP + MSP mantiveram produtividade semelhante ao controle absoluto, enquanto o tratamento com MSP na ausência de fósforo mineral foi capaz de aumentar a disponibilidade de P no solo, evidenciando o potencial dos microrganismos na liberação de formas nativas de fósforo.

Quanto à terceira hipótese, os dados demonstram que a integração entre MSP e adubação fosfatada modulou positivamente indicadores de sustentabilidade, como a atividade de enzimas do solo (especialmente  $\beta$ -glicosidase e fosfatases) e a dinâmica do P disponível, reafirmando a relevância dessa prática no contexto da agricultura regenerativa e sustentável.

Por fim, a aplicação conjunta de adubação fosfatada e microrganismos solubilizadores de fósforo em Latossolos Vermelhos demonstra um potencial promissor para otimizar o manejo do P, com efeitos que variam significativamente entre culturas como soja e milho e modulam dinamicamente a bioquímica do solo. Os resultados evidenciam a complexidade das interações planta-MSP-solo-nutriente, reiterando que o sucesso da bioinoculação não reside apenas na presença do microrganismo, mas em sua integração sinérgica com práticas de adubação adequadas, abrindo caminho para sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

## **5 CONCLUSÃO**

A adubação fosfatada associada a MSP contribui para o uso mais eficiente do fósforo, melhora aspectos nutricionais e produtivos e influencia positivamente a atividade bioquímica do solo, configurando-se como uma estratégia promissora para o manejo sustentável da adubação fosfatada em sistemas de sucessão soja-milho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELUPO, S. A. et al. Effect of phosphate solubilizing bacteria on soil phosphorus availability and maize (*Zea mays* L.) growth. **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1625, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10111625.
- ALIPANAH, L. et al. Molecular adaptations to phosphorus deprivation and comparison with nitrogen deprivation responses in the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. **PLOS ONE**, v. 13, n. 2, e0193335, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0193335.
- ARAÚJO, F. F. Inoculação de sementes com *Bacillus subtilis* formulado com farinha de ostras e desenvolvimento de milho, soja e algodão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 456–462, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000200017.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Sistemas de produção de milho safrinha em sucessão à soja: aspectos agronômicos e socioeconômicos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 3, p. 471–486, 2018. DOI: 10.18512/rbms2018v17n31221.
- BALOCH, N. Microbial contributions to maize crop production: a comprehensive review of challenges and future perspectives. **Discover Agriculture**, v. 3, n. 1, 2025. DOI: 10.1007/s44279-025-00164-0.
- BENEDUZI, A. et al. Genetic and phenotypic diversity of plant-growth-promoting bacilli isolated from wheat fields in southern Brazil. **Research in Microbiology**, v. 159, p. 244–250, 2008. DOI: 10.1016/j.resmic.2007.12.007.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248–254, 1976. DOI: 10.1016/0003-2697(76)90527-3.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil phosphorus: characterization and management for sustainable crop production. **Soil Use and Management**, v. 32, supl. 1, p. 39–48, 2016. DOI: 10.1111/sum.12270.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/2024 – 8º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, maio 2024. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 8 jun. 2025.
- CUI, H. Challenges and approaches to crop improvement through C3-to-C4 engineering. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.715391.
- DAUNORAS, J.; GUDIUKAITĖ, R.; KAČERGIUS, A. Role of soil microbiota enzymes in soil health and activity changes depending on climate change and the type of soil ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 2, p. 85, 2024. DOI: 10.3390/biology13020085.
- ECHEVERRIA, M. et al. Isolation and characterization of dematiaceous endophytic fungi isolated from barley (*Hordeum vulgare* L.) roots and their potential use as phosphate solubilizers. **MethodsX**, v. 11, p. 102434, 2024. DOI: 10.1016/j.mex.2024.102434.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, jan. 1988. DOI: 10.1016/0038-0717(88)90040-X.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, n. 3, p. 167–172, jan. 1977. DOI: 10.1016/0038-0717(77)90002-X.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja e milho**: desempenho das safras 2023/2024. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: [www.embrapa.br](http://www.embrapa.br). Acesso em: 8 jun. 2025.

