

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**AVALIAÇÃO DO BIOMAPHOS SOBRE OS ATRIBUTOS
QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO E O
DESEMPENHO DE FORRAGEIRAS NO CERRADO**

JERUSA CARIAGA ALVES

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2025**

**AVALIAÇÃO DO BIOMAPHOS SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS E
BIOLÓGICOS DO SOLO E O DESEMPENHO DE FORRAGEIRAS NO
CERRADO**

Jerusa Cariaga Alves
Mestre Engenheira Agrônoma

Orientadora: PROF^a. DR^a. ALESSANDRA MAYUMI TOKURA ALOVISI
Coorientador: Dr. CARLOS HISSAO KURIHARA

Tese apresentada à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Agronomia -
Produção Vegetal, para obtenção do título de
Doutora.

Dourados
Mato Grosso do Sul

AVALIAÇÃO DO BIOMAPHOS SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO E O DESEMPENHO DE FORRAGEIRAS NO CERRADO

por

JERUSA CARIAGA ALVES

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTORA EM AGRONOMIA

Aprovada em: 03/07/2025.

Documento assinado digitalmente
 **ALESSANDRA MAYUMI TOKURA ALOVISI**
Data: 26/08/2025 17:04:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Alessandra Mayumi T. Alovisei
Orientadora – UFGD/ FCA

Documento assinado digitalmente
 **CLEIDIMAR JOAO CASSOL**
Data: 25/08/2025 10:08:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleidimar João Cassol
Escola Indígena Rosana Cinta Larga

Documento assinado digitalmente
 **ANDREIA CRISTINA MATHEUS**
Data: 25/08/2025 19:23:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Andreia Cristina Matheus
UNICAMP

Documento assinado digitalmente
 **LAERCIO SANTOS SILVA**
Data: 26/08/2025 09:45:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Laércio Santos Silva
UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 **MAXIMILIANO KAWAHATA PAGLIARINI**
Data: 26/08/2025 17:46:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Maximiliano Kawahata Pagliarini
UFGD/FAECA

"Tem mais gente para comer."

Valmiro Alves

*A Deus e à minha família Cariaga Alves: Valmiro, Irene,
Jessica, Cecília e João*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À São Jorge e à Nossa Senhora de Caacupê, por abrirem meus caminhos.

À Universidade Federal da Grande Dourados, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelos anos de parceria e aprendizado.

À Profa. Dra. Alessandra Mayumi T. Alovisei, pela orientação, ensinamentos e confiança. Serei eternamente grata por me permitir alcançar este sonho.

Ao Prof. Dr. Carlos Hissao Kurihara, pela coorientação e por todo o suporte durante esta pesquisa.

A todo o corpo docente e aos técnicos de laboratório do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Produção Vegetal — em especial João Augusto Machado da Silva e Camila Farah Borges da Silva — pelos ensinamentos e contribuições ao longo da minha formação.

À minha amiga Natália Dias, pelas horas de estudo, planos e lágrimas compartilhadas.

Aos amigos e familiares que estiveram comigo nessa jornada, em especial Diógenes Egídio Cariga, Lauriene Seraguza, Claudia Cariaga e Roberta Alves. Ao querido Maximiliano Kawahata Pagliarini e a Fábio da Silva Ribeiro, fundamentais na reta final deste processo — meu Muito Obrigada!

À CAPES, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos.

À banca examinadora, pelas valiosas contribuições.

E a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. **Aguejê!**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

A474a Alves, Jerusa Cariaga

Avaliação do Biomaphos sobre os atributos químicos e biológicos do solo e o desempenho de forrageiras no cerrado [recurso eletrônico] / Jerusa Cariaga Alves. -- 2025.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Alessandra Mayumi Tokura Alovisei.

Coorientadora: Carlos Hissao Kurihara.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

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

1. Bioinoculante. 2. Megathyrus maximus. 3. Urochloa brizantha. 4. frações de fósforo. I. Alovisei, Alessandra Mayumi Tokura. II. Kurihara, Carlos Hissao. III. Título.

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

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. HIPÓTESE	18
3. OBJETIVOS.....	18
3.1. Objetivo Geral.....	18
3.2. Objetivos Específicos	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1. Importância da pecuária brasileira.....	19
4.2. Relevância das forrageiras no Cerrado	19
4.3. Caracterização das cultivares estudadas	20
4.3.1 <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu	20
4.3.2 <i>Megathyrus maximus</i> cv. BRS Zuri	22
4.5. Desafios dos solos do Cerrado.....	23
4.6. Importância do fósforo (P) na pecuária	25
4.7. Desafios do uso de fertilizantes fosfatados.....	27
4.8. O uso de bioinsumos	28
4.9. Uso de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSF)	29
4.10. O inoculante BiomaPhos	31
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
5.1 Caracterização da área amostrada.....	34
5.2. Experimento	35
5.3 Análise vegetal	36
5.4 Análise química e enzimática do solo	37
5.5 Fracionamento de fósforo.....	38
5.6. Análise estatística.....	38
6. RESULTADOS E DISCUSÃO.....	40
6.1 Análise química e enzimática do solo	40
6.2 Análise vegetal.....	49
6.3 Fracionamento de fósforo.....	52
7. CONCLUSÃO	60

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) e mínimas (T_{min}) e precipitação pluviométrica mensal no período de janeiro de 2022 a março de 2023 na região de Dourados. Fonte: EMBRAPA Agropecuária Oeste, Dourados, 2025.....	34
---	----

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1.** Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento, nas profundidades de 0–20, 20-40 e 40-60 cm, antes da aplicação dos tratamentos. Dourados, 2025. 35
- TABELA 2.** Alterações nos atributos do pH (em água e CaCl₂) e matéria orgânica (MO) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu), sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos. 40
- TABELA 3.** Alterações nos atributos do cálcio (Ca), magnésio (Mg) e soma dos teores de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu), sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos. 42
- TABELA 4.** Alterações nos atributos da saturação por bases (V%), carbono total (C total) e nitrogênio total (N total) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos. 43
- TABELA 5.** Alterações nos atributos do fósforo (P) e potássio (K) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos. 44
- TABELA 6.** Atividade das enzimas β-glicosidase, sulfatase e fosfatase na camada de 0–10 cm do solo, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* cv. Marandu — sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. 47

TABELA 7. Acúmulo de fósforo no limbo foliar, altura média de plantas e massa seca da parte aérea, em duas espécies de forrageiras <i>Megathyrsus maximus</i> (syn. <i>Panicum maximum</i> Jacq.) cv. BRS Zuri e <i>Urochloa brizantha</i> (syn. <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. Ex Rich.) Stapf) cv. Marandu — sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024.....	50
TABELA 8. Teor de P lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras <i>Megathyrsus maximus</i> (syn. <i>Panicum maximum</i> Jacq.) cv. BRS Zuri e <i>Urochloa brizantha</i> (syn. <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos.....	52
TABELA 9. Teor de P moderadamente lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras <i>Megathyrsus maximus</i> (syn. <i>Panicum maximum</i> Jacq.) cv. BRS Zuri e <i>Urochloa brizantha</i> (syn. <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, s sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024....	56
TABELA 10. Teor de P não lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras <i>Megathyrsus maximus</i> (syn. <i>Panicum maximum</i> Jacq.) cv. BRS Zuri e <i>Urochloa brizantha</i> (syn. <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, s sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024.	57

ALVES, J. C. **Avaliação do BiomaPhos sobre os atributos químicos e biológicos do solo e o desempenho de forrageiras no Cerrado**. 68f. 2025. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

RESUMO: A pecuária brasileira ocupa posição de liderança mundial na produção e exportação de carne bovina in natura, sustentada predominantemente por sistemas extensivos de pastagens tropicais. Esse desempenho está associado a contínuos investimentos em tecnologias agropecuárias, incluindo o desenvolvimento de cultivares forrageiras adaptadas e bioinsumos. Entre as estratégias promissoras para elevar a produtividade de sistemas pecuários em solos de baixa fertilidade do Cerrado, destaca-se o uso de inoculantes microbianos solubilizadores de fósforo, como o BiomaPhos. Este bioinsumo nacional é formulado com cepas de *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084), microrganismos reconhecidos por sua capacidade de aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e promover o crescimento vegetal. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes doses do BiomaPhos (0, 250, 500, 750 e 1.000 mL ha⁻¹), aplicadas em conjunto com 50% da dose recomendada de fósforo (P₂O₅), sobre atributos químicos e biológicos do solo, frações de fósforo e o desempenho morfológico das forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri, cultivadas em Latossolo Vermelho distrófico representativo do Cerrado. O experimento foi conduzido em vasos de PVC a céu aberto, entre 2022 e 2023, na Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados-MS, utilizando delineamento de blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. As camadas de solo (40–60, 20–40 e 0–20 cm). Durante o ciclo experimental, foram realizados quatro cortes das forrageiras, com mensuração da altura, determinação da massa de matéria seca e teor de fósforo foliar. Foram conduzidas análises químicas e biológicas do solo, incluindo pH, nutrientes (Ca, Mg, K, P), carbono total, nitrogênio total e atividade da enzima β -glicosidase. Adicionalmente, foi realizado fracionamento do fósforo conforme Hedley et al. (1982), para avaliação das formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis do nutriente. Os resultados demonstraram que a inoculação com BiomaPhos promoveu melhorias significativas nos atributos biológicos e químicos do solo, com respostas diferenciadas entre as espécies forrageiras. A cultivar *Urochloa brizantha* cv. Marandu apresentou maior acúmulo de matéria orgânica (32,60), carbono (1,89), além de elevada atividade da enzima β -glicosidase (41,30), favorecendo a absorção de fósforo no limbo foliar (102,88) e o acúmulo de biomassa (335,21). Por sua vez, *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri destacou-se pela eficiente mobilização das frações lábeis de fósforo, indicando maior interação rizosférica com os microrganismos. As doses de 750 e 1.000 mL ha⁻¹ do BiomaPhos foram as mais eficientes na melhoria dos atributos químicos e biológicos do solo, sobretudo quando associadas à BRS Zuri. Os resultados indicam que a adoção do inoculante fosfatado, em conjunto com espécies forrageiras adaptadas, representa uma estratégia viável para promover melhorias na qualidade do solo, na ciclagem de nutrientes e na redução da dependência de fertilizantes minerais fosfatados em solos do Cerrado.

Palavras-chave: Bioinoculante, *Megathyrsus maximus*, *Urochloa brizantha*, frações de fósforo.

ALVES, J. C. **Effects of biomaPhos on soil chemical and biological attributes and forage grass performance in the Cerrado**. 68f. 2025. Thesis (Doctorate in Agronomy), Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS.

ABSTRACT: Brazilian livestock farming occupies a leading position worldwide in the production and export of fresh beef, sustained predominantly by extensive tropical pasture systems. This performance is associated with continuous investments in agricultural technologies, including the development of adapted forage cultivars and bio-inputs. Among the promising strategies to increase the productivity of livestock systems in low-fertility soils in the Cerrado region, the use of phosphorus-solubilizing microbial inoculants, such as BiomaPhos, stands out. This national bioinput is formulated with strains of *Bacillus megaterium* (BRM 119) and *Bacillus subtilis* (BRM 2084), microorganisms recognized for their ability to increase phosphorus availability in the soil and promote plant growth. This study aimed to evaluate the effects of different doses of BiomaPhos (0, 250, 500, 750, and 1,000 mL ha⁻¹), applied in conjunction with 50% of the recommended dose of phosphorus (P₂O₅), on the chemical and biological attributes of the soil, phosphorus fractions, and the morphological performance of the forage plants *Urochloa brizantha* cv. Marandu and *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri, grown in dystrophic Red Latosol representative of the Cerrado. The experiment was conducted in open-air PVC pots between 2022 and 2023 at Embrapa Agropecuária Oeste in Dourados-MS, using a randomized block design with subdivided plots and four replicates. The soil layers (40–60, 20–40, and 0–20 cm). During the experimental cycle, four cuts of the forage plants were made, with measurement of height, determination of dry matter mass, and leaf phosphorus content. Chemical and biological analyses of the soil were conducted, including pH, nutrients (Ca, Mg, K, P), total carbon, total nitrogen, and β -glycosidase enzyme activity. Additionally, phosphorus fractionation was performed according to Hedley et al. (1982) to evaluate the labile, moderately labile, and non-labile forms of the nutrient. The results showed that inoculation with BiomaPhos promoted significant improvements in the biological and chemical attributes of the soil, with different responses among the forage species. The cultivar *Urochloa brizantha* cv. Marandu showed greater accumulation of organic matter (32.60), carbon (1.89), and high β -glycosidase enzyme activity (41.30), favoring phosphorus absorption in the leaf blade (102.88) and biomass accumulation (335.21). In turn, *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri stood out for its efficient mobilization of labile phosphorus fractions, indicating greater rhizospheric interaction with microorganisms. The 750 and 1,000 mL ha⁻¹ doses of BiomaPhos were the most efficient in improving the chemical and biological attributes of the soil, especially when associated with BRS Zuri. The results indicate that the adoption of phosphate inoculant, in conjunction with adapted forage species, represents a viable strategy for promoting improvements in soil quality, nutrient cycling, and reducing dependence on phosphate mineral fertilizers in Cerrado soils.

Key-words: Bioinoculant; *Megathyrsus maximus*; *Urochloa brizantha*; Soil phosphorus fractions

1. INTRODUÇÃO

A bovinocultura de corte é uma das principais atividades econômicas do Brasil, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio, a geração de empregos e a segurança alimentar global. O país lidera as exportações mundiais de carne bovina in natura, com destaque para os estados da região Centro-Oeste, que concentram expressivos rebanhos e extensas áreas destinadas à pecuária (ABIEC, 2024; IBGE, 2024). Esse desempenho reflete os avanços na pesquisa agropecuária, especialmente no desenvolvimento de tecnologias voltadas ao manejo alimentar, melhoramento genético, práticas conservacionistas de solo e uso de insumos mais eficientes, como fertilizantes e bioinoculantes (MALAFAIA; BISCOLA, 2023; MENDES et al., 2024).

Nos últimos anos, frente à crescente demanda global por alimentos produzidos de forma sustentável, o setor pecuário tem buscado aumentar sua produtividade sem expandir a fronteira agrícola. Nesse contexto, práticas como o manejo integrado do solo, o uso racional de fertilizantes e a adoção de bioinsumos vêm sendo incorporadas às estratégias produtivas, visando à conservação dos recursos naturais, à resiliência dos sistemas e à mitigação dos impactos ambientais (VIEIRA FILHO, 2018; GIOVELLI; TABALDI, 2023).

A base alimentar dos bovinos no Brasil está nas pastagens, com destaque para as forrageiras tropicais dos gêneros *Urochloa* e *Megathyrsus*, amplamente utilizadas devido à sua adaptabilidade a solos ácidos e de baixa fertilidade, típicos das regiões tropicais (EMBRAPA, 2014; JANK et al., 2022).

A cultivar *Urochloa brizantha* cv. Marandu destaca-se por sua rusticidade, elevada produção de forragem, resistência às cigarrinhas-das-pastagens e ampla aceitação no mercado, representando cerca de 78% das sementes comercializadas (JANK et al., 2022). Por sua vez, *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri apresenta excelente qualidade bromatológica, arquitetura favorável ao pastejo e elevada resposta à adubação, características que têm impulsionado sua adoção em sistemas intensivos (EMBRAPA, 2018; EUCLIDES et al., 2021; CÔRTEZ et al., 2022).

Entretanto, a baixa fertilidade dos solos do Cerrado representa um dos principais entraves à sustentabilidade dos sistemas pastoris. Esses solos são altamente intemperizados, com elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e deficiências severas de fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (EMBRAPA, 1999; SILVA et al., 2018).

Em solos argilosos, o fósforo tende a ficar fortemente adsorvido a óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), o que reduz sua disponibilidade para as plantas (MENDES; REIS JÚNIOR, 2003), enquanto, em solos arenosos, a limitação decorre da baixa reserva mineral e da maior suscetibilidade à lixiviação (PEREIRA; POLOZEL, 2016; BLÖSKA, 2017; CANÇADO et al., 2021).

