UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

GERVASIO PEGORARO

USO DE MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO ASSOCIADO A DOSES DE FOSFATO NATURAL EM PASTAGEM DEGRADADA DE CAPIM BRAQUIÁRIA (*Urochloa brizantha* cv. Marandu)

Ilha Solteira
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (SISTEMAS DE PRODUÇÃO)

GERVÁSIO PEGORARO

USO DE MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO ASSOCIADO A DOSES DE FOSFATO NATURAL EM PASTAGEM DEGRADADA DE CAPIM BRAQUIÁRIA (*Urochloa brizantha* cv. Marandu)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Sistemas de Produção).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Pegoraro, Gervasio.
P376u Uso de microrganismos promotores de crescimento associado a doses de fosfato natural em pastagem degradada de capim braquiária (*Urochloa brizantha* cv. Marandu / Gervasio Pegoraro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
78 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas De Produção, 2025

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho
Inclui bibliografia

1. *Bacillus mycoides*. 2. *Trichoderma Yunnanense*. 3. *Azospirillum brasilense*. 4. Agricultura sustentável. 5. Índice de solubilização. 6. Compatibilidade.

Raiane da Silva Santos - CRB-9/9999

IMPACTO ESPERADO

A solução proposta nesta pesquisa poderá trazer avanços significativos na eficiência do uso de fósforo (P) e na sustentabilidade das pastagens degradadas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A adubação com fosfato natural (P_2O_5) e sua associação com microrganismos promotores de crescimento, como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus mycoides* e *Trichoderma yunnanense*, podem melhorar a absorção de P, estimular o desenvolvimento radicular e aumentar a resistência das plantas a estresses ambientais. Espera-se que os efeitos positivos desses microrganismos resultem em um aumento da produtividade da matéria seca (MS), maior teor de proteína na forragem e melhor equilíbrio da relação folha:colmo. A pesquisa pode demonstrar que a utilização de P_2O_5 e a coinoculação de microrganismos minimizam os impactos negativos da degradação do solo, favorecendo a recuperação da fertilidade. Outro impacto relevante será a identificação da compatibilidade entre os microrganismos, permitindo recomendações mais precisas sobre a aplicação conjunta na agricultura. Assim, os resultados poderão embasar estratégias de manejo sustentável de pastagens tropicais, ajudando produtores rurais a otimizar a produtividade e reduzir custos sem comprometer o equilíbrio ambiental.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research can bring significant advances in the efficiency of phosphorus (P) use and the sustainability of degraded pastures of *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Fertilization with natural phosphate (P_2O_5) and its association with growth-promoting microorganisms, such as *Azospirillum brasilense*, *Bacillus mycoides*, and *Trichoderma yunnanense*, may improve P absorption, stimulate root development, and increase plant resistance to environmental stresses. The positive effects of these microorganisms are expected to result in increased dry matter (DM) productivity, higher protein content in the forage, and a better balance in the leaf-to-stem ratio. The research could demonstrate that the use of P_2O_5 and the coinoculation of microorganisms minimize the negative impacts of soil degradation, favoring the recovery of fertility. Another relevant impact will be the identification of the compatibility between microorganisms, allowing more precise recommendations for joint application in agriculture. Thus, the results could support strategies for sustainable management of tropical pastures, helping rural producers optimize productivity and reduce costs without compromising environmental balance.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: USO DE MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO ASSOCIADO A DOSES DE FOSFATO NATURAL EM PASTAGEM DEGRADADA DE CAPIM BRAQUIÁRIA (*Urochloa brizantha* cv. Marandu.)

AUTOR: GERVÁSIO PEGORARO
ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO

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

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participaçao Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participaçao Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEXSANDER SELEGUINI
Data: 23/04/2025 22:12:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. ALEXSANDER SELEGUINI (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULA DE AGUIAR SILVA
Data: 23/04/2025 15:42:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. PAULA DE AGUIAR SILVA (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
gov.br
MAURO FERREIRA MACHADO
Data: 23/04/2025 17:10:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. MAURO FERREIRA MACHADO (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

Ilha Solteira, 22 de abril de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Geraldo Roque Pegoraro (*In memoriam*) e Carmelinda Pegoraro; à minha irmã, Lorena Pegoraro Zanin; ao meu cunhado, Dr. Vanclei Zanin; à minha esposa, Leiliane Ribeiro Fontes; e aos meus filhos, Samuel Amâncio Fontes Pegoraro e Isadora Amâncio Fontes Pegoraro. Meu sincero agradecimento a todos!

AGRADECIMENTOS

A Deus, que guia meus passos e me fortalece.