FREITAS, S. A. et al. Microbial phosphorus solubilization: unveiling feedback mechanisms under varying P availability. **Environmental Microbiology Reports**, v. 15, n. 5, p. 789–801, 2023. DOI: 10.1111/1758-2229.13204.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**: culturas temporárias e permanentes 2023/2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 8 jun. 2025.

IQBAL, B. et al. The high phosphorus incorporation promotes the soil enzymatic activity, nutritional status, and biomass of the crop. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 32, n. 3, p. 2125–2139, 2023. DOI: 10.15244/pjoes/158765.

JOBE, T. O. et al. Ensuring nutritious food under elevated CO<sub>2</sub> conditions: a case for improved C<sub>4</sub> crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.01267.

KALYANI, V. R. et al. Phosphate solubilizing microorganisms and their role in sustainable agriculture - a review. **Microbiological Research**, v. 251, p. 126824, 2021. DOI: 10.1016/j.micres.2021.126824.

KOPP, H. A. et al. Avaliação da produção de mudas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) mediante inoculação e coinoculação com *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* e *Bacillus aryabhatai*. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 23, n. 12, p. 1–10, 2024. DOI: 10.52850/rel.v23e.1492.

KRUEGER, K. et al. Phosphorus and potassium fertilization effects on soybean seed quality and composition. **Crop Science**, v. 53, n. 2, p. 602–610, 2013. DOI: 10.2135/cropsci2012.06.0372.

LI, Q.; ZHANG, Y.; CHEN, H. Soil enzyme activities as affected by phosphorus fertilization: a meta-analysis. **Applied Soil Ecology**, v. 197, p. 105256, 2024. DOI: 10.1016/j.apsoil.2023.105256.

LI, Y. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin play a crucial role in soil aggregate stability in Pb-contaminated soil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 9, p. 5029, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19095029.

LIANG, C. et al. The impact of different phosphorus fertilizers varieties on yield under wheat–maize rotation conditions. **Agronomy**, v. 14, n. 6, p. 1317, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14061317.

- LIMA, A. T. S. et al. Doses de fósforo e inoculação com solubilizadores no milho. **Revista Cultivando o Saber**, v. 15, n. 1, p. 89–100, 2022. Disponível em: revistas.ifg.edu.br. Acesso em: 27 mai. 2025.
- LOPES, A. A.; MARTINS, J. P.; REZENDE, R. S. Expansão e sustentabilidade da sojicultura em Goiás: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 13, n. 1, p. 45–58, 2023. Disponível em: revistas.ifg.edu.br. Acesso em: 27 mai. 2025.
- LOPES SOBRINHO, O. P. et al. Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 16, v. 27, p. 19–33, jul./dez. 2020. DOI: 10.5380/rbclima.v27i0.73030.
- MARIN, R. S. F. et al. Efeito da adubação fosfatada na produção de semente de soja. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 308–315, mai./jun. 2015. DOI: 10.1590/0034-737X201562030006.
- MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MARULANDA, A.; BAREA, J. M.; AZCÓN, R. Regulation of plasma membrane aquaporins by inoculation with a *Bacillus megaterium* strain in maize (*Zea mays* L.) plants under unstressed and salt-stressed conditions. **Planta**, v. 232, p. 533–543, 2010. DOI: 10.1007/s00425-010-1200-2.
- MENDES, I. C. et al. **Bioanálise de solo**: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. (Circular Técnica, 38).
- NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J.; HUNGRIA, M. **Bactérias promotoras de crescimento de plantas**: inovação para agricultura tropical. Londrina: Embrapa Soja, 2020. (Documentos / Embrapa Soja, 410).
- NOVAIS, R. F. et al. Fósforo em solos submetidos ao plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 787–794, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000500008.
- NOVOTNY, E. H. et al. Phosphorus in Brazilian soils: availability and environmental risks. **Ambio**, v. 49, p. 1195–1208, 2020. DOI: 10.1007/s13280-020-01375-9.
- OLIVEIRA, D. P.; ROCHA, I. V.; SILVA, E. A. Efeito de microrganismos solubilizadores de fósforo na produtividade de soja em solo tropical. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 3, p. 1–9, 2021. DOI: 10.22491/rca.2021.v44.n3.e1069.
- OLIVEIRA, J. F.; DE LIMA, R. L. S.; NASCIMENTO, F. A. Phosphorus dynamics and availability in tropical soils: Challenges and advances. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1812, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11091812.
- OWEN, D. et al. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 41–54, 2015. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.10.016.
- PAVINATO, P. S. et al. **Acúmulo de fósforo no solo em áreas agrícolas no Brasil**: Diagnóstico atual e potencialidades futuras. Informações Agronômicas (NPCT), n. 9, 56 p., 2021.