Diante dessas limitações, o uso de fertilizantes fosfatados tem sido uma prática recorrente. No entanto, seu elevado custo, o risco de contaminação ambiental e os impactos negativos sobre a microbiota do solo tornam necessária a busca por alternativas mais sustentáveis (MALAVOLTA, 2006; MATTOS, 2015; RAWAT et al., 2021).

O uso de bioinsumos no Brasil tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, consolidando-se como estratégia-chave para promover a sustentabilidade dos sistemas agroalimentares, reduzir impactos ambientais e fortalecer a agrobiodiversidade (SAMBUICHI et al., 2024). Derivados de microrganismos, extratos vegetais ou compostos de origem biológica, esses insumos constituem alternativa promissora à dependência de fertilizantes químicos, especialmente em um país com vasta biodiversidade e elevado potencial para sua produção.

No entanto, sua expansão ainda enfrenta desafios estruturais e institucionais relevantes, como entraves regulatórios, dado que, em grande parte, os biofertilizantes estão submetidos ao mesmo marco legal dos agrotóxicos convencionais, implicando processos de registro onerosos, demorados e pouco adaptados às especificidades biológicas (SAMBUICHI et al., 2024; BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024) e a concentração geográfica da produção nas regiões Sul e Sudeste, que limita o acesso de agricultores de outras regiões, como Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

Nesse contexto, o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, constitui uma política estratégica ao fomentar pesquisa, inovação e descentralização produtiva, buscando adaptar a regulamentação às particularidades regionais (BRASIL, 2020).

Entre as inovações resultantes desse avanço, destaca-se o BiomaPhos, desenvolvido pela Embrapa Milho e Sorgo, um bioinoculante composto por *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*, microrganismos capazes de solubilizar fósforo inorgânico, mineralizar fósforo orgânico e estimular o crescimento radicular (OLIVEIRA-PAIVA et al.,

2021; SOUSA et al., 2021; MENDES et al., 2022). Esses bacilos produzem ácidos orgânicos e enzimas fosfatases que liberam o fósforo retido no solo, aumentando sua disponibilidade para as plantas e reduzindo a dependência de adubos minerais (GUIMARÃES et al., 2023a; 2023b). A consolidação de tecnologias como o BiomaPhos depende, portanto, da superação das barreiras regulatórias, logísticas e socioeconômicas, de forma a integrar a inovação biotecnológica ao manejo sustentável da agropecuária brasileira.

Estudo recentes demonstram que a inoculação com BiomaPhos pode aumentar significativamente o acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais, a produção de biomassa aérea e radicular, além de melhorar a eficiência de aproveitamento do fósforo aplicado (GUIMARÃES et al., 2023b). Esses resultados reforçam o potencial do inoculante como uma alternativa viável, econômica e ambientalmente segura à adubação fosfatada convencional, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas pecuários. Além disso, o uso de microrganismos benéficos favorece a diversidade funcional do solo, melhora suas propriedades biológicas e aumenta a resiliência dos sistemas frente a estresses ambientais, como seca e degradação física (OLIVEIRA- PAIVA, 2020; RAWAT et al., 2021).

Segundo Mendes et al. (2022), o uso de bioinsumos comerciais à base de *Bacillus* spp. tem se mostrado uma estratégia promissora, sobretudo em culturas de alta demanda nutricional, como a soja e gramíneas tropicais. A eficiência desses microrganismos está relacionada à sua capacidade de solubilizar fosfatos, produzir metabólitos secundários e estimular o desenvolvimento do sistema radicular, favorecendo a absorção de fósforo mesmo em ambientes edáficos caracterizados por elevada fixação desse nutriente.

Diante desse contexto, considerando as limitações impostas pela baixa disponibilidade de fósforo no solo e a necessidade de intensificar a produção pecuária de forma sustentável, torna-se essencial aprofundar o conhecimento sobre o uso de inoculantes como estratégia complementar ou substitutiva à fertilização química.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de BiomaPhos, em diferentes doses, sobre os atributos químicos e biológicos do solo e sobre o desempenho morfológico das cultivares *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri, em Latossolo Vermelho distrófico representativo da região do Cerrado.

2. HIPÓTESE

A inoculação com as cepas *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084), presentes no bioinoculante BiomaPhos, associada a diferentes doses do produto, é capaz de modificar significativamente a dinâmica das frações de fósforo em Latossolo Vermelho distróférico, estimular a atividade enzimática do solo e favorecer o desenvolvimento morfológico das forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri. Esses efeitos contribuem para a melhoria dos atributos biológicos e para o aumento da eficiência no uso do fósforo, em condições edafoclimáticas típicas do Cerrado.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência agronômica do inoculante BiomaPhos, formulado com as cepas *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084), sobre a dinâmica das frações de fósforo no solo, a atividade enzimática e o desenvolvimento morfológico das forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri, cultivadas em Latossolo Vermelho distróférico representativo do Cerrado brasileiro.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os efeitos da inoculação com *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084) sobre as frações de fósforo no Latossolo Vermelho distróférico;

Analisar os impactos da inoculação no desenvolvimento morfológico das forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri;

Avaliar os efeitos da inoculação na atividade enzimática do solo, com ênfase nas enzimas relacionadas aos ciclos do carbono, fósforo e enxofre, em áreas cultivadas com as referidas forrageiras.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Importância da pecuária brasileira

A bovinocultura de corte posiciona o Brasil como líder mundial na produção e exportação de carne bovina in natura, desempenhando um papel estratégico na segurança alimentar global (ABIEC, 2024; IBGE, 2024; MENDES et al., 2024). A atividade está presente em praticamente todos os estados brasileiros, com destaque para a região Centro-Oeste, que concentra extensas áreas de pastagens responsáveis pela alimentação de um rebanho que supera 230 milhões de cabeças (IBGE, 2024).

Esse protagonismo é fruto de décadas de investimentos em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de nutrição animal, manejo de pastagens, sanidade, melhoramento genético, manejo do solo, mecanização agrícola e capacitação de mão de obra, fatores que contribuíram para o aumento da produtividade, rentabilidade e competitividade da pecuária nacional (MALAFAIA e BISCOLA, 2023; MENDES et al., 2024).

As crescentes demandas dos mercados consumidores pressionam o setor por sistemas produtivos mais sustentáveis, com redução do uso de insumos não renováveis e práticas alinhadas ao bem-estar animal (VIEIRA FILHO, 2018; GIOVELLI E TABALDI, 2023).

A intensificação sustentável da produção forrageira em áreas já consolidadas, sem a necessidade de abertura de novas fronteiras agrícolas, configura-se como uma estratégia fundamental para ampliar a eficiência no uso da terra e garantir a sustentabilidade da pecuária de corte no país (MENDES et al., 2024).

4.2. Relevância das forrageiras no Cerrado

Nesse contexto, em que a intensificação sustentável se consolida como estratégia indispensável para a pecuária de corte no Brasil, especialmente no Cerrado, as pastagens desempenham papel central no aumento da produtividade e na sustentabilidade dos sistemas pecuários. A adoção de forrageiras adaptadas às condições edafoclimáticas dessa região,

como os gêneros *Urochloa* e *Megathyrsus*, é fundamental para garantir a resiliência produtiva e ambiental (EMBRAPA, 2014; CÔRTEZ et al., 2022; JANK et al., 2022).

Essas gramíneas destacam-se pela elevada capacidade de produção de biomassa, pela tolerância à acidez do solo e pela eficiência na ciclagem de nutrientes, características alinhadas às demandas dos sistemas produtivos sustentáveis. O desenvolvimento de cultivares como *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri reflete avanços significativos na busca por materiais mais produtivos, nutritivos e resilientes às limitações dos solos e às variações climáticas típicas do Cerrado (TEIXEIRA et al., 2022; CASTRO et al., 2023).

Dessa forma, a adoção de forrageiras de alto desempenho não apenas contribui para a viabilidade econômica da pecuária na região, mas também para a conservação dos recursos naturais, ao promover maior eficiência no uso da terra, na preservação do solo e na redução dos impactos ambientais associados à expansão e manutenção da atividade pecuária.

4.3. Caracterização das cultivares estudadas

Diante da relevância das forrageiras tropicais para a sustentabilidade e a produtividade da pecuária no Cerrado, torna-se fundamental compreender as características agronômicas e morfofisiológicas das principais cultivares utilizadas na região. Nesse contexto, destacam-se *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri, que, além de apresentarem elevado potencial produtivo, são adaptadas às condições edafoclimáticas do bioma e desempenham papel estratégico na intensificação sustentável dos sistemas de produção pecuária.

4.3.1 *Urochloa brizantha* cv. Marandu

As plantas do gênero *Urochloa* são amplamente reconhecidas por sua elevada versatilidade, adaptabilidade a diferentes manejos e tolerância a condições adversas, como solos ácidos, de baixa fertilidade, e períodos de déficit hídrico, o que as torna indispensáveis para a pecuária tropical (EUCLIDES et al., 2021).

A cultivar de origem africana *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) cv. Marandu — anteriormente classificada como *Brachiaria brizantha* — é uma gramínea

forrageira tropical, perene e cespitosa, amplamente utilizada nas pastagens brasileiras. Introduzida no país na década de 1970 e lançada comercialmente em 1984 pela Embrapa, a cultivar se consolidou graças à sua elevada produtividade, ampla adaptação edafoclimática e resistência a pragas (CORTÊS et al., 1984; CASTRO et al., 2023). Atualmente, lidera o mercado nacional, representando cerca de 78% da comercialização de sementes forrageiras no Brasil (EMBRAPA, 2014; JANK et al., 2022).

Apresenta porte robusto, com altura variando entre 1,5 e 2,5 m, dependendo das condições de manejo e ambiente. Seu sistema radicular é profundo e bem desenvolvido, favorecendo a exploração eficiente dos recursos hídricos e nutricionais do solo, o que confere resiliência em períodos de estiagem (CASTRO et al., 2023).

Os colmos são inicialmente prostrados, com tendência à formação de perfilhos predominantemente eretos, conferindo uma arquitetura vertical que favorece a interceptação de luz e o manejo do pastejo. As bainhas foliares são pilosas, com cílios marginais, geralmente mais longas que os entrenós, conferindo aspecto pubescente ao perfil vegetativo (EMBRAPA, 1984).

As folhas são lineares a lanceoladas, glabras na face adaxial e pilosas na face abaxial, contribuindo para boa palatabilidade e digestibilidade. As inflorescências são panículas compostas, com 4 a 6 racemos distribuídos ao longo do eixo central, podendo atingir até 40 cm de comprimento. As espiguetas são oblongas a elípticas, unisseriadas e medem de 5,0 a 5,5 mm (EMBRAPA, 1984).

A produção de matéria seca varia de 10 a 18 t ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do manejo e das condições edafoclimáticas. Seu valor nutritivo é considerado bom dentro das gramíneas tropicais, com teores de proteína bruta entre 7% e 12%, especialmente nas folhas jovens em rebrota (EUCLIDES et al., 2021).

Além disso, apresenta resistência às principais espécies de cigarrinhas-das-pastagens, como *Notozulia entrieriana* e *Deois flavopicta*, o que a torna uma opção mais segura em comparação a cultivares suscetíveis, como *Urochloa decumbens* (MACHADO et al., 2010). Possui também boa tolerância a solos mal drenados, elevada adaptação a solos ácidos e capacidade de cobertura do solo, contribuindo para o controle de plantas invasoras e para a redução dos processos erosivos (MACHADO et al., 2010; CASTRO et al., 2023).

4.3.2 *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri

Entre as alternativas desenvolvidas mais recentemente para atender às demandas dos sistemas pecuários intensificados no Cerrado, destaca-se a cultivar BRS Zuri (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) - anteriormente *Panicum maximum*), lançada pela Embrapa em 2014 (JANK et al., 2022).

A BRS Zuri é uma gramínea tropical cespitosa, de porte ereto e elevado, com altura média entre 1,10 e 1,50 m. Suas folhas são largas (34 a 47 mm), de coloração verde-escura e arquitetura arqueada, características que proporcionam um dossel mais uniforme e eficiente na interceptação de luz. Os colmos são grossos (média de 5,8 mm), com internódios medianos e pouco cerosos, o que facilita o manejo, reduz perdas por acamamento e favorece o pastejo (JANK et al., 2022; TEIXEIRA et al., 2022).

Morfologicamente, distingue-se pela presença de pilosidade média a alta nas bainhas foliares, característica útil para sua identificação e que pode impactar a aceitação pelos animais (EMBRAPA, 2018; JANK et al., 2022).

Apresenta alta produtividade, com média anual de 25,8 t ha⁻¹ de matéria seca sob manejo com adubação de reposição e cortes regulares (JANK et al., 2022). Seu florescimento é tardio, o que permite prolongar a produção de forragem de alta qualidade, aumentando a eficiência nutricional do sistema. Comparada a outras cultivares do mesmo gênero, como Tanzânia e Mombaça, a BRS Zuri apresenta ganhos produtivos entre 10% e 12%, sem comprometer atributos como digestibilidade e teor de proteína (EMBRAPA, 2018; EUCLIDES et al., 2021).

É altamente recomendada para sistemas intensivos de produção de carne e leite, com elevado potencial de ganho de peso por animal e por área, além de bom desempenho mesmo em períodos de restrição hídrica, graças ao seu vigor vegetativo e elevada capacidade de suporte. Em sistemas de integração lavoura-pecuária, a cultivar tem apresentado excelente resposta à adubação e elevada persistência (EUCLIDES et al., 2021).

Seu sistema radicular profundo, vigoroso e bem ramificado permite maior exploração do solo, favorecendo a absorção de água e nutrientes, além de melhorar a estrutura do solo e aumentar a resiliência das pastagens. Essa característica também contribui para a reciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono, reforçando seu papel como ferramenta

estratégica na intensificação sustentável da pecuária no Cerrado (PEREIRA; POLIZEL, 2016; EMBRAPA, 2018; BRITO et al., 2022; CÔRTEZ et al., 2022; JANK et al., 2022).

4.5. Desafios dos solos do Cerrado

Embora as cultivares forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrus maximus* cv. BRS Zuri apresentem elevada adaptabilidade, produtividade e desempenhem papel estratégico na intensificação sustentável da pecuária, seu desempenho está diretamente condicionado às características edafoclimáticas do Cerrado. Nesse sentido, compreender as limitações e os desafios dos solos da região é fundamental para orientar práticas de manejo que garantam a persistência, a produtividade das pastagens e, consequentemente, a sustentabilidade dos sistemas pecuários.

O Cerrado brasileiro, que ocupa aproximadamente 204 milhões de hectares, é predominantemente formado por solos antigos, profundamente intemperizados e, em sua maioria, de baixa fertilidade natural (SILVA et al., 2018). Entre os diferentes tipos de solos, os Latossolos se destacam como os mais representativos, cobrindo mais de 50% da área do bioma (SOUSA; LOBATO, 2004). Esses solos, formados sob condições tropicais úmidas, apresentam perfis profundos, bem drenados, estrutura granular e coloração avermelhada, características que favorecem a infiltração de água e o desenvolvimento radicular profundo — atributos essenciais para espécies forrageiras de porte elevado e com sistemas radiculares robustos, como Marandu e BRS Zuri (CORREIA et al., 2004).

Apesar das excelentes condições físicas, do ponto de vista químico, os Latossolos apresentam desafios expressivos para a produção agropecuária. São solos fortemente ácidos (pH em H₂O geralmente inferior a 5,5), com elevada saturação por alumínio, baixa saturação por bases e baixa capacidade de troca de cátions (CTC), o que limita a disponibilidade de nutrientes (CORREIA et al., 2004). Adicionalmente, a alta fixação de fósforo - decorrente da abundância de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) na fração argila - representa um dos principais entraves ao desenvolvimento de plantas, sobretudo de gramíneas de alta demanda nutricional (SOUSA; LOBATO, 2004).

A textura desses solos varia de média a muito argilosa, sendo a fração argila dominada por minerais de baixa atividade, como a caulinita, associados a altos teores de

goethita e gibbsita. Essa composição mineralógica, embora proporcione estabilidade estrutural, está diretamente relacionada à baixa disponibilidade de fósforo, que permanece fortemente adsorvido às superfícies dos óxidos, reduzindo sua eficiência agronômica mesmo após adubações convencionais (CORREIA et al., 2004). Essa limitação é particularmente relevante para espécies forrageiras, visto que o fósforo desempenha papel fundamental no desenvolvimento radicular, na brotação e no acúmulo de biomassa (SILVA et al., 2018; CASTRO et al., 2023).