À minha família, que, nos momentos de dificuldade, esteve ao meu lado, especialmente à minha mãe, Carmelinda Pegoraro, que me deu forças e incentivo diários.

À minha esposa, Leiliane Ribeiro Fontes, que sempre esteve ao meu lado, tornando a jornada mais tranquila com suas palavras de afeto e apoio.

Aos meus filhos, Samuel e Isadora Amâncio Fontes Pegoraro, que com seus abraços tornaram as horas de estudo mais alegres.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro e aos meus colegas que contribuíram de maneira esplêndida na elaboração do trabalho, e aos servidores terceirizados, pela ajuda na condução dos experimentos e pelo incentivo diário.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, que sempre esteve disposto a sanar minhas dúvidas, cobrando-me, mas principalmente sendo um agente inspirador, que me ajudou a crescer profissionalmente.

À empresa AMTec, na figura do Sr. Adair Antônio Morás, que forneceu os insumos necessários para a elaboração deste trabalho e incentivou a conclusão da minha jornada.

E, por fim, à UNESP Câmpus Ilha Solteira - SP, por me proporcionar a oportunidade de fazer parte desta valiosa instituição de ensino como seu discente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) Código de Financiamento 001.

“Não tentes ser bem-sucedido, tente antes ser um homem de valor.”

Albert Einstein

RESUMO

Urochloa brizantha cv. Marandu é uma das gramíneas forrageiras mais cultivadas no Brasil, normalmente implantada em solos ácidos e com baixo teor de fósforo. A deficiência de fósforo (P) impacta na produção, reduzindo o perfilhamento e a qualidade da forragem, além da redução da eficiência do uso de outros nutrientes. Este estudo teve como objetivo avaliar se há solubilização de fosfato e compatibilidade entre os microrganismos testados *in vitro*. Ademais, objetivou-se avaliar se a adubação com fosfato natural (FN) isolada ou em associação com a inoculação de *Azospirillum brasilense*, *Bacillus mycoides* e *Trichoderma yunnanense* incrementam a nutrição, o crescimento e a produtividade da *U. brizantha* cv. Marandu em pastagem degradada (nível 2), bem como. O primeiro experimento foi conduzido em condições de laboratório. O segundo experimento foi conduzido em condições de campo, com 64 parcelas de 3,0 m × 3,0 m, durante 2022 e 2023. Utilizou-se o delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 4 × 4, sendo quatro doses de FN – aplicadas a lanço (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e 4 tratamentos de inoculação: Controle - sem inoculação com bactérias promotoras de crescimento, com inoculação das plantas com cepas de microrganismos (2 x 10^8 UFC mL^{-1}): *A. brasilense (*Ab-V5 + Ab-V6), *B. mycoides* (CCT 8332), e *T. yunnanense* (CCT 8328), aplicados no solo via pulverização (300 mL ha^{-1}). Na planta foram mensurados o teor de clorofila, a altura e o perfilhamento durante três cortes de novembro de 2022 a dezembro de 2023, quando as plantas apresentavam altura média de 45 cm. A produtividade de matéria seca (MS) foi analisada em cada corte, obtendo-se a média dos três cortes. Os dados obtidos foram usados para determinar o acúmulo de MS, o teor de proteína bruta e a relação folha:colmo. Os teores de nutrientes, o P extraído da produção (PEP) e a eficiência do uso de P (EUP) também foram avaliados. O *Bacillus mycoides* tem capacidade de solubilizar fosfato e os microrganismos testados são compatíveis para aplicação conjunta (coinoculação). O incremento de doses de fosfato natural (até 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) beneficiam o perfilhamento, o PEP, a produtividade e acúmulo de MS, a EUP e teor de proteína de *U. brizantha* cv. Marandu, independentemente da inoculação com microrganismos. Sem aplicar o fosfato natural, o uso isolado de *A. brasilense* aumentou a altura da planta e teor de clorofila foliar, o *B. mycoides* incrementou o perfilhamento e a relação folha:colmo, enquanto que o *T. yunnanense* aumentou o perfilhamento, produtividade e acúmulo de MS, bem como o teor de proteína da gramínea forrageira e a EUP. O *T. yunnanense* aumentou a altura de plantas e as concentrações de Mn e de P (até a dose de 57 kg ha^{-1} de P_2O_5) na parte aérea da planta.