PEIXOTO, R. S. et al. A land use and its contributions to changes in chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 98, n. 3, p. 403–413, 2010. DOI: 10.1007/s10482-010-9492-z.

PEREIRA, L. F.; ARAÚJO, H. R.; MENEZES, D. J. Manejo integrado de fósforo no sistema soja-milho: implicações para a fertilidade do solo em Goiás. **Ciência do Solo e Nutrição de Plantas**, v. 12, n. 2, p. 100–115, 2023.

PEREIRA, M. G. et al. Interactions between phosphate fertilization and phosphate-solubilizing microorganisms: implications for sustainable agriculture. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 180, p. 108566, 2023. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.108566.

PRASANNA, C. L. et al. Engineering C4 photosynthesis pathways into C3 crops to improve nutrient use efficiency: a review. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 47, n. 4, p. 374–381, 2025. DOI: 10.9734/jeai/2025/v47i43387.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: [www.r-project.org](http://www.r-project.org). Acesso em: 27 jul. 2024.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 665–693, 1999. DOI: 10.1146/annurev.arplant.50.1.665.

RAWAT, P. et al. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 49–68, 2020. DOI: 10.1007/s42729-020-00342-7.

RAYMOND, N. S. et al. Phosphate-Solubilizing Microorganisms for Improved Crop Productivity: A Critical Assessment of Current Status and Future Perspectives. In: AHMAD, P.; DAR, R. A.; SINGH, A. L. (Eds.). **Biotechnological Approaches to Combatting Soil Stress**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 251–267. DOI: 10.1007/978-981-15-0678-0\_12.

RIBEIRO, V. P. et al. Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49S, p. 40–46, 2018. DOI: 10.1016/j.bjm.2017.07.009.

RICHARDSON, A. E.; GEORGE, T. S.; SIMPSON, R. J. Organic anions facilitate the mobilization of soil organic phosphorus and its subsequent lability to phosphatases. **Plant and Soil**, v. 476, n. 1–2, p. 161–180, 2022. DOI: 10.1007/s11104-022-05405-5.

RICHARDSON, A. E. et al. Phosphorus acquisition from soil by plants and microbes. **Plant Physiology**, v. 149, n. 3, p. 1090–1099, 2009. DOI: 10.1104/pp.108.133248.

RODRIGUES, R. M.; SILVA, I. R. Microrganismos solubilizadores de fósforo: uma abordagem para o manejo sustentável de nutrientes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 3, p. e202181, 2021. DOI: 10.22491/rca.2021.v44.n3.e202181.

ROMAGNA, I. S. et al. Bioestimulantes em sementes de olerícolas submetidos a testes de germinação e vigor. **Scientia Plena**, v. 15, n. 10, 2019. DOI: 10.14808/sci.plena.2019.100201.

ROSOLEM, C. A. et al. Diagnose visual de deficiências de nutrientes em soja. In: **Nutrição mineral e adubação da soja**. Piracicaba: Potafos, 2006. p. 45–55.

SÁ, M. E. et al. Nutrição mineral e diagnóstico foliar na cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160406, 2017. DOI: 10.1590/18069657rbc20160406.

SANTOS, E. L. T. et al. Quantificação de enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase em solos sob sistema agroecológico de produção no estado de Sergipe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 12., 2024, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABA, 2024. v. 19, n. 1.

SANTOS, F. C. et al. Phosphorus fertilization in soybean crops: response and recommendations. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 1–15, 2021. DOI: 10.1007/s42729-021-00627-8.

SANTOS, J. P.; MENDES, F. A.; OLIVEIRA, R. M. Genetic variability and environmental interaction impact on soybean yield components in tropical regions. **Brazilian Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 1, p. 45–58, 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE GOIÁS. **Boletim técnico da safra 2023/2024**: soja e milho em Goiás. Goiânia: SEAPA-GO, 2024. Disponível em: [www.agricultura.go.gov.br](http://www.agricultura.go.gov.br). Acesso em: 8 jun. 2025.