Por outro lado, os Latossolos do Cerrado apresentam atributos físicos favoráveis, como elevada porosidade, baixa densidade aparente e estrutura granular estável, que favorecem tanto o desenvolvimento radicular quanto a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto, a cobertura permanente do solo e os sistemas integrados de produção (ARCOVERDE et al., 2023).

Para viabilizar sistemas produtivos eficientes e sustentáveis nesse ambiente, são indispensáveis práticas corretivas e de manejo da fertilidade, como a calagem para neutralização da acidez, a adubação fosfatada e potássica, e a gessagem visando a melhoria das condições químicas nas camadas subsuperficiais do solo (SOUSA; LOBATO, 2004).

Além disso, o manejo adequado da matéria orgânica - naturalmente baixa nesses solos - é crucial para a sustentabilidade dos sistemas pecuários. A matéria orgânica contribui para a estabilidade de agregados, o aumento da retenção de água, a melhoria da CTC, a ciclagem de nutrientes e o estímulo à atividade biológica (BETTIOL et al., 2023). Práticas como rotação de culturas, integração lavoura-pecuária, uso de adubação orgânica e manutenção da cobertura vegetal são fundamentais para incrementar os estoques de carbono e melhorar a qualidade do solo (MENDES; REIS JUNIOR, 2003).

Portanto, o pleno aproveitamento do potencial produtivo de cultivares como Marandu e BRS Zuri, no contexto da pecuária sustentável do Cerrado, depende diretamente da adoção de estratégias integradas de manejo do solo e da fertilidade, capazes de mitigar as limitações químicas e, ao mesmo tempo, potencializar os atributos físicos favoráveis dos Latossolos.

4.6. Importância do fósforo (P) na pecuária

Considerando as limitações químicas dos solos do Cerrado, especialmente a alta capacidade de fixação de fósforo (P) nos Latossolos, torna-se evidente que esse nutriente exerce papel crítico tanto na produtividade das pastagens quanto no desempenho dos sistemas pecuários. A deficiência de fósforo, intrinsecamente associada às características dos solos altamente intemperizados e baixa disponibilidade de nutrientes, representa um dos principais entraves à sustentabilidade da pecuária no Cerrado.

O P é um nutriente essencial, de importância estratégica para os sistemas pecuários, pois atua diretamente na nutrição vegetal - favorecendo o estabelecimento, a persistência e a produtividade das pastagens forrageiras - e na nutrição animal, devido ao seu papel vital nos processos fisiológicos e metabólicos dos ruminantes (CABRAL et al., 2021; MALAFAIA; BISCOLA, 2023).

Nos sistemas de produção baseados em pastagens tropicais, como os predominantes no Brasil, o fósforo é frequentemente o nutriente mais limitante, sobretudo em ambientes de baixa fertilidade natural, como os Latossolos do Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004; GIOVELLI; TABALDI, 2023). Sua carência compromete não apenas o desenvolvimento das gramíneas, mas também o desempenho zootécnico dos rebanhos, afetando diretamente a produtividade, os índices reprodutivos e a sustentabilidade econômica e ambiental dos sistemas pecuários (TEIXEIRA et al., 2011).

Durante a implantação de pastagens, a adubação fosfatada exerce impacto decisivo sobre o estabelecimento e o vigor das gramíneas tropicais. A negligência nessa etapa pode resultar em formação deficiente do pasto, baixa densidade de perfilhos, limitada produção de biomassa e aumento da suscetibilidade à degradação precoce (CABRAL et al., 2021). Na fase de manutenção, a reposição periódica de P é fundamental para assegurar a rebrota após o pastejo, manter a capacidade de suporte da área e prolongar a vida útil das pastagens, especialmente em sistemas intensificados (CASTRO et al., 2023).

Entre as espécies mais cultivadas, destacam-se as do gênero *Urochloa*, como *Urochloa brizantha* cv. Marandu, que apresenta elevada responsividade à adubação fosfatada, principalmente em ambientes de solos ácidos e de baixa disponibilidade natural de nutrientes — condição típica do Cerrado (CASTRO et al., 2023).

Fisiologicamente, o fósforo (P) desempenha papel determinante no desenvolvimento radicular, estimulando a emissão de raízes laterais e o aprofundamento do sistema radicular, o que contribui diretamente para a absorção de água e nutrientes, além de conferir maior resiliência das plantas frente aos períodos de seca (MEENA et al., 2016). Além disso, o P é componente estrutural essencial do trifosfato de adenosina (ATP), molécula chave no armazenamento e transferência de energia nos processos metabólicos vegetais, sendo fundamental para a fotossíntese, respiração e síntese de compostos orgânicos. Sua deficiência compromete significativamente o estabelecimento das pastagens, sendo uma limitação que dificilmente pode ser revertida por adubações tardias (CABRAL et al., 2021; GIOVELLI; TABALDI, 2023)

O P é essencial para funções biológicas vitais, como a formação dos ácidos nucleicos (DNA e RNA), responsáveis pelo armazenamento e transmissão da informação genética, além de ser indispensável para o crescimento dos microrganismos do rúmen, compondo as paredes celulares microbianas e sustentando a fermentação e a digestão da fibra (BARRETO et al., 2009; SILVA et al., 2018).

Do ponto de vista zootécnico, o P é um dos principais minerais requeridos na nutrição dos ruminantes, compondo cerca de 80% da estrutura de ossos e dentes. Além disso, participa ativamente de processos metabólicos, enzimáticos e hormonais, estando envolvido na síntese de proteínas, na transferência de energia (ATP/ADP), na regulação do equilíbrio ácido-base e na manutenção do funcionamento celular (SILVA et al., 2018; MALAFAIA; BISCOLA, 2023).

As deficiências de P na dieta dos animais resultam em consequências severas, como redução do apetite, perda de peso, diminuição da taxa de prenhez, distúrbios locomotores e ocorrência de osteofibrose nutricional - enfermidade caracterizada pela fragilidade óssea, muito comum em sistemas extensivos que não realizam suplementação mineral adequada (NICODÊMO et al., 2000).

Diante desse cenário, o manejo eficiente do P, tanto no solo quanto na dieta animal, é imprescindível para garantir a sustentabilidade e a competitividade dos sistemas pecuários no Cerrado, reforçando a necessidade da integração entre práticas agrônômicas, zootécnicas e de manejo nutricional.

4.7. Desafios do uso de fertilizantes fosfatados

Diante da reconhecida importância do P para a produtividade das pastagens e o desempenho dos sistemas pecuários no Cerrado, bem como das limitações impostas pelos solos da região, o uso de fertilizantes fosfatados tem se consolidado historicamente como uma prática indispensável para suprir as demandas dos sistemas produtivos.

No entanto, essa dependência de fontes minerais solúveis traz consigo uma série de desafios agronômicos, econômicos e ambientais, que comprometem a sustentabilidade a médio e longo prazo (RAWAT et al., 2021; GIOVELLI; TABALDI, 2023). Estima-se que grande parte do P aplicado nos solos tropicais altamente intemperizados, como os do Cerrado, sofre rápida imobilização, formando compostos pouco disponíveis, principalmente fosfatos de ferro e alumínio (CORREIA et al., 2004; SANTOS et al., 2008). Essa dinâmica resulta em baixa eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados, demandando aplicações recorrentes para manutenção da produtividade.

Além da limitação técnica associada à fixação do P no solo, o uso intensivo desses insumos representa um significativo impacto econômico. A maior parte dos fertilizantes fosfatados utilizados no Brasil é proveniente da importação de rochas fosfáticas, extraídas de reservas geologicamente limitadas e concentradas em poucos países (FOLONI et al., 2008; OGINO et al., 2021). Isso torna o setor agropecuário nacional vulnerável às oscilações do mercado internacional, à flutuação cambial e aos custos crescentes de extração e beneficiamento, que exigem alto consumo energético e geram consideráveis impactos ambientais (SOUSA; LOBATO, 2004; RAWAT et al., 2021).

A perspectiva de esgotamento das reservas de fosfato de alta qualidade, aliada à crescente demanda global, levanta preocupações sobre a segurança alimentar a longo prazo (OWEN et al., 2015). Nesse contexto, torna-se urgente o desenvolvimento e a adoção de estratégias alternativas que conciliem produtividade, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

Entre as abordagens mais promissoras destacam-se o uso de fontes orgânicas de P, a aplicação de fosfatos naturais de reatividade média a alta combinados com práticas que favoreçam a solubilização biológica, como o cultivo de plantas recicladoras de nutrientes, além da integração de sistemas produtivos, como a Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que

contribui para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (FOLONI et al., 2008; MOREIRA et al., 2018).

Outro desafio relevante associado ao uso excessivo de P solúvel é o impacto sobre a microbiota do solo. O fornecimento contínuo de P prontamente disponível pode reduzir a atividade de microrganismos solubilizadores e mineralizadores de P, comprometendo processos naturais de ciclagem de nutrientes e afetando negativamente a diversidade e funcionalidade da biota edáfica (MATSUOKA et al., 2002; PAN; CAI, 2023). Essa perda de funcionalidade biológica enfraquece os mecanismos naturais de resiliência dos solos, tornando os sistemas mais dependentes de insumos externos.

Portanto, os desafios associados ao uso de fertilizantes fosfatados no Cerrado reforçam a necessidade de uma transição para modelos produtivos mais eficientes no uso de nutrientes, que integrem práticas agronômicas, biotecnológicas e ecológicas, capazes de romper a dependência de fontes minerais não renováveis e promover a sustentabilidade dos sistemas pecuários tropicais.

4.8. O uso de bioinsumos

O uso de bioinsumos já constitui uma realidade no setor agrícola brasileiro, com crescimento expressivo nos últimos anos, configurando-se como uma das principais estratégias tecnológicas voltadas à promoção da sustentabilidade dos sistemas agroalimentares (Sambuichi et al., 2024). Esses insumos, derivados de agentes microbiológicos, extratos vegetais ou compostos de origem biológica, apresentam-se como alternativa promissora ao uso intensivo de insumos químicos, contribuindo para a redução de impactos ambientais, fortalecimento da agrobiodiversidade e promoção da transição agroecológica. O Brasil, dada sua vasta biodiversidade e extensão territorial, possui elevado potencial para o desenvolvimento e uso de bioinsumos; contudo, diversos entraves estruturais e institucionais ainda dificultam sua plena expansão (Sambuichi et al., 2024; Bortoloti & Sampaio, 2024).

Entre os principais desafios destacam-se os entraves regulatórios, uma vez que os bioinsumos estão submetidos, em grande parte, ao mesmo marco normativo dos agrotóxicos convencionais, o que acarreta processos de registro burocráticos, dispendiosos e

pouco adaptados às especificidades biológicas desses insumos. Embora existam avanços recentes, como a criação de instruções normativas e a implementação de especificações de referência, o número de registros de bioinsumos ainda é bastante inferior ao dos produtos de média e alta toxicidade, demonstrando que seu desenvolvimento permanece aquém do potencial nacional (Sambuichi et al., 2024). Soma-se a isso a concentração geográfica da produção, predominantemente nas regiões Sul e Sudeste, o que gera desigualdades regionais no acesso e limita a adoção desses insumos por agricultores de outras regiões, sobretudo Norte, Nordeste e Centro-Oeste (Sambuichi et al., 2024).

A criação do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, constituiu uma política estratégica, ao estabelecer diretrizes para ampliar a produção, fomentar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico, atualizar a legislação e estimular a descentralização produtiva com foco nas particularidades regionais (Brasil, 2020; Bortoloti; Sampaio, 2024). Assim, torna-se essencial compreender as dinâmicas do mercado, as limitações regulatórias e os desafios socioeconômicos relacionados à adoção dos bioinsumos, a fim de consolidá-los como elemento central da inovação tecnológica voltada à sustentabilidade da agropecuária brasileira.

4.9. Uso de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSF)

Diante dos desafios associados ao uso de fertilizantes fosfatados — como baixa eficiência agrônômica, alto custo, dependência de recursos não renováveis e impactos ambientais —, os microrganismos solubilizadores de fósforo (MSF) surgem como uma alternativa promissora, sustentável e economicamente viável para otimizar a disponibilidade de P nos sistemas produtivos, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados, como os do Cerrado (RAWAT et al., 2021; PAN; CAI, 2023).

Esses microrganismos desempenham um papel central no ciclo biogeoquímico do P, representando entre 60% e 80% da fração viva mais ativa da matéria orgânica do solo (MENDES; REIS JUNIOR, 2003). A biomassa microbiana atua como um reservatório lábil de fósforo, liberando o nutriente por meio da excreção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases, que promovem tanto a solubilização do fósforo inorgânico quanto a mineralização de compostos orgânicos (KALAYU, 2019; MENDES; JUNIOR, 2023).

Dentre a diversidade de microrganismos com essa capacidade, destacam-se principalmente os gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* e *Burkholderia*, amplamente estudados por sua eficiência na solubilização de fósforo (RAWAT et al., 2021; ARAÚJO et al., 2024).

O principal mecanismo de atuação das bactérias solubilizadoras de fósforo (BSF) é a produção de ácidos orgânicos, como ácido cítrico, oxálico e glucônico, que promovem a acidificação do microambiente rizosférico. Esse processo facilita a solubilização de fosfatos de cálcio, ferro e alumínio, tornando-os disponíveis para absorção pelas plantas (KALAYU, 2019). Além da acidificação, esses compostos atuam como agentes quelantes, complexando os cátions metálicos que aprisionam o fósforo nas matrizes minerais, o que favorece sua liberação na solução do solo (PANG et al., 2024).

Paralelamente, a excreção de enzimas fosfatases permite a hidrólise de compostos orgânicos contendo fósforo, como fosfatos de ésteres, liberando formas inorgânicas prontamente absorvíveis (SILVA et al., 2023).

Estudos demonstram a eficácia desses microrganismos em diferentes contextos. Experimentos com *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium* revelaram capacidade de solubilizar até $130 \mu\text{g mL}^{-1}$ de fósforo a partir de fontes insolúveis como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, graças à intensa produção de ácidos orgânicos e à consequente redução do pH do meio (IQBAL et al., 2024). De forma semelhante, Bloska et al. (2022) observaram que o aumento na atividade de fosfatases associada a cepas de *Pseudomonas* proporcionou incrementos de até 18% no teor de fósforo lábil no solo.

No contexto das forrageiras tropicais, consórcios microbianos envolvendo *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, rizóbios e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) têm demonstrado impactos positivos expressivos, promovendo aumentos significativos na biomassa aérea e radicular de espécies como *Urochloa*, *Megathyrsus* e *Cynodon* (GUIMARÃES et al., 2022). Esses efeitos decorrem da combinação de mecanismos de solubilização de nutrientes, produção de fitormônios, liberação de sideróforos, maior colonização micorrízica e ampliação da área radicular, resultando em melhor aproveitamento hídrico e nutricional.

De acordo com Owen et al. (2015), a utilização de bioinoculantes contendo microorganismos solubilizadores de fósforo pode aumentar em até 25% a absorção de P pelas

plantas, reduzir significativamente a necessidade de fertilizantes inorgânicos e melhorar parâmetros como biomassa e desenvolvimento radicular. Os autores destacam que a produção de ácidos orgânicos e a atividade enzimática são os principais mecanismos responsáveis por esse incremento na disponibilidade de P e na eficiência do uso do nutriente.

Pang et al. (2024) reforçam que a interação sinérgica entre as bactérias solubilizadoras e as raízes das plantas intensifica esses processos, estimulando tanto a atividade microbiana quanto a liberação de compostos que promovem a disponibilidade de P. Dessa forma, o uso de BSF não apenas contribui para reduzir a dependência de fertilizantes químicos, mas também promove a regeneração dos processos biológicos do solo, tornando os sistemas mais resilientes e sustentáveis.

Assim, o uso de microrganismos solubilizadores de P representa uma estratégia viável e alinhada às demandas da pecuária sustentável no Cerrado, especialmente em sistemas que buscam integrar alta produtividade com conservação dos recursos naturais e redução dos custos de produção.