SHARMA, S.; KUMARI, N.; PRASAD, B. P. Phosphate solubilising microorganisms as potential biofertilizer: a review. **Agricultural Reviews**, v. 44, n. 1, p. 84–88, 2023. DOI: 10.18805/ag.R2110.

SHIMIZU, G.; MARUBAYASHI, R.; GONCALVES, L. **AgroR**: experimental statistics and graphics for agricultural sciences. R package version 1.3.6, 2024. Disponível em: [cran.r-project.org](http://cran.r-project.org). Acesso em: 27 jul. 2024.

SILVA, M. R.; OLIVEIRA, F. J.; COSTA, T. D. Eficiência do uso de nutrientes e sustentabilidade do sistema soja-milho no Cerrado brasileiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 45, n. 4, p. 129–140, 2022. DOI: 10.22491/rca.2022.v45.n4.e1069.

SILVEIRA, A. O. **Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2007.

SILVEIRA, C. P. et al. Microbial solution of growth-promoting bacteria sprayed on monoammonium phosphate for soybean and corn production. **Agronomy**, v. 13, p. 581, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13020581.

SINGH, S. K. et al. Phosphorus nutrition affects temperature response of soybean growth and canopy photosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 2021, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01116.

SIQUEIRA, J. O. et al. Phosphorus dynamics in Brazilian soils: concepts, management, and environmental quality. In: **Phosphorus in Action**. Cham: Springer, 2019. p. 77–99. DOI: 10.1007/978-3-030-15100-2\_5.

- SLEPECKY, R. A.; HEMPHILL, H. E. The genus *Bacillus*: Nonmedical. In: DWORKIN, M. et al. (Ed.). **The Prokaryotes**. New York: Springer, 2006. v. 4, p. 530–562. DOI: 10.1007/0-387-30744-3\_16.
- SOUSA, R. M. de; FERREIRA, L. F. P.; SILVA, I. P. E. Microrganismos solubilizadores de fósforo e sua aplicação na agricultura tropical. **Ciência Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 112–120, 2022.
- STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: **Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaptation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. v. 25, p. 445–483. DOI: 10.1007/0-306-48138-9\_25.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase Activity of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, n. 2, p. 225–229, mar. 1970. DOI: 10.2136/sssaj1970.03615995003400020023x.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TAVANTI, T. R. et al. Yield and quality of soybean seeds inoculated with *Bacillus subtilis* strains. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 65–71, 2020. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p65-71.
- VANCE, C. P.; KRAHMER, H.; HOOGENBOOM, G. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423–447, 2003. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00725.x.
- VASSILEV, N. et al. Biofertilizers for sustainable agriculture: production, application and future perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 3, p. 1201–1211, 2020. DOI: 10.1007/s00253-019-10332-x.
- VEN, A. et al. Experimental evidence that phosphorus fertilization and arbuscular mycorrhizal symbiosis can reduce the carbon cost of phosphorus uptake. **Functional Ecology**, v. 33, n. 11, p. 2215–2225, 2019. DOI: 10.1111/1365-2435.13452.
- VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Campo Digital: Revista de Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 37–44, dez. 2013.
- WANG, C. et al. Phosphorus solubilizing microorganisms: potential promoters of agricultural and environmental engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, 2023. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1189953.
- WANG, L.; GUO, J.; ZHAO, S. Soil carbon cycling and microbial enzyme activities under sustainable agricultural practices. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 1–15, 2023. DOI: 10.1007/s42729-022-01046-6.
- WICKHAM, H. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. New York: Springer-Verlag, 2016.

WITHERS, P. J. A. et al. Agricultural phosphorus and water quality: a review of global issues and potential mitigation strategies. **Chemosphere**, v. 120, p. 425–431, 2015. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.014.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 198, p. 97–107, 1998. DOI: 10.1023/A:1004312814881.

YANG, G. et al. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and soil phosphorus availability influences plant community productivity and ecosystem stability. **Journal of Ecology**, v. 102, n. 4, p. 1072–1082, 2014. DOI: 10.1111/1365-2745.12249.

ZHANG, P. et al. Effect of soybean and maize rotation on soil microbial community structure. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 42, 2019. DOI: 10.3390/agronomy9020042.