4.10. O inoculante BiomaPhos

Diante dos desafios agronômicos, econômicos e ambientais relacionados ao uso intensivo de fertilizantes fosfatados, e considerando o expressivo potencial dos MSF na melhoria da eficiência do uso desse nutriente, surgem soluções biotecnológicas que viabilizam práticas mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se o BiomaPhos, um inoculante líquido desenvolvido pela Embrapa, resultado de mais de duas décadas de pesquisa aplicada na seleção e formulação de cepas eficientes de *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084) (CANÇADO et al., 2021; SOUZA et al., 2021; MENDES et al., 2022).

Inicialmente recomendado para as culturas de milho e soja, o BiomaPhos pode ser aplicado tanto no tratamento de sementes quanto diretamente no sulco de plantio, via jato dirigido. Essa tecnologia se insere no escopo das práticas de agricultura regenerativa e sustentável, contribuindo para a maior eficiência no uso do P e para a redução da dependência de fertilizantes minerais convencionais (MIRANDA; BUSO, 2022).

Os resultados obtidos em campo reforçam sua viabilidade técnica e econômica, sobretudo em condições edafoclimáticas desafiadoras, como as dos Latossolos do Cerrado. Na cultura da soja, Mendes et al. (2022) observaram que a aplicação do BiomaPhos promoveu aumento de produtividade, especialmente em cenários de estresse hídrico e nutricional, além de contribuir para a recuperação de áreas com pastagens degradadas.

Estudos conduzidos por OLIVEIRA et al. (2020), em áreas comerciais de milho e soja localizadas em diferentes estados brasileiros, demonstraram incrementos médios de 8,6% na produtividade do milho e 6,3% na soja em comparação às áreas não inoculadas. Esses ganhos representaram aumentos de até 11,9 e 4,3 sacas por hectare, respectivamente, com retorno financeiro de até sete vezes o custo de aplicação no milho e 6,1 vezes na soja.

Complementarmente, dados de experimentos realizados por Oliveira – Paiva et al. (2020) durante três safras consecutivas em Sete Lagoas (MG) e Santo Antônio de Goiás (GO) reforçaram a eficácia do inoculante. A inoculação com *B. megaterium* e *B. subtilis*, isoladamente ou em combinação, elevou a produtividade média do milho para 8,9 t ha⁻¹, superando a testemunha (7,3 t ha⁻¹). Além disso, verificou-se aumento significativo nos teores de fósforo tanto na parte aérea das plantas quanto no solo, evidenciando a atuação efetiva das bactérias na liberação de fósforo antes imobilizado.

Resultados similares foram obtidos na validação da recomendação do BiomaPhos para a soja (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021). Os autores destacaram não apenas ganhos na produtividade da oleaginosa, mas também melhorias nos teores de fósforo nos tecidos vegetais e na solução do solo. Esses efeitos são particularmente relevantes, considerando que mais de 70% do fósforo aplicado via fertilização química em solos tropicais é rapidamente adsorvido e torna-se indisponível para as plantas (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021).

O desempenho positivo do BiomaPhos também foi comprovado em culturas perenes, como a cana-de-açúcar. Segundo Cançado et al. (2021), a aplicação do inoculante diretamente sobre os colmos no sulco de plantio, mesmo com apenas 50% da dose recomendada de P₂O₅, proporcionou aumentos expressivos nas produtividades de toneladas de cana por hectare e de açúcar por hectare, mostrando que a tecnologia é eficaz em sistemas de alta demanda nutricional.

Além da aplicação via solo, têm sido avaliadas estratégias alternativas, como a aplicação foliar. Miranda e Buso (2022) observaram, em milho safrinha, que a dose de 0,25 L ha⁻¹ apresentou melhor relação custo-benefício, mesmo sem diferenças estatísticas significativas nas variáveis produtivas, indicando que a aplicação foliar em doses reduzidas pode ser uma estratégia economicamente viável em determinados cenários.

Da mesma forma, Lima e Buso (2022) demonstraram que o tratamento de sementes com 8 mL kg⁻¹ do BiomaPhos, em dois híbridos de milho, resultou em incremento de 16,25% na massa de mil grãos — variável diretamente correlacionada à produtividade e à qualidade do grão. O estudo também destacou que a resposta ao inoculante pode variar conforme o genótipo, sendo a cultivar MG 408PWU a que apresentou maior produtividade.

Esses resultados corroboram a importância do BiomaPhos como uma ferramenta biotecnológica eficiente para aumentar a disponibilidade de P, reduzir custos com fertilizantes minerais e promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e pecuários no Cerrado e em outras regiões de solos tropicais. Sua adoção representa um passo concreto na transição para modelos produtivos de menor impacto ambiental e maior eficiência no uso de recursos naturais.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área amostrada

O experimento foi conduzido entre janeiro e março da safra 2022/2023, nas dependências da Embrapa Agropecuária Oeste, localizada no município de Dourados, Mato Grosso do Sul. As unidades experimentais consistiram em vasos dispostos a céu aberto, nas coordenadas 22°25'86" S de latitude, 54°97'47" W de longitude e altitude de 410 m em relação ao nível do mar. O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo mesotérmico úmido (Cwa), caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos (FIETZ et al., 2017).

Os dados de precipitação e temperatura foram obtidos na Estação Meteorológica da Embrapa Agropecuária Oeste. As informações climáticas correspondentes ao período experimental estão apresentadas na Figura 1.

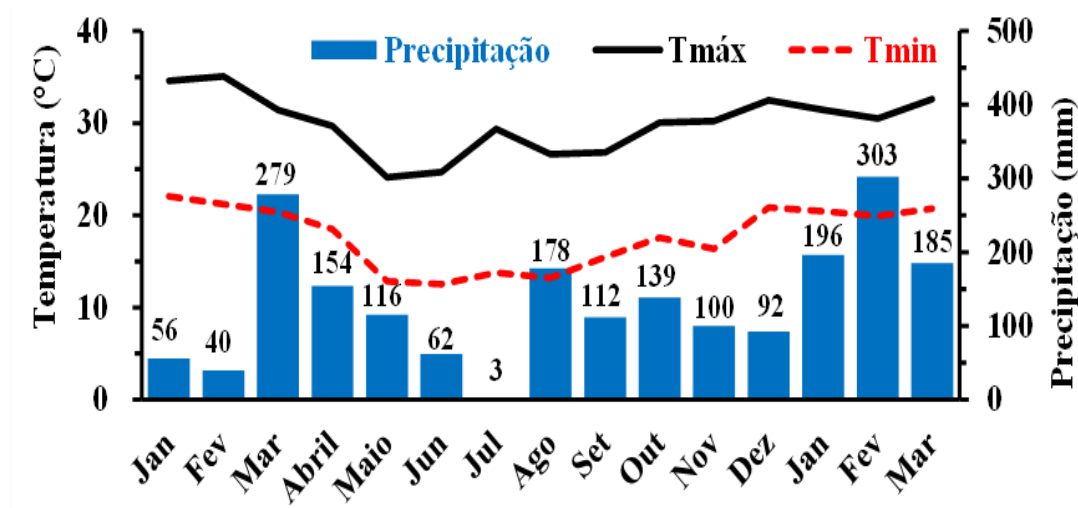


FIGURA 1. Temperaturas máximas (Tmáx) e mínimas (Tmin) e precipitação pluviométrica mensal no período de janeiro de 2022 a março de 2023 na região de Dourados. Fonte: EMBRAPA Agropecuária Oeste, Dourados, 2025

5.2. Experimento

O solo foi coletado na sede da Embrapa Agropecuária Oeste, em campo de produção com sucessão de cultura anuais na safra verão e pastagens de *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu na safrinha, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Após as análises química e física, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2008) e os resultados estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento, nas profundidades de 0–20, 20-40 e 40-60 cm, antes da aplicação dos tratamentos. Dourados, 2025.

Profundidade	Ph	pH	Al	Ca	Mg	H + Al	SB	K	P
Cm	H ₂ O	CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----				mg dm ⁻³		
0-20	5,52	4,78	0,20	4,25	1,02	9,54	5,57	117,3	1,80
20-40	6,10	5,45	0,00	5,68	1,56	6,29	7,50	101,66	2,03
40-60	6,21	5,58	0,00	5,42	1,26	4,75	6,84	62,56	0,69
	CTC	CTC efetiva	M	V	C total	MO	Areia	Silte	Argila
	---cmol _c dm ⁻³ ---		-----%-----			-----g Kg ⁻¹ -----			
0-20	15,11	5,77	3,46	36,89	1,87	32,25	105,50	161,73	732,77
20-40	13,78	7,50	0,00	54,39	1,25	21,52	72,17	145,06	782,77
40-60	11,59	6,84	0,00	59,00	0,84	14,55	48,30	159,46	792,24

Fonte: Própria autora.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC) com parcelas subdivididas, com quatro repetições. As espécies forrageiras — *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. Marandu e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. BRS Zuri — foram alocadas nas parcelas principais, enquanto os cinco tratamentos de inoculação (0, 250, 500, 750 e 1.000 mL ha⁻¹) foram distribuídos nas subparcelas.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos feitos de tubos de PVC, com 400 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, dispostos lado a lado, com espaçamento de 0,5 m entre vasos e 1,0 m entre fileiras. Na base de cada vaso foi colocada uma camada de tijolos cerâmicos, cujo fundo foi revestido com uma chapa de zinco. Antes da montagem, foi depositada uma camada de 3 cm de pedra brita previamente lavada, sobreposta por uma manta de poliéster (manta bidim), para garantir a drenagem adequada.

Os solos, coletados em diferentes profundidades, foram peneirados em malha de 5 mm e acondicionados nos vasos respeitando a sequência das camadas (40–60 cm, 20–40 cm e 0–20 cm), simulando as condições de campo. Na camada superficial (0–20 cm), foi incorporado o fertilizante fosfatado (superfosfato triplo) na dose equivalente a 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅, homogeneizado com o auxílio de betoneira. Após a montagem, instalou-se um sistema de irrigação por gotejamento com mangueira de polietileno, para garantir o fornecimento adequado de água durante a germinação e períodos de estiagem.

A semeadura foi realizada manualmente em 15/12/2021, depositando-se 10 sementes por furo em três covas por vaso, para as cultivares BRS Zuri e Marandu, em profundidades de 3 cm e 5 cm, respectivamente. Após a semeadura, os vasos foram irrigados por três horas e cobertos com sombrite por dois dias para proteção.

Trinta dias após a semeadura, realizou-se o desbaste, deixando-se três plantas por unidade experimental. Em seguida, aplicou-se nitrogênio, via ureia, na dose de 25 kg ha⁻¹, com novas aplicações subsequentes nas datas: 09/02/2022; 03/03/2022; 01/04/2022; 30/05/2022; 12/07/2022; 28/09/2022; 22/11/2022 e 03/03/2023, sempre na mesma dosagem.

Aos 49 dias após a semeadura, aplicou-se diretamente no solo dos vasos, utilizando um borrifador spray de 1.000 mL, o BiomaPhos. Essa aplicação foi repetida após o terceiro corte das plantas.

5.3 Análise vegetal

As análises vegetais foram realizadas nas seguintes datas: 03/03/2022, 05/04/2022, 12/08/2022 e 13/12/2022. Os intervalos entre as coletas foram de 78, 33, 129 e 123 dias, respectivamente.

No momento dos cortes, a altura das plantas foi mensurada com o auxílio de uma régua metálica de 1,0 metro de comprimento, graduada em centímetros. As medições foram realizadas da superfície do solo até a média do dossel, considerando a altura média das plantas em cada unidade experimental, expressa em centímetros (cm).

Nos mesmos cortes, foram coletadas amostras da parte aérea das plantas, realizando o corte a uma altura padrão de aproximadamente 20 a 25 cm do solo, de forma a

garantir a uniformidade do material coletado. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel previamente identificados, assegurando o correto rastreamento de cada tratamento.

Para determinação da massa de matéria seca (MS) da parte aérea, as amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 65°C por 72 horas, até atingirem peso constante. Em seguida, procedeu-se à pesagem em balança analítica com precisão de duas casas decimais. Os valores obtidos foram somados por unidade experimental e posteriormente convertidos para quilogramas por hectare (kg ha^{-1}).

Após a secagem, as folhas foram moídas em moinho tipo Willey, equipado com peneira de malha de 2 mm. Posteriormente, determinou-se o teor de fósforo total (P) no material vegetal, seguindo os procedimentos descritos por Malavolta et al. (1997). Com base nesses dados, foi calculado o acúmulo de P no limbo foliar, expresso em kg ha^{-1} .

5.4 Análise química e enzimática do solo

Ao término do experimento, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 10 cm para realização das análises laboratoriais. Inicialmente, procedeu-se à caracterização química do solo, com determinação dos seguintes parâmetros: pH em água e em CaCl_2 , cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (Ca + Mg + K), saturação por bases (V%), carbono total (C total), nitrogênio total (N total), fósforo (P) e potássio (K). A extração do P foi realizada pelo método Mehlich-1 e sua quantificação por espectrofotometria de absorção molecular, conforme os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017).

Adicionalmente, foi determinada a atividade enzimática da β -glicosidase, segundo o protocolo proposto por Eivazi e Tabatabai (1988), conduzido no Laboratório de Microbiologia de Solos da Embrapa Agropecuária Oeste. Para cada amostra de solo, foram realizadas três repetições analíticas. O procedimento consistiu na incubação das amostras com solução tampão MUB (Modified Universal Buffer) a pH 6,0, contendo o substrato p-nitrofenol- β -D-glicopiranosídeo (PNG), a 37 °C, por uma hora.

Após a incubação, a mistura foi filtrada e o p-nitrofenol (PNP) liberado pela atividade enzimática foi quantificado por espectrofotometria, com leitura da absorbância a 420 nm. A quantificação baseou-se em uma curva de calibração construída com soluções

padrão de p-nitrofenol, expressando-se os resultados em μg de p-nitrofenol liberado por grama de solo seco por hora ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$).

5.5 Fracionamento de fósforo

A extração das frações inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po) de fósforo no solo foi realizada conforme a metodologia proposta por Hedley et al. (1982), com as adaptações descritas por Condron e Goh (1989). Para o fracionamento, foram utilizados 0,5 g de solo seco por amostra, empregando extratores sequenciais, com o objetivo de quantificar as diferentes formas de P no solo, tanto inorgânico quanto orgânico.

Os extratores foram aplicados na seguinte sequência: Resina trocadora aniônica (AMI-7001) - para extração do fósforo inorgânico lábil (Pi); Bicarbonato de sódio (NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , pH 8,5) - para extração das formas lábeis de Pi e Po; Hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L^{-1}) - visando a extração de Pi e Po associados às frações orgânicas e aos compostos amorfos de Fe e Al; Ácido clorídrico (HCl 1,0 mol L^{-1}) - para extração do Pi associado a minerais primários; Hidróxido de sódio (NaOH 0,5 mol L^{-1}) - segunda extração alcalina para Pi e Po ligados a compostos mais resistentes; Digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ - para determinação do fósforo residual (P não extraível pelas etapas anteriores).

Nos extratos alcalinos de NaHCO_3 (0,5 mol L^{-1}) e NaOH (0,1 e 0,5 mol L^{-1}), a quantificação do Pi foi realizada após acidificação, promovendo a precipitação da matéria orgânica. O P total nesses extratos foi determinado por digestão com persulfato de amônio e ácido sulfúrico em autoclave. O fósforo orgânico (Po) foi obtido pela diferença entre o fósforo total e o Pi correspondente. Nos extratos ácidos (HCl 1,0 mol L^{-1} e digestão final), a quantificação do Pi foi realizada pelo método colorimétrico de Murphy e Riley (1962).

5.6. Análise estatística

Os dados obtidos para as variáveis analisadas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se o delineamento experimental adotado. As médias foram comparadas pelo teste de Duncan, ao nível de significância de 5%. Todas as análises

estatísticas foram realizadas por meio do software SAEG (Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa – UFV (1997).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise química e enzimática do solo

Para o pH, tanto em água quanto em CaCl_2 , os resultados indicam que não houve efeito significativo das doses de BiomaPhos, das cultivares nem da interação entre esses fatores (Tabela 2). Isso demonstra que a aplicação do bioinoculante, independentemente da dose, não promoveu alterações na acidez do solo. Esse comportamento é consistente com a literatura, que aponta que bioinoculantes à base de bactérias solubilizadoras de fósforo atuam predominantemente na disponibilização de nutrientes, especialmente fósforo, sem causar impacto direto no pH do solo (MENDES et al., 2022; GUIMARÃES et al., 2023a).

TABELA 2. Alterações nos atributos do pH (em água e CaCl_2) e matéria orgânica (MO) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu), sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	pH água			pH CaCl_2			MO (g kg ⁻³)		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	6,50	6,48	6,49	5,90	5,88	5,90	28,38	28,74	28,59B
250	6,48	6,51	6,49	5,88	5,92	5,90	28,20	29,91	29,09B
500	6,55	6,29	6,42	5,96	5,67	5,82	27,85	28,15	28,00B
750	6,58	6,28	6,43	6,00	5,66	5,83	28,61	30,40	29,09B
1.000	6,51	6,34	6,42	5,92	5,72	5,82	28,68	32,60	30,64A
Média	6,52	6,37	6,45	5,93	5,78	5,85	28,36b	29,79a	29,08
Cultivar (C)		1,53 ^{ns}			1,53 ^{ns}			39,88*	
Dose (D)		0,09 ^{ns}			0,09 ^{ns}			4,58*	
C*D		0,34 ^{ns}			0,34 ^{ns}			2,64 ^{ns}	
CV (%)		5,45			6,9			4,47	

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

Por outro lado, os teores de matéria orgânica (MO) foram significativamente influenciados tanto pelas cultivares quanto pelas doses de BiomaPhos, não sendo observada interação significativa entre esses fatores (Tabela 2). A cultivar *Urochloa brizantha* cv. Marandu apresentou teores médios de MO superiores (29,79 g kg⁻¹) em relação à

Megathyrus maximus cv. BRS Zuri (28,36 g kg⁻¹), o que evidencia sua maior capacidade de aporte de resíduos orgânicos ao solo, provavelmente associada a um sistema radicular mais denso e à maior produção de biomassa, conforme também reportado por Euclides et al. (2021) e Jank et al. (2022).

Quanto ao efeito das doses de BiomaPhos, observa-se um comportamento crescente, com incremento dos teores de MO à medida que as doses aumentam, especialmente nas doses de 750 e 1.000 mL ha⁻¹, para ambas as cultivares (Tabela 2). Esses resultados sugerem que a aplicação do bioinoculante favoreceu a ciclagem de carbono no solo, possivelmente por estimular o desenvolvimento radicular e a atividade microbiana, que contribuem para o aumento da deposição de matéria orgânica. Esses resultados estão alinhados com estudos que demonstram que bioinoculantes à base de *Bacillus* podem atuar indiretamente na melhoria da qualidade biológica do solo, refletindo em maiores teores de matéria orgânica (RAWAT et al., 2021; GUIMARÃES et al., 2023a).

A ausência de interação significativa entre cultivares e doses indica que os efeitos das doses de BiomaPhos sobre o teor de MO foram consistentes e independentes da espécie forrageira utilizada. Portanto, tanto *U. brizantha* cv. Marandu quanto *M. maximus* cv. BRS Zuri responderam positivamente à inoculação, embora a Marandu tenha apresentado maior eficiência no acúmulo de MO.

Os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e a soma desses cátions (Ca+Mg) não foram significativamente influenciados pelas doses de BiomaPhos, pelas cultivares avaliadas (*Megathyrus maximus* cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* cv. Marandu) e nem pela interação entre esses fatores, conforme indicado pelos testes estatísticos ($p>0,05$) (Tabela 3).

A ausência de efeito significativo sugere que, nas condições deste experimento, a aplicação do inoculante BiomaPhos não promoveu alterações na disponibilidade dos cátions básicos Ca e Mg no solo. Além disso, as diferenças genéticas entre as cultivares forrageiras também não foram determinantes para modificar esses atributos na camada superficial do solo.

Além disso, considerando que o solo apresentava teores adequados de Ca e Mg (Tabela 1), segundo os critérios de interpretação de Sousa e Lobato (2004), é possível que não houvesse uma limitação desses nutrientes que justificasse uma resposta significativa à inoculação.

TABELA 3. Alterações nos atributos do cálcio (Ca), magnésio (Mg) e soma dos teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri) e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu), sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	Ca (cmolc dm ⁻³)			Mg (cmolc dm ⁻³)			Ca+Mg (cmolc dm ⁻³)		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	5,43	4,97	5,20	1,41	1,34	1,37	6,83	6,30	6,49
250	5,36	5,41	5,39	1,37	1,29	1,33	6,73	6,69	6,71
500	5,84	4,67	5,25	1,36	1,35	1,35	7,20	6,01	6,61
750	5,97	4,88	5,39	1,30	1,36	1,33	7,27	6,17	6,72
1.000	5,54	4,83	5,18	1,27	1,34	1,30	7,80	6,17	6,49
Média	5,63	4,94	5,28	1,34	1,33	1,34	6,97	6,27	6,62
Cultivar (C)		1,96 ^{ns}			0,18 ^{ns}			2,08 ^{ns}	
Dose (D)		0,08 ^{ns}			0,72 ^{ns}			0,09 ^{ns}	
C*D		0,54 ^{ns}			1,15 ^{ns}			0,51 ^{ns}	
CV (%)		18,59			7,01			14,00	

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, não houve efeito significativo das cultivares, das doses de inoculante e nem da interação entre esses fatores para a variável saturação por bases (V%). Por outro lado, para o carbono total (C total), houve efeito significativo tanto das cultivares (C) quanto das doses (D). A cultivar Marandu apresentou maiores teores médios de carbono (1,73%) em comparação a BRS Zuri (1,64%). Em relação às doses, observou-se que a aplicação de 1.000 mL ha⁻¹.

Em relação ao nitrogênio total (N total), foram observadas diferenças significativas tanto para as doses quanto para a interação entre cultivares e doses (Tabela 4). De forma geral, os teores de N total apresentaram resposta variável de acordo com a cultivar e a dose aplicada. Para a BRS Zuri, os maiores teores foram observados nas doses de 750 e 1000 mL ha⁻¹, enquanto para a Marandu, o incremento foi mais evidente na dose de 1.000 mL ha⁻¹. Esse comportamento pode estar relacionado à dinâmica da atividade microbiana estimulada pelas doses do inoculante, que favoreceu processos como a mineralização e a imobilização do nitrogênio no solo, variando conforme as características da cultivar, especialmente no que se refere à quantidade e qualidade dos exsudatos radiculares. Esse

resultado está de acordo com estudos que apontam efeitos específicos de cultivares sobre a ciclagem de nutrientes no solo (MATSUOKA et al., 2002; LOSS et al., 2012; MENDES et al., 2022).

TABELA 4. Alterações nos atributos da saturação por bases (V%), carbono total (C total) e nitrogênio total (N total) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	V (%)			C total (%)			N total (%)		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	65,67	62,59	64,13	1,65	1,67	1,66B	0,12cB	0,14bA	0,13
250	63,62	63,77	63,69	1,64	1,74	1,69B	0,12cB	0,14bA	0,13
500	66,40	58,39	62,39	1,62	1,64	1,63B	0,13cA	0,13bA	0,13
750	66,55	58,31	62,43	1,66	1,76	1,69B	0,15aA	0,14bB	0,14
1.000	64,62	58,38	61,50	1,66	1,89	1,78A	0,14bA	0,15aA	0,15
Média	65,37	60,29	62,83	1,64b	1,73a	1,69	0,13	0,14	0,14
Cultivar (C)	1,64 ^{ns}			37,94*			1,60 ^{ns}		
Dose (D)	1,11 ^{ns}			4,39*			10,60*		
C*D	0,31 ^{ns}			2,7 ^{ns}			7,40*		
CV (%)	14,46			4,47			5,49		

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

O carbono orgânico do solo (C), especialmente em sua fração mais lábil, desempenha papel fundamental como fonte de energia para os microrganismos, que, por sua vez, promovem a mineralização de nutrientes, como o nitrogênio (N), tornando-o disponível às plantas sob formas inorgânicas assimiláveis (NOVAES, 2007; ANDRADE et al., 2011). Assim, diferentes sistemas de manejo que favorecem o acúmulo de carbono (C) no solo, como o uso de biofertilizantes e a adoção de cultivares adaptados às condições locais também contribuem para o aumento do nitrogênio disponível no solo (SILVA et al., 2023).

Esses resultados reforçam o papel fundamental da matéria orgânica (MO) na dinâmica do nitrogênio total. Conforme destacado por Novais et al. (2007), a matéria orgânica (MO) do solo atua como principal reservatório de nitrogênio, sendo mineralizada

pela atividade microbiana, que converte o nitrogênio orgânico em formas inorgânicas assimiláveis pelas plantas.

Esses resultados sugerem que a cultivar Marandu possui maior capacidade de acumular carbono (C) no solo, enquanto a cultivar BRS Zuri maior eficiência na assimilação de nitrogênio, especialmente em doses intermediárias de BiomaPhos. Essa complementaridade entre cultivares, associada ao uso de bioinsumos, evidencia o potencial de estratégias integradas para promover a fertilidade do solo e a sustentabilidade em sistemas de produção forrageira.

Conforme os dados apresentados na Tabela 5, o teor de fósforo (P) no solo foi significativamente influenciado pelos fatores cultivar, dose do inoculante e pela interação entre cultivar e dose. Já para o potássio (K), houve efeito significativo apenas para o cultivar, não sendo observada influência das doses nem da interação.

TABELA 5. Alterações nos atributos do fósforo (P) e potássio (K) na camada de 0-10 cm, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses de BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	P (mg dm ⁻³)			K (mg dm ⁻³)		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	3,67cA	3,45aA	3,56	67,45	66,47	66,96
250	3,77cA	3,23aB	3,50	63,54	55,72	59,63
500	4,36abA	2,97aB	3,66	58,65	55,72	57,18
750	4,65aA	3,52aB	4,08	57,67	57,09	56,70
1.000	4,00bcA	3,08aB	3,54	64,52	59,63	62,07
Média	4,09	3,25	3,67	62,36a	58,65b	60,51
Cultivar (C)		7,77*			10,12*	
Dose (D)		3,75*			2,72 ^{ns}	
C*D		3,50*			0,28 ^{ns}	
CV (%)		9,55			11,89	

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

Em relação ao P, observa-se que a BRS Zuri apresentou os maiores teores médios (4,09 mg dm⁻³) em comparação ao Marandu (3,25 mg dm⁻³) (Tabela 5). Esse resultado pode estar associado às características morfofisiológicas da BRS Zuri, como maior

desenvolvimento radicular e maior produção de exsudatos, que favorecem a atividade de microrganismos solubilizadores de fósforo, aumentando a disponibilidade desse nutriente no solo (MOREIRA et al., 2018).

Além disso, as doses do inoculante influenciaram significativamente os teores de P no solo, com os maiores valores observados nas doses de 500 e 750 mL ha⁻¹ para a BRS Zuri, o que evidencia a eficiência do bioinsumo na liberação de fósforo nesse cultivar. Conforme destacado por Oliveira-Paiva et al. (2020), a eficácia do BiomaPhos está diretamente relacionada à sinergia entre o microrganismo inoculado e a planta hospedeira, sendo mais pronunciada em espécies ou cultivares com maior demanda nutricional e maior capacidade de interação na rizosfera.

Por outro lado, para a cultivar Marandu, não foram observadas diferenças significativas entre as doses, indicando menor resposta dessa cultivar à inoculação, possivelmente devido às suas características fisiológicas, menor requerimento nutricional e menor interação com a microbiota promotora da solubilização de P. Esses resultados são coerentes com o comportamento do fósforo em ambientes de solo ácido, como os do Cerrado, nos quais há elevada fixação desse nutriente nos colóides do solo (GUIMARÃES et al., 2023) e forte dependência dos processos da rizosfera, incluindo a atividade microbiológica, para sua disponibilização às plantas (PANG et al., 2024). Corroborando esses achados, estudos como os de Silva et al. (2018) e Cançado et al. (2021) destacam que a eficiência de inoculantes solubilizadores de fósforo não depende exclusivamente do bioinsumo utilizado, mas também das características fisiológicas, do sistema radicular e da capacidade de interação de cada cultivar com a microbiota do solo.

Os resultados indicam que o teor de P disponível no solo foi significativamente influenciado pela interação entre as doses do inoculante e as cultivares avaliados. Esse comportamento evidencia que cada cultivar respondeu de maneira distinta à aplicação do BiomaPhos, possivelmente em função de diferenças na eficiência de absorção de P, na capacidade de interação com a microbiota solubilizadora ou nas exigências nutricionais específicas de cada um.

Em relação ao potássio, o efeito significativo foi observado apenas para o fator cultivar, (Tabela 5). Esse resultado evidencia que a dinâmica do potássio no solo está fortemente associada às características morfofisiológicas dos cultivares, especialmente no

que se refere ao desenvolvimento do sistema radicular, à exploração do perfil do solo e à capacidade de ciclagem de nutrientes.

O desempenho superior da BRS Zuri pode ser atribuído ao seu sistema radicular mais robusto e profundo, com maior volume e capacidade de exploração do solo, conforme reportado por Jank et al. (2022), que observaram maior acúmulo de raízes dessa cultivar até 60 cm de profundidade, superando inclusive outras cultivares de *Panicum* e *Brachiaria*. Essa característica permite maior acesso a reservas de potássio presentes em formas menos disponíveis, como nas frações não trocáveis ou associadas a minerais primários. Além disso, a elevada taxa de crescimento e a alta produção de biomassa da BRS Zuri resultam em maior demanda nutricional, o que potencializa processos naturais de dessorção de potássio do complexo sortivo e estimula a atividade microbiana na rizosfera. Após os ciclos de pastejo ou cortes, essa cultivar também contribui significativamente para a ciclagem de potássio, devolvendo parte do nutriente absorvido à camada superficial do solo por meio da decomposição da biomassa remanescente (BRAGA et al., 2019; SATTAR et al., 2019).

Por outro lado, a ausência de efeito das doses do inoculante sobre os teores de K corrobora a natureza funcional específica do BiomaPhos, que é direcionado para a solubilização de fósforo e não possui em sua formulação microrganismos especializados na solubilização de potássio. A solubilização biológica de potássio depende de interações complexas com minerais potássicos, como feldspatos, micas e illitas, através de mecanismos que envolvem a liberação de ácidos orgânicos e inorgânicos, formação de exopolissacarídeos, produção de biofilmes e modificações no pH do microambiente rizosférico (SATTAR et al., 2019). No entanto, esse processo é altamente seletivo e depende não apenas da presença dos microrganismos, mas também da natureza mineralógica do solo e das adaptações metabólicas específicas das cepas microbianas envolvidas.

Essa seletividade funcional foi evidenciada nos estudos de Nascimento et al. (2023), que demonstraram que, entre dezenas de estirpes bacterianas isoladas, apenas uma fração muito reduzida apresentou capacidade efetiva de solubilizar potássio a partir de minerais. Resultados semelhantes foram relatados por Zhang e Konga (2014), ao avaliarem a rizosfera do tabaco, onde, embora várias bactérias mostrassem algum potencial de solubilização de K, apenas quatro cepas foram consideradas altamente eficientes na promoção do crescimento das plantas e na melhoria da absorção de nutrientes. Esses achados

reforçam que não basta a presença de microrganismos no solo; é fundamental que eles sejam metabolicamente aptos e funcionalmente compatíveis com os minerais presentes no ambiente.

Portanto, os resultados deste estudo indicam que, enquanto o P apresenta alta dependência da atividade microbiana associada à aplicação de bioinsumos, como o BiomaPhos, a dinâmica do potássio esteve fortemente relacionada às características dos cultivares, em especial do BRS Zuri, cuja superioridade em acúmulo de K pode ser atribuída à sua maior capacidade de exploração do solo, demanda nutricional e eficiência na ciclagem de nutrientes. Esse entendimento reforça a necessidade de associar o uso de bioinsumos à escolha adequada de cultivares, considerando suas características fisiológicas e a especificidade funcional dos microrganismos para diferentes nutrientes.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 6, a atividade da enzima β -glicosidase foi significativamente influenciada pela interação entre cultivares e doses do inoculante fosfatado. Em contrapartida, para as enzimas sulfatase e fosfatase, não foram observadas diferenças significativas, tanto para os efeitos isolados de cultivar e dose quanto para a interação entre esses fatores.

TABELA 6. Atividade das enzimas β -glicosidase, sulfatase e fosfatase na camada de 0–10 cm do solo, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* cv. Marandu — sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	β-glicosidade			Sulfatase			Fosfatase		
	-----μg p-nitrofenol g ⁻¹ h ⁻¹ -----								
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	30,95cA	22,16bB	26,56	53,40	53,08	53,24	119,00	98,19	108,59
250	28,38cA	35,65aA	32,02	59,82	52,78	56,30	124,57	97,30	110,93
500	27,86cB	36,92aA	32,38	65,99	49,75	57,87	116,98	96,92	106,95
750	25,64aB	39,66aA	32,06	59,64	53,27	56,45	110,30	108,32	109,31
1.000	24,67bB	41,30aA	32,98	60,65	59,94	60,29	118,65	111,40	115,02
Média	27,50	34,90	31,20	59,89	53,77	56,83	117,90	102,43	110,16
Cultivar (C)	2,36 ^{ns}			0,36 ^{ns}			1,02 ^{ns}		
Dose (D)	1,56 ^{ns}			0,34 ^{ns}			0,14 ^{ns}		
C*D	5,36 [*]			0,53 ^{ns}			0,40 ^{ns}		
CV (%)	19.01			22.07			21.17		

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

Em relação à β -glicosidase, os maiores valores foram registrados no cultivar Marandu, a partir da dose de 500 mL ha⁻¹, com médias de 36,92; 39,66 e 41,30 μ g de p-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente, nas doses de 500, 750 e 1.000 mL ha⁻¹. Esses resultados indicam maior responsividade do Marandu à inoculação, com expressivo estímulo à atividade microbiana associada ao ciclo do carbono no solo, uma vez que a β -glicosidase está diretamente relacionada à degradação da matéria orgânica e à liberação de açúcares simples, fundamentais para a manutenção da microbiota edáfica (ALMEIDA et al., 2015).

A cultivar BRS Zuri, embora também tenha ocorrido incremento na atividade da enzima, os valores foram inferiores, principalmente nas doses intermediárias, sugerindo menor sensibilidade desse material genético ao bioinsumo para esse parâmetro. Essa diferença entre as cultivares pode estar associada às particularidades da rizosfera, como a composição e qualidade dos exsudatos radiculares, que modulam tanto a atividade quanto a abundância dos microrganismos envolvidos no ciclo do carbono (SILVA et al., 2023).

A resposta diferenciada da β -glicosidase entre as cultivares evidencia o papel da planta hospedeira na modulação da atividade microbiana do solo e, conseqüentemente, no funcionamento biológico do sistema edáfico. Essa enzima é amplamente reconhecida como um bioindicador da atividade microbiana e da mineralização da matéria orgânica, por estar envolvida na degradação de polissacarídeos como a celulose, resultando na liberação de carbono assimilável para os microrganismos do solo (MEENA et al., 2016; KALAYU, 2019; MAGWAZA et al., 2024).

A maior atividade de β -glicosidase observada no Marandu, especialmente nas doses mais elevadas do inoculante, pode estar relacionada à maior produção de exsudatos radiculares ricos em compostos carbonados de fácil decomposição, o que favorece os microrganismos produtores dessa enzima. Esse comportamento contrasta com o BRS Zuri, cuja maior demanda por P pode ter direcionado o sistema rizosférico para mecanismos mais voltados à solubilização e à disponibilização direta desse nutriente, ao invés da degradação de carbono.

Iqbal et al. (2023) reforçam essa interpretação ao demonstrarem que *Bacillus megaterium*, presente no BiomaPhos, é capaz de aumentar significativamente a atividade de β -glicosidase na rizosfera, principalmente em condições de disponibilidade limitada de P.

Além disso, Santos et al. (2022) destacam que espécies vegetais com alta exigência de P, como o BRS Zuri, podem priorizar a ativação de rotas enzimáticas associadas à produção de fosfatases. Também é importante considerar que a adição de bioinsumos contendo *Bacillus* spp. pode alterar de forma distinta a comunidade microbiana e as atividades enzimáticas do solo, dependendo do tipo de solo, das características da planta e do aporte de resíduos orgânicos (ALVES et al., 2023).

Assim, os resultados obtidos para a β -glicosidase não apenas refletem o estado biológico do solo, mas também indicam a existência de uma compatibilidade específica entre os microrganismos solubilizadores e a planta hospedeira, como destacado por outros autores (IQBAL et al., 2023; ALVES et al., 2023; SANTOS et al., 2024).

Quanto às enzimas sulfatase e fosfatase, a ausência de diferenças significativas entre cultivares, doses ou suas interações indica que, nas condições do presente estudo, a inoculação com o bioinsumo não influenciou a atividade dessas enzimas. Esse resultado sugere que o efeito microbiológico promovido pelo inoculante foi mais específico para os processos relacionados à degradação da matéria orgânica e ao ciclo do carbono no solo.

6.2 Análise vegetal

Os resultados obtidos (Tabela 7) indicam que o acúmulo de P no limbo foliar, a altura média das plantas e a massa seca da parte aérea foram significativamente influenciados apenas pelo fator cultivar, não sendo constatados efeitos das doses do inoculante fosfatado nem da interação entre cultivar e dose (C*D). Este comportamento sugere que as características genéticas e fisiológicas das espécies foram determinantes para o desempenho das variáveis avaliadas, independentemente do uso do bioinsumo.

No que se refere ao acúmulo de P no limbo foliar, o cultivar Marandu apresentou desempenho superior, com média de $102,88 \text{ kg ha}^{-1}$, em comparação ao BRS Zuri, que obteve $85,75 \text{ kg ha}^{-1}$. Este resultado demonstra maior eficiência do Marandu na absorção e acúmulo de P, possivelmente associado a características morfofisiológicas que favorecem maior exploração radicular e, conseqüentemente, maior eficiência na absorção de nutrientes (SANTOS et al., 2019).

TABELA 7. Acúmulo de fósforo no limbo foliar, altura média de plantas e massa seca da parte aérea, em duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex Rich.) Stapf) cv. Marandu — sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024.

Dose (mL ha ⁻¹)	Acúmulo de P no limbo foliar (mg vaso)			Altura média de plantas (cm)			Massa seca acumulada da parte aérea (kg)		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	83,76	95,55	89,65	73,44	49,63	61,53	226,92	377,15	302,04
250	87,24	100,72	93,98	71,81	52,94	62,38	263,49	340,60	302,05
500	92,22	95,84	94,03	75,00	50,81	62,91	232,82	322,62	277,73
750	84,26	108,77	96,52	73,06	51,25	62,16	230,37	338,77	284,57
1.000	81,29	113,52	97,40	70,94	52,06	61,50	232,75	296,89	264,82
Média	85,75b	102,88a	947,32	72,85a	51,34b	62,09	237,27b	335,21a	286,24
Cultivar (C)	5,03*			793,14*			32,23*		
Dose (D)	0,2 ^{ns}			0,12 ^{ns}			1,28 ^{ns}		
C*D	0,72 ^{ns}			0,57 ^{ns}			1,39 ^{ns}		
CV (%)	19,89			7,77			14,06		

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas linhas seguidas e da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Fonte: Própria autora.

Por outro lado, para a variável altura média das plantas, a BRS Zuri apresentou superioridade, com média de 72,85 cm, enquanto o Marandu registrou 51,34 cm. Este comportamento está diretamente relacionado às características genéticas da espécie *Megathyrsus maximus*, que possui hábito de crescimento ereto, maior alongamento dos colmos e arquitetura foliar verticalizada, refletindo naturalmente em maior estatura (JANK et al., 2022). No entanto, é importante destacar que maior altura não necessariamente se traduz em maior acúmulo de biomassa, sendo mais uma característica arquitetônica do que um indicativo direto de produtividade.

De fato, ao avaliar a massa seca acumulada da parte aérea, observa-se que a cv Marandu obteve desempenho superior, com média de 335,21 kg ha⁻¹, frente aos 237,27 kg ha⁻¹, da BRS Zuri. Este resultado reforça a maior capacidade da Marandu em converter os nutrientes absorvidos, especialmente o P, em biomassa, refletindo em uma melhor eficiência no uso de nutrientes.

A ausência de efeito significativo das doses do inoculante BiomaPhos e da interação entre cultivar e dose demonstra que, nas condições do presente estudo, o bioinsumo

não foi determinante para alterar significativamente os parâmetros produtivos e nutricionais avaliados. Esse comportamento pode estar associado à alta capacidade adaptativa das forrageiras em ambientes tropicais, que naturalmente possuem estratégias eficientes para aquisição de P, como sistemas radiculares bem desenvolvidos, exsudação de compostos orgânicos solubilizantes e associação com microrganismos nativos do solo (KALAYU, 2019; ALVES et al., 2023)

Cabe destacar que, embora a BRS Zuri tenha demonstrado aumento na disponibilidade de P no solo, especialmente nas doses mais elevadas do inoculante, esse incremento não se refletiu proporcionalmente no acúmulo foliar de P nem no aumento da biomassa. Este fato evidencia que a simples elevação da disponibilidade de P no solo não garante, isoladamente, sua absorção e utilização eficiente pela planta. Isso ocorre porque a absorção de P depende de múltiplos fatores, incluindo a arquitetura e eficiência do sistema radicular, a demanda fisiológica da planta e a compatibilidade funcional com a microbiota presente no solo (ALVES et al., 2023; SANTOS et al., 2024).

Cultivares com alta exigência nutricional, como o BRS Zuri, frequentemente demandam maiores aportes de P para sustentar processos metabólicos intensivos, como fotossíntese, síntese de ATP e ácidos nucleicos (BRAGA et al., 2019; JANK et al., 2022). Entretanto, no presente estudo, mesmo apresentando maior altura, a BRS Zuri não converteu essa característica arquitetônica em maior produção de biomassa nem em maior acúmulo de P foliar. A maior estatura observada parece estar mais relacionada ao seu hábito de crescimento do que à sua eficiência produtiva sob as condições avaliadas.

Por sua vez, o Marandu demonstrou um desempenho mais eficiente e equilibrado, apresentando maior acúmulo de fósforo foliar e maior produção de biomassa. Este comportamento pode estar associado tanto às características morfológicas e fisiológicas desse material genético quanto à maior afinidade com as cepas de *Bacillus* spp. presentes no BiomaPhos, como *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*. Esses microrganismos são reconhecidos pela capacidade de solubilizar P por meio da excreção de ácidos orgânicos, fosfatases e outros metabólitos que facilitam a liberação de P a partir de fontes insolúveis (IQBAL et al., 2023).

Portanto, a interação positiva observada no Marandu sugere uma maior compatibilidade funcional entre a planta e os microrganismos solubilizadores, resultando em

melhor aproveitamento do P disponível no sistema e, conseqüentemente, em ganhos reais de biomassa. Esse resultado reforça a importância de considerar não apenas a disponibilidade de nutrientes no solo, mas também as características específicas da planta e sua interação com a microbiota para alcançar maior eficiência nos sistemas forrageiros.

6.3 Fracionamento de fósforo

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, os teores de fósforo lábil (P-resina, Pi-bic e Po-bic) na camada de 0–10 cm do solo foram influenciados de maneira diferenciada pelos fatores cultivar e dose do inoculante fosfatado. Observou-se efeito significativo do fator cultivar para as frações P-resina e Po-bic, enquanto para Pi-bic o efeito foi significativo apenas para o fator dose, sem interação significativa entre os fatores (C*D) para nenhuma das frações avaliadas.

TABELA 8. Teor de P lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos.

Dose (mL ha ⁻¹)	P-resina			Pi-bic			Po-bic		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	2,96	1,76	2,36	7,99	7,55	7,77BC	11,48	10,05	10,76
250	3,56	1,74	2,65	7,99	7,05	7,52C	11,23	11,98	11,61
500	3,49	1,59	2,55	8,92	8,17	8,55AB	11,36	10,36	10,86
750	4,83	1,67	3,25	8,74	8,92	8,83A	12,48	10,29	11,39
1.000	3,31	1,97	2,64	8,61	7,36	7,99ABC	12,04	9,92	10,98
Média	3,63a	1,75b	2,69	8,45	7,81	8,13	11,72a	10,52b	11,12
Cultivar (C)	78,04*			3,93 ^{ns}			47,34 *		
Dose (D)	2,02 ^{ns}			2,92*			0,79 ^{ns}		
C*D	2,73 ^{ns}			0,73 ^{ns}			2,15 ^{ns}		
CV (%)	24,69			11,09			10,37		

Médias seguidas mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo. Pi-bic: P inorgânico extraído com a solução NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹, Po-bic: P orgânico extraído com a solução NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹. Fonte: Própria autora.

A fração P-resina, que representa o fósforo inorgânico trocável e prontamente disponível para as plantas, foi significativamente superior na cultivar BRS Zuri (3,63 mg kg⁻¹) em relação ao Marandu (1,75 mg kg⁻¹). Esse resultado reflete a maior capacidade da BRS Zuri em estimular mecanismos de solubilização de fósforo na rizosfera, possivelmente associada a uma maior exsudação de compostos orgânicos, como ácidos carboxílicos, que atuam liberando P dos minerais do solo (GONÇALVES; MEURER, 2009). A maior capacidade de exploração radicular e a maior demanda nutricional desse cultivar também podem ter contribuído para essa diferença, conforme discutido por Torres et al. (2023) como observado nos dados apresentados na tabela 5.

Para o fósforo inorgânico extraído com bicarbonato (Pi-bic), observou-se efeito significativo apenas em função das doses do inoculante, sem diferenças entre os cultivares avaliados. A dose de 750 mL ha⁻¹ proporcionou os maiores teores dessa fração de P, embora não tenha diferido estatisticamente das doses de 500 e 1000 mL ha⁻¹. Esse comportamento é consistente com o mecanismo de ação de bactérias solubilizadoras, como *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*, que promovem a liberação de P por meio da produção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases. No entanto, a eficiência desses microrganismos pode ser limitada pela saturação dos sítios de adsorção no solo ou pela competição microbiana (BRAGA et al., 2019; IQBAL et al., 2023). Além disso, a leve redução observada nas doses mais elevadas pode estar associada a efeitos de autoinibição microbiana ou à menor disponibilidade de carbono no sistema, fator essencial para sustentar a atividade metabólica dos bacilos (HUSSAIN et al., 2019).

O comportamento do Pi-bic também pode ser explicado pela dinâmica dos solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos, nos quais a capacidade de retenção de P em sítios de baixa energia é rapidamente saturada. Após esse limite, o P solubilizado não se acumula na fração lábil, podendo ser redistribuído para frações moderadamente lábeis (como Pi-NaOH) ou imobilizado temporariamente na biomassa microbiana (LOSS et al., 2012; RECH et al., 2019).

Para a fração de fósforo orgânico extraído com bicarbonato (Po-bic), a cultivar BRS Zuri novamente apresentou maiores teores (11,72 mg kg⁻¹) em comparação à Marandu (10,52 mg kg⁻¹), evidenciando maior capacidade de promover a mineralização do fósforo orgânico. Esse desempenho está associado à maior atividade de microrganismos produtores

de enzimas extracelulares, como fosfatases (ácidas e alcalinas), fitases, fosfolipases, fosfodiesterases e fosfoesterases, cuja produção é frequentemente estimulada por exsudatos radiculares específicos (MEENA et al., 2016; GIOVELLI; TABALDI, 2023; PANG et al., 2024).

Essas enzimas atuam na degradação de compostos orgânicos complexos, como ácido fítico, fosfolipídios e nucleotídeos, convertendo-os em formas inorgânicas solúveis e assimiláveis pelas plantas. Além desse processo de mineralização, uma parte do fósforo orgânico pode ser temporariamente imobilizada na biomassa microbiana, funcionando como um reservatório transitório que contribui para a ciclagem do nutriente no solo. Esse mecanismo é particularmente relevante em ambientes tropicais, como os Latossolos do Cerrado, onde o P apresenta alta tendência à fixação em óxidos de ferro e alumínio, limitando sua disponibilidade para as plantas (HUSSAIN et al., 2019; MENDES et al., 2022;).

A ausência de interação significativa entre os fatores cultivar e dose em todas as frações lábeis avaliadas (Tabela 8) indica que os cultivares responderam de maneira consistente, independentemente da dose do inoculante aplicado. Isso reforça que o comportamento observado para as frações de fósforo lábil está mais associado às características intrínsecas dos cultivares (no caso de P-resina e Po-bic) e à atuação direta do inoculante no solo (no caso de Pi-bic).

Em relação ao fósforo moderadamente lábil, não foram observadas respostas significativas às doses do inoculante, nem entre os cultivares, independentemente do extrator utilizado ($\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ou $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$) (Tabela 9). Os teores de fósforo inorgânico extraído por $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi-hid) variaram de 32,07 a 37,00 mg kg^{-1} , com média geral de 34,22 mg kg^{-1} . Essa fração de P está associada às superfícies de minerais secundários, principalmente óxidos de ferro e alumínio, por meio de ligações eletrostáticas e interações de troca iônica, que embora sejam relativamente fortes, não são irreversíveis. Dessa forma, sua mobilização pode ser favorecida tanto pela atividade radicular quanto pela atuação de microrganismos solubilizadores, que secretam ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como cítrico, oxálico e málico, capazes de competir pelos sítios de adsorção e liberar o P retido (CARNEIRO et al., 2011; MEENA et al., 2016).

Ainda que sem diferença estatística, a cultivar BRS Zuri apresentou teores numericamente superiores à Marandu em quatro das cinco doses avaliadas, sugerindo uma

possível maior eficiência de sua rizosfera na mobilização do P retido em sítios ativos de óxidos de Fe e Al. Esse desempenho pode estar relacionado a uma maior exsudação de compostos orgânicos pela BRS Zuri ou à maior interação com microrganismos benéficos promotores da solubilização do P, conforme também relatado por Carneiro et al. (2011), que destacam o papel dos exsudatos radiculares e dos compostos complexantes na liberação dessa fração de P.

Para o P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L⁻¹ (Po-hid), que representa a fração orgânica moderadamente lábil, os teores oscilaram entre 41,80 e 48,92 mg kg⁻¹, com média geral de 45,25 mg kg⁻¹. Essa fração é composta por compostos orgânicos relativamente estáveis, mas que podem ser mineralizados por enzimas do solo, como as fosfatases, liberando P inorgânico assimilável pelas plantas (; MATSUOKA et al., 2002; TORRES et al., 2023). Assim, constitui importante reserva de P que pode ser gradualmente disponibilizada, especialmente em solos tropicais, como os do Cerrado.

De forma semelhante ao observado para o Pi-hid, a cultivar BRS Zuri apresentou teores médios superiores (46,27 mg kg⁻¹) em comparação à cv. Marandu (44,23 mg kg⁻¹), mantendo a tendência de maior capacidade de mobilização e ciclagem de P observada nas demais frações. Este comportamento reforça a hipótese de que a BRS Zuri apresenta uma rizosfera mais ativa, possivelmente associada a maior produção de exsudatos e maior atividade microbiana, fatores que favorecem tanto a mineralização da matéria orgânica quanto a solubilização dos fosfatos moderadamente lábeis.

Torres et al. (2023) também relatam que sistemas com maior aporte de matéria orgânica e manejo conservacionista favorecem o acúmulo de P orgânico moderadamente lábil, bem como sua posterior mineralização, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos no Cerrado.

Para a fração de P não lábil extraída por HCl (P-HCl), foi observada interação significativa entre os cultivares e as doses do inoculante (Tabela 10), evidenciando que a resposta às doses do inoculante varia em função da espécie forrageira avaliada. Além disso, foram detectados efeitos isolados tanto para o fator cultivar quanto para a dose. Por outro lado, para o P residual - considerado a fração mais estável e recalcitrante do solo, não foram verificadas diferenças significativas em função dos cultivares, das doses ou da interação entre esses fatores.

TABELA 9. Teor de P moderadamente lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, s sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024.

Dose (mL ha ⁻¹)	Pi-hid			Po hid			Pi hid			Po hid		
	----- 0,1 mol L ⁻¹ -----						----- 0,5 mol L ⁻¹ -----					
	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	33,26	34,82	34,04	46,36	44,61	45,49	54,29	53,66	53,98	18,10	19,59	18,85
250	35,57	32,76	34,16	48,92	45,99	47,46	52,67	50,98	51,83	22,28	20,16	21,22
500	37,00	33,82	35,41	44,49	41,80	43,15	53,91	51,61	52,76	19,53	20,28	19,90
750	33,76	35,07	34,41	46,18	44,18	45,18	50,30	52,35	51,32	20,16	20,59	20,37
1.000	34,07	32,07	33,07	45,37	44,55	44,96	52,54	54,10	53,32	21,15	19,03	20,09
Média	34,73	33,71	34,22	46,27	44,23	45,25	52,74	52,54	52,64	20,24	19,93	20,09
Cultivar (C)	0,75 ^{ns}			1,77 ^{ns}			0,07 ^{ns}			0,48 ^{ns}		
Dose (D)	0,35 ^{ns}			2,01 ^{ns}			0,98 ^{ns}			0,70 ^{ns}		
C*D	0,64 ^{ns}			0,15 ^{ns}			0,79 ^{ns}			0,68 ^{ns}		
CV (%)	11,77			6,77			5,87			14,44		

Pi-hid: P inorgânico extraído pela solução NaOH 0,1 mol L⁻¹; Po-hid: P orgânico extraído pela solução NaOH 0,1 mol L⁻¹; Pi-hid: P inorgânico extraído pela solução NaOH 0,5 mol L⁻¹; Po-hid: P orgânico extraído pela solução NaOH 0,5 mol L⁻¹. Médias seguidas mesma letra maiúscula nas linhas seguidas e da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo

De forma geral, a cultivar BRS Zuri apresentou maiores teores médios de P-HCL em comparação à Marandu, principalmente a partir da dose de 500 mL ha⁻¹, reforçando a hipótese de uma rizosfera mais ativa, capaz de favorecer processos de solubilização de P. Para a BRS Zuri, a dose de 1000 mL ha⁻¹ resultou no maior teor médio de P-HCL (9,07 mg kg⁻¹), diferindo significativamente das demais doses. Esse resultado indica que a aplicação de doses mais elevadas do inoculante pode ter potencializado processos bioquímicos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a solubilização parcial dos fosfatos associados ao cálcio e a outros compostos pouco solúveis.

TABELA 10. Teor de P não lábil na camada de 0–10 cm do solo, em função de duas espécies de forrageiras *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum* Jacq.) cv. BRS Zuri e *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, s sob efeito da inoculação com diferentes doses do inoculante BiomaPhos. Dourados – MS, 2024.

Dose (mL ha ⁻¹)	P HCL			P residual		
	Cultivares		Média	Cultivares		Média
	BRS Zuri	Marandu		BRS Zuri	Marandu	
0	7,98bB	9,02aA	8,50	302,93	303,43	303,18
250	7,73bA	7,02bA	7,38	338,53	319,66	329,09
500	8,14bA	6,77bB	7,46	370,83	285,02	327,93
750	8,17bA	7,11bB	7,64	346,33	335,41	340,87
1.000	9,07aA	7,39bB	8,24	348,21	328,55	338,38
Média	8,22	7,46	7,84	341,37	314,42	327,89
Cultivar (C)		17,86*			3,97 ^{ns}	
Dose (D)		6,19 *			1,10 ^{ns}	
C*D		7,05*			1,42 ^{ns}	
CV (%)		7,23			12,27	

P HCL: P extraído com HCL. Médias seguidas mesma letra maiúscula nas linhas seguidas e da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. *Significativo. ^{ns}Não significativo.

É importante destacar, contudo, que essa fração representa uma forma de P de baixa disponibilidade, cuja mobilização no solo é pouco sensível à atuação direta de microrganismos solubilizadores, dependendo mais de condições edáficas específicas, como acidificação localizada na rizosfera, liberação de ácidos orgânicos complexantes ou ajustes no pH do microambiente (MEENA et al., 2016). Assim, os resultados sugerem que a combinação entre a elevada atividade rizosférica da BRS Zuri e o incremento da densidade

microbiana proporcionado pelo inoculante favoreceu, ainda que de forma limitada, a mobilização do P associado a compostos secundários de baixa solubilidade.

Por outro lado, a cultivar Marandu apresentou comportamento distinto, com o maior teor de P-HCl observado no tratamento controle, sem aplicação de inoculante (9,02 mg kg⁻¹), e redução dessa fração nas doses com inoculação. Esse resultado sugere que, na ausência de inoculante, a própria atividade rizosférica da Marandu foi suficiente para mobilizar o P dessa fração, provavelmente em função de sua elevada capacidade de exsudar compostos orgânicos complexantes, atribuída às características do seu sistema radicular (BRITO et al., 2022; GUIMARÃES et al., 2023). Além disso, é possível que a introdução de microrganismos exógenos tenha provocado algum nível de competição com a microbiota nativa, impactando negativamente a eficiência dos processos de mobilização de P em determinadas doses (KALAYU, 2019; MENDES et al., 2022).

A composição mineralógica do Latossolo utilizado, típico de ambientes altamente intemperizados, é caracterizada por baixa quantidade de minerais primários e alta concentração de óxidos de ferro e alumínio, o que condiciona o P remanescente a formas secundárias, fortemente adsorvidas ou complexadas à matéria orgânica (; HUSSAIN et al., 2019; KALAYU, 2019; PANG et al., 2024). Por isso, a fração extraída por HCl não reflete P de origem primária, mas está relacionada a compostos secundários, como fosfatos de Fe e Al, e formas orgânicas relativamente estáveis (MENDES et al., 2022).

Estudos apontam que microrganismos do gênero *Bacillus*, como *B. subtilis* e *B. megaterium*, são capazes de atuar na solubilização de P pouco disponível, seja pela liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, seja pela secreção de enzimas fosfatases (MOREIRA, 2018; IQBAL et al., 2023; SANTOS et al., 2024). Entretanto, em solos com elevada atividade de superfície, como os Latossolos, o P solubilizado pode ser rapidamente reabsorvido ou reprecipitado em formas quimicamente mais estáveis, limitando os efeitos no curto prazo (MEENA et al., 2016; RECH et al., 2019).

Para o P residual, os teores variaram entre 285,02 e 370,83 mg kg⁻¹, com média geral de 327,89 mg kg⁻¹. Essa estabilidade é consistente com o fato de essa fração estar fortemente ligada à matriz mineral do solo ou à matéria orgânica humificada, sendo praticamente indisponível para as plantas (LOSS et al., 2012; RECH et al., 2019). A ausência

de variação reforça que a inoculação com *Bacillus* spp. e a atividade rizosférica atuam preferencialmente nas frações mais biodisponíveis de P, sem efeito sobre esse compartimento.

Esses resultados evidenciam que a eficiência da inoculação está diretamente associada às características da rizosfera das forrageiras, às interações com a microbiota nativa e às condições do ambiente edáfico, especialmente em solos altamente intemperizados, como os Latossolos do Cerrado. Observa-se que as bactérias do gênero *Bacillus*, presentes no inoculante BiomaPhos, atuam predominantemente sobre as frações mais lábeis de P, promovendo a disponibilização do P inorgânico e, principalmente, do P orgânico de rápida mineralização. Contudo, essa eficiência é potencializada quando associada a plantas com maior atividade rizosférica, como verificado na BRS Zuri, enquanto em plantas com menor capacidade de exsudação, como a Marandu, as interações com a microbiota nativa e possíveis efeitos de competição podem limitar a eficácia da inoculação (BRAGA et al., 2019; KALAYU, 2019; MENDES et al., 2022; IQBAL et al., 2023).

O fracionamento do P, segundo Hedley et al. (1982), utilizado neste estudo, permite compreender melhor essa dinâmica ao discriminar as frações de acordo com sua disponibilidade. Nesse sentido, os resultados obtidos demonstram que, embora o inoculante tenha potencial para aumentar as frações lábeis (especialmente Pi-bic e Po-bic), sua efetividade depende tanto da dose aplicada quanto das características morfofisiológicas dos cultivares, particularmente da capacidade de estimular a microbiota rizosférica (GONÇALVES; MEURER, 2009; TORRES et al., 2023).

7. CONCLUSÃO

A inoculação com o BiomaPhos, formulado com *Bacillus megaterium* (BRM 119) e *Bacillus subtilis* (BRM 2084), demonstrou eficiência agronômica em Latossolo Vermelho distrófico do Cerrado, promovendo melhorias na qualidade química e biológica do solo e favorecendo o desempenho das forrageiras avaliadas. Os principais efeitos foram o aumento da matéria orgânica e do nitrogênio total, a maior disponibilidade das frações lábeis de fósforo e o incremento da atividade da enzima β -glicosidase, evidenciando contribuição significativa para a ciclagem de nutrientes.

Entre as forrageiras, a *Urochloa brizantha* cv. Marandu destacou-se pelo maior acúmulo de biomassa e pela elevação dos teores de matéria orgânica, carbono e nitrogênio no solo, enquanto a *Megathyrus maximus* cv. BRS Zuri apresentou maior eficiência na mobilização do fósforo lábil, resultado de sua intensa atividade rizosférica e interação com os microrganismos do inoculante. As doses de 750 e 1.000 mL ha⁻¹ foram as mais eficazes, otimizando a disponibilidade de fósforo e a qualidade do solo, especialmente quando associadas à cultivar BRS Zuri.

Dessa forma, o uso do BiomaPhos, aliado à escolha estratégica da espécie forrageira, representa uma alternativa sustentável para melhorar a fertilidade do solo, aumentar a eficiência do uso do fósforo e reduzir a dependência de fertilizantes minerais em sistemas produtivos estabelecidos em ambientes altamente intemperizados do Cerrado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Beef REPORT: perfil da pecuária no Brasil 2024**. Brasília: ABIEC, 2024. 106p.

ALMEIDA, R. F. de; NAVES, E. R.; MOTA, R. P. da. Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**, v. 3, n. 2, p. 146–150, 2015.

ALVES, L. C.; SILVA, J. F. M.; TORNISIELLO, D. C.; BETIOLI JÚNIOR, E.; ANDREOTE, F. D.; PAULI, G. Atividades enzimáticas do solo e modulação da comunidade microbiana após adição de aditivo de cama de frango enriquecido com *Bacillus* spp. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 47, e006223, 2023. DOI:10.1590/1413-7054202347006223.

ANDRADE, L. R. M.; FALEIRO, A. S. G.; SOBRINHO, D. A. S.; NASCIMENTO, M. T.; SOUZA, A. **Disponibilização de K de rochas silicáticas para plantas de soja inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA)**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2011. 21 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, n. 303).

ARAÚJO, E. V. B.; MAJOLO, C.; LIMA, I. G.; SANTOS, J. P.; MUNIZ, A. W. Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas – uma revisão. **Nativa**, v. 12, n. 4, p. 843-852, 2024. DOI: 10.31413/nat.v12i4.17576.

BARRETO, J. C.; BRANCO, A. F.; SANTOS, G. T.; MAGALHÃES, V. J. A.; CONEGLIAN, S. M.; TEIXEIRA, S. Avaliação dos efeitos de fontes de fósforo na dieta sobre parâmetros do meio ruminal e eficiência de síntese microbiana, digestibilidade dos nutrientes e fósforo plasmático em bovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 4, p. 760-769, 2009.

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. de. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2023. 788 p

BLÖSKA, K. M.; KACZMAREK, Z.; SOKOŁOWSKA, Z.; KUPIEC, J. The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, p. 1–11, 2017. DOI: 10.1515/efp-2017-0004.

BORTOLOTTI, G.; SAMPAIO, R. M. Desafios e estratégias no desenvolvimento dos bioinsumos para controle biológico no Brasil. **Revista tecnologia sociedade**, Curitiba, v. 20, n. 60, p. 291-307, 2024. DOI: 10.3895/rt.v20n60.15792.

BRAGA, G. J.; RAMOS, A. K. B.; CARVALHO, M. A.; FONSECA, C. E. L.; FERNANDES, F. D.; MALAQUIAS, J. V.; SANTOS, M. F.; JANK, L. **Produção de forragem e valor nutritivo de híbridos de *Panicum maximum* Jacq. em resposta a adubação**. Planaltina: EMBRAPA Cerrado, 1999. 14p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 353).

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 maio 2020.

BRITO, L. E. M.; REZENDE, A. L. A. M.; SILVA, C. O. C.; SILVA, H. D.; SILVA, C. D. R.; LUZ, J. H. S. da. Inoculação com microrganismos promotores de crescimento e nutrição de pastagens. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v. 8, p. e0210202, 2022. DOI:

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982. DOI:10.1016/0038-0717(82)90001-3.

CABRAL, C. E. A.; CABRAL, C. H. A.; SANTOS, A. R. M.; MOTTA, A. M.; MOTA, L. G. Impactos técnicos-econômicos da adubação de pastos. **Nativa**, v. 9, n. 2, p 173–181, 2021. DOI: 10.31413/nativa.v9i2.12047.

CANÇADO, G. M. A.; VASCONCELOS, J. C. S.; PAIVA, C. A. O.; CHRISTOFOLETTI, D.; SEVERINO, F. J.; PINTO JUNIOR, A. S.; MEDEIROS, G. de; BARBOSA, L. A. F.; SPERANZA, E. A.; ANTUNES, J. F. G. **Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de *Bacillus megaterium* (B119) e *Bacillus subtilis* (B2084) no plantio da cana-de-açúcar.** Campinas, SP: EMBRAPA Agricultura Digital, 2021. 25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 49).

CARNEIRO, L. F.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z. L.; CURI, N.; REIS, T. H. P.; VALLE, L. A. R. do. Atributos químicos e biológicos do solo sob pastagens manejadas com diferentes intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, N. 2. p. 1709–1719, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200017.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; CARVALHO, M. E. A., SILVA, M. S. S.; FAVA, R. D.; NICOLAI, A. B.; SALIB, N. C. **Braquiárias: ecofisiologia.** Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2023.75 p. (Série Produtor Rural, n. 80).

CORREIA, J. R.; REATTO, A.; SPERA, S. T. Solos e suas relações com o uso e o manejo In SOUZA, M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação** (2. ed.). Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 420p.

CÔRTEZ, I. H.; JAYME, D. G.; GONÇALVES, L. C.; RAMIREZ, M. A.; MENEZES, R. A.; OLIVEIRA, A. F.; TEIXEIRA, A. M.; MAGALHÃES, F. A.; PIRES, F. P. A. A.; MENEZES, G. L.; BORGES, A. L. C.; LOPES, L. T.; CAMARGOS, G. H. S.; ANANIAS, J. V. A. *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf) (Syn. *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf)). In JAYME, D. G.; GONÇAVES, L. C.; RAMIRES, M. A.; MENEZES, R. A. **Gramíneas forrageiras tropicais.** Belo Horizonte, MG: FEPE, 2022. 327p.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, n.11, p. 565–568, 1977. DOI:10.2134/jeq1977.00472425000600010018x.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 141–147, 1988. DOI:10.1016/0038-0717(88)90141-1

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite. 2018. **BRS Zuri: nova forrageira para produção de leite**. Juiz de Fora, MG: EMBRAPA gado de leite, 2018. (Folder)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte. 2014. **BRS Zuri produção e resistência para a pecuária**. Campo Grande, MS: EMBRAPA gado de corte, 2014.

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A.; DIFANTE, G. S.; MEDEIROS, S. R. **Valor nutritivo, estrutura do dossel e desempenho animal de algumas cultivares de *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum*) e *Brachiaria* spp.**

FIETZ, C. R.; FISH, G. F.; COMUNELLO, E.; FLUMIGNAN, D. L. **O clima da região de Dourados, MS**. 3. ed. Dourados, MS: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2017.

FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S.; CALONEGO, J. C.; ALVES JUNIOR, J. Aplicação de fosfato natural e reciclagem de fósforo por milheto, braquiária, milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1147-1155, 2008.

GIOVELLI, J.; TABALDI, L. A. Níveis de Fósforo e Inoculação de Sementes por *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) e *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) no Crescimento e Desenvolvimento de Plantas de Soja. **Ensaios e Ciência Biológicas Agrárias e da Saúde**, v. 26, n. 4, p. 451–458, 2023. DOI: 10.17921/1415-6938.2022v26n4p451-458.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 357–362, 2009.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; KLEIN, DK Promoção de crescimento e solubilização de fósforo, por *Bacillus Megaterium* e *B. subtilis*, via inoculação de sementes, associada à fertilização fostatada, na cultura da soja. **Observatório da economia latino-americana**, v. 21, n. 9. 11516–11551, 2023a. DOI: 10.55905/oelv21n9-055.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; JUNIOR, A. G. O.; JANK, L.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Inoculation with plant growth-promoting bacteria improves the sustainability of tropical pastures with *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.). **Agronomy**, v. 13, 734. 2023b. DOI:10.3390/agronomy13030734.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; HUNGRIA, M.; SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A. ointing out opportunities to increase grassland pastures productivity via microbial inoculants: attending the society's demands for meat production with sustainability. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1-23, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12081748.

HUSSAIN A.; ADNAN M.; IQBAL S.; FAHAD S.; SAEED M.; MIAN IA.; MUHAMMAD M. W.; ROMMAN, M.; PERVEEZ, R.; WAHID, F.; SUBHAN, F.; AHMAD, M. R.; ZAMIN, M.; ULLAH, FAZL.; REHMAN, K.; ANDALEEB, S. Combining phosphorus (P) with phosphate solubilizing bacteria (PSB) improved wheat yield and P uptake in alkaline soil. **Pure and Applied Biology**, v. 8, n. 2, p. 1809-1817, 2019. DOI: 10.19045/bspab.2019.80124.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2024). **Indicadores IBGE: estatística da produção pecuária**. Brasília, DF: IBGE, 2024. 49p.

IQBAL, Z.; AHMAD, M.; RAZA, M. A.; HILGER, T.; RASCHE, F. *Bacillus* sp. solubilizadores de fosfato modulam as atividades de exoenzimas do solo e melhoram o crescimento do trigo. **Microbial Ecology**, v. 87, p.4-13, 2024. DOI:10.1007/s00248-023-02340-5.

JANK, L.; SANTOS, M. F; BRAGA, G. J. **O capim-BRS Zuri (*Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) na diversificação e intensificação das pastagens**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2022. 46 p. (Circular Técnica, n. 163).

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, p. 1–7, 2019. DOI:10.1155/2019/4917256

LIMA, A. P. A. de; BUSO, W. H. D. Uso de BiomaPhos no tratamento de sementes de híbridos de milho cultivado na safrinha. **Revista Mirante**, v. 15, n. 1, 2022. DOI: 10.31668/mirante.v15i1.12799.

LOBATO, E; SOUSA; D. M. G. Calagem e adubações para culturas anuais e semiperenes. In SOUSA, M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação** (2. ed.). Brasília, DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 420p.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 50, p. 685–693, 2012. DOI: 10.1071/SR12196OI:

MACHADO, L. A. Z.; LEMPP, B.; VALLE, C. B. do; JANK, L.; BATISTA, L. A. R.; POSTIGLIONI, S. R.; RESENDE, R. M. S.; FERNANDES, C. D.; VERZIGNASSI, J. R.; VALENTIM, J. F.; ASSIS, G. M. L. de; ANDRADE, C. M. S. de. Principais espécies forrageiras utilizadas em pastagens para gado de corte. In: PIRES, A. V. (Ed.). **Bovinocultura de corte**. Piracicaba, MG: FEALQ, 2010. 760p.

MAGWAZA, B.; AMOBONYE, A.; PILLAI, S. **Microbial β -glucosidases: Recent advances and applications**. Heliyon, v. 225, p. 49-67, 2025.

MALAFIA, G. C.; BISCOLA, P. H. N. **Anuário CiCarne da cadeia produtiva da carne bovina - 2023**. Campo Grande: EMBRAPA Gado de Corte, 2023. 33p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

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

MATOS, M. L. Microbiologia do Solo. In: NUNES, R. R.; OLIVEIRA, M. O (Org.). **O solo: estrutura e composição**. 1. ed. São Carlos: Cubo, 2022. 197 p.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 425–433, 2002. DOI:10.1590/S0100-06832003000300004.

MEENA, V. S.; MAURYA, B. R.; MEENA, S. K.; MEENA, R. K.; KUMAR, A.; VERMA, J. P.; SINGH, N. P. Can *Bacillus* species enhance nutrient availability in agricultural soils? In ISLAM, T.; RAHMAN, M.; PANDEY, P.; JHA, C. K.; AERON, A. **Bacilli and Agrobiotechnology Cham**: Springer, 2016. cap. 16, p. 367–395. DOI:10.1007/978-3-319-44409-3_16.

MENDES, D. V.; ROCHA, F. R. T.; RAMOS, J. G.; VIANA, M. M.; SILVA, R. M. Tecnologias e práticas intensivas rumo a uma produção eficiente e sustentável. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 22, n. 5, p. 1–17, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n5-049.

MENDES, W. D.; SOBRINHO, C. A. M.; MARTINS, W. S.; MURAISHI, C. T.; SOUZA, M. P. S.; ADAMS, G. S.; SILVA, I. M.; OLIVE, A. G.; PEREIRA, D. D.; CARVALHO, L. C. The effect of phosphorus solubilizing bacteria on soybean cultivation in Brazil: a literature review. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, e65111637828, 2022. DOI:10.33448/rsdv11i16.38.

MENDES, I. de C.; REIS JUNIOR, F. B. dos. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2003. 26p.

MIRANDA, T. M.; BUSO, W. H. D. Aplicação foliar de BiomaPhos em milho safrinha. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e40611931991, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31991.

MOREIRA, G. M.; NEVES, J. C. L.; ROCHA, G. C.; MAGALHÃES, C. A. S.; FARIAS NETO, A. L.; MENEGUCI, J. L. P.; FERNANDES, R. B. A. Physical quality of soils under a crop-livestock-forest system in the Cerrado/Amazon transition region. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, e420213, 2018. DOI: 10.1590/1806-90882018000200013.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1977. DOI:10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

NICODEMO, M. L. F.; MORAES, S. S.; ROSA, I. V.; MACEDO, M. C. M.; THIAGO, L. R. L. de S.; ANJOS, C. R. dos. Avaliação de níveis de fósforo na dieta de novilhos Nelore em crescimento: efeitos no desempenho. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 4, p. 1191-1195, 2000. D10.1590/s1516-35982000000400033.

OGINO, C. M.; COSTA JUNIOR, G.; POPOVA, N. D.; MARTINES FILHO, J. G. Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 1, e220367, 2021. DOI:10.1590/1806-9479.2021.220367.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C.; TINOCO, S. M. S.; LANA, U. G. P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JUNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2020. 19 p. (Circular técnica, n. 260).

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; BINI, D.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SANTOS, F. C.; COTA, L. V.; SOUSA, S. M.; ALVES, V. M. C.; LANA, U. G. P.; SOUZA, F. F. **Inoculante à base de bactérias solubilizadoras de fosfato nas culturas do milho e da soja (BiomaPhos®): dúvidas frequentes e boas práticas de inoculação**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2021. 19p. (Comunicado técnico, n. 252).

OWEN, D.; WILLIAMS, A. P.; GRIFFITH, G. W.; WITHERS, P. J. A. 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.2014.09.012.

PAN, L.; CAI, B. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms*, v. 11, p. 1-22, 2023. DOI:10.3390/microorganisms11122904.

PANG, F.; LI, Q.; SOLANKI, M. K.; WANG, Z.; XING, Y.-X.; DONG, D.-F. Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate solubilizing microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, Lausanne (Fr), v. 15, art. 1383813, 27 mar. 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1383813.

RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, p 49–68, 2021. DOI:10.1007/s42729-020-00342-7.

RECH, I.; WITHERS, P. J. A.; JONES, D. L.; PAVINATO, P. S. Solubility, diffusion and crop uptake of phosphorus in three different struvites. *Sustainability*, v. 11, n. 1, p. 134, 2019. DOI: 10.3390/su11010134.

SAMBUICHI, R. H. R., POLICARPO, M. A., ALVES, F. A produção de bioinsumos no Brasil: desafios e potencialidades. Rio de Janeiro, RJ: IPEA, 2024. 10p. (Boletim regional, Urbano e ambiental, nº 32)

SANTOS, C. F. dos; LUCAS, R. E. S.; FRANCISCO, A. L. O. Inoculação de insumo biológico composto por *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium* na cultura do feijão. **Revista Scientia Rural**, v. 28, n. 1, 50-61, 2024

SANTOS, Flávia Cristina dos; REIS, D. P. dos; GOMES, E. A.; LADEIRA, D. de A.; OLIVEIRA, A. C. de; MELO, I. G.; SOUZA, F. F. de; MATTOS, B. B.; CAMPOS, C. N.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A. de. Influência de microrganismos solubilizadores de fósforo e fontes de fosfato no crescimento do milheto e na eficiência de uso de nutrientes em diferentes tipos de solo. **African Journal of Microbiology Research**, v. 16, n. 3, p. 95–103, 2022. DOI: 10.5897/AJMR2021.9600.

SANTOS, F. C. dos; REIS, D. P. dos; GOMES, E. A.; LADEIRA, D. A.; OLIVEIRA, A. C.; MELO, I. G.; SOUZA, F. F.; MATTOS, B. B.; CAMPOS, C. N.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA Solos, 2008. 306 p.

SILVA, L. L.; RIBON, A. A.; BACKES, C. Carbono e matéria orgânica do solo em sistema de manejo de produção de pastagem: uma revisão sistemática com meta-análise. **Agrarian**, Dourados, v. 16, n. 56, e17176, 2023. DOI:10.30612/agrarian.v16i56.17176.

SILVA, J. V. S.; CRUZ, S. C. S.; ALOVISI, A. M. T.; KURIHARA, C. H.; XAVIER, W. D.; MARTINEZ, M. A. Adubação fosfatada no feijoeiro cultivado sob palhada de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Ceres**, v. 65, n. 2, p. 181–188, 2018. DOI:10.1590/0034-737X201865020010.

SOUSA; D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In SOUSA, M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação** (2. ed.). Brasília, DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 420p.

SOUZA, S. M.; OLIVEIRA, C. A.; ANDRADE, D. L.; CARVALHO, C. G.; RIBEIRO, V. P.; PASTINA, M. M.; MARRIEL, I. E.; LANA, U. G. P.; GOMES, E. A. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867–877. 2021. DOI: 10.1007/s00344-020-10146-9.

TEIXEIRA, A. M.; JAYME, D. G.; GONÇALVES, L. C.; RAMIREZ, M. A.; MENEZES, R. A.; CAMARGOS, G. H. S.; ANANIAS, J. V. A.; OLIVEIRA, A. F.; L.; LOPES, L. T.; CÔRTEZ, I. H. G.; MAGALHÃES, F. A.; PIRES, F. P. A. A.; MENEZES, G. L.; BORGES, A. L. C. C.; PEREIRA, A. F. *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.) (Syn. *Megathyrsus maximus* (syn *Panicum maximum* Jacq.)). In JAYME, D. G.; GONÇAVES, L. C.; RAMIRES, M. A.; MENEZES, R. A. **Gramíneas forrageiras tropicais**. Belo Horizonte, MG:FEPE, 2022. 327 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 573 p.

TEIXEIRA, S.; BRANCO, A. F.; GRANZOTTO, F.; BARRETO, J. C.; ROMA, C. F. C.; CASTAÑEDA, R. D. Fontes de fósforo em suplementos minerais para bovinos de corte em pastagem de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 1, p. 190–199, 2011.

TORRES, L. R.; COSTA, D. D. A.; PEREIRA, M. G.; GUARDIEIRO, L. V. F.; LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; GONZALEZ, A. P.; CARVALHO, M.; VIEIRA, D. M. S. Phosphorus fractionations and availability in areas under different management systems in the Cerrado. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 966, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13040966.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Methods for chemical analysis of water and wastes**. EPA-600/4-79-020, Washington, D.C.: Environmental Monitoring and Support Laboratory, 1971.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. **Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas – SAEG**: versão 9.1. Viçosa: UFV, 1997.

VIEIRA FILHO, J. E. R. **Efeito poupa-terra e ganhos de produção no setor agropecuário brasileiro**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2018. 42 pg.

ZHANG, K; KONGA F. Isolation and characterization of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizosphere. **Applied Soil Ecology**, v. 82, p. 18–25, 2014.

ZIM, Y L. Os Horizontes do Solo. In NUNES, R. R.; OLIVEIRA, M. O. O (org). **O solo: estrutura e composição**. São Carlos: SP: Editora Cubo, 2022. 197p