Palavras-chave: agricultura sustentável; *Azospirillum brasilense; Bacillus mycoides*; compatibilidade; índice de solubilização; *Trichoderma yunnanense.*

ABSTRACT

Urochloa brizantha cv. Marandu is one of the most widely cultivated forage grasses in Brazil, typically established in acidic soils with low phosphorus content. This phosphorus (P) deficiency impacts production by reducing tillering and forage quality, as well as decreasing the efficiency of using other nutrients. This study aimed to evaluate whether phosphate solubilization and microbial compatibility are observed in vitro. On the other hand, we aimed to evaluate whether fertilization with natural phosphate (NP), either alone or combined with the inoculation of *Azospirillum brasilense*, *Bacillus mycoides*, and *Trichoderma yunnanense*, enhances the nutrition, growth, and productivity of *U. brizantha* cv. Marandu in degraded pasture (level 2). The first experiment was conducted at laboratory conditions. The second experiments was conducted under field conditions with 64 plots measuring 3.0 m × 3.0 m during 2022 and 2023. A randomized block design in a 4 × 4 factorial scheme was employed, with four NP doses broadcast application (0, 33, 66, and 100 kg ha^{-1} of P_2O_5) and four inoculation treatments: Control (no inoculation) and plant inoculation with growth-promoting microbial strains (2 × 10^8 CFU mL^{-1}): *A. brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *B. mycoides* CCT 8332), and *T. yunnanense* (CCT 8328), applied to the soil via spray (300 mL ha^{-1}). Chlorophyll content, plant height, and tillering were measured during three cuts from November 2022 to December 2023, when the plants averaged 45 cm in height. Dry matter (DM) productivity was analyzed at each cut, obtaining the average DM. These data were used to determine the DM accumulation, crude protein content, and leaf-to-stem ratio. Nutrient levels, P extracted from production (PEP), and P-use efficiency (PUE) were also evaluated. *Bacillus mycoides* has the ability to solubilize phosphate, and the tested microorganisms are compatible for joint application (coinoculation). Increased NP doses (up to 100 kg ha^{-1} of P_2O_5) improved tillering, PEP, productivity and DM accumulation, PUE, and protein content of *U. brizantha* cv. Marandu, regardless of microbial inoculation. Without NP application, the isolated use of *A. brasilense* increased plant height and foliar chlorophyll content, *B. mycoides* enhanced tillering and the leaf-to-stem ratio, while *T. yunnanense* boosted tillering, productivity and DM accumulation, as well as the protein content, and PUE of the forage grass. *T. yunnanense* increased plant height and Mn and P concentrations (up to a dose of 57 kg ha^{-1} of P_2O_5) in the plant's aerial parts..

Keywords: *Azospirillum brasilense; Bacillus mycoides;* compatibility; sustainable agriculture; solubilization index; *Trichoderma yunnanense.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura médias Iturama, Minas Gerais, Brasil durante os períodos de crescimento de *Urochloa brizantha* cv. Marandu entre os meses de novembro de 2022 e dezembro de 2023 (Fonte: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE). As setas representam os meses em que foram realizados os cortes da planta (seta verde indica o primeiro corte – fevereiro, a seta lilás indica o segundo corte e – abril e a seta laranja indica o terceiro corte – dezembro. 35

Figura 2. *Bacillus mycoides* exibindo halo de solubilização de fosfato em meio NBRIP. 40

Figura 3. Compatibilidade entre *Azospirillum brasilense* (Abv5 + Abv6), *Bacillus mycoides* (*Bm*) e *Trichoderma yunnanense* (*Ty*) sob co-cultivo em condições *in vitro*. 41

Figura 4. A) Teor de clorofila, B) altura da planta e C) perfilhamento médios de três cortes de Urochloa brizantha cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e ns indica nenhuma diferença significativa. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo linear. Onde não há linha de tendência não houve ajuste de modelo de regressão.....42

Figura 5. A) Massa seca média, B) acúmulo de massa seca da parte aérea (ACMS) e C) teor de proteína bruta em três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) na dose 0 pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e ns indica nenhuma diferença significativa entre as inoculações em cada dose específica. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (** e *) com ajuste aos modelos linear ou quadrático.....44

Figura 6. Relação folha:colmo média de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação e com inoculação de diferentes cepas *de* microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) em cada dose isolada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e ns indica nenhuma diferença significativa.....45

Figura 7. Concentração média de fósforo (P) na parte aérea da *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)] durante três cortes. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste aos modelos linear ou quadrático.....47

Figura 8. Concentração média de manganês (Mn) na parte aérea de *Urochloa brizantha* cv. Marandu durante três cortes em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo quadrático. Onde não há linha de tendência não houve ajuste de modelo de regressão.....48

Figura 9. A) Média do fósforo extraído da produção total (PEP) e B) eficiência do uso de fósforo (EUP) de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo linear. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos do solo na camada de 0–0,20 m e análise granulométrica antes do início do ensaio no campo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu 36

Tabela 2. Valores médios (± EP) da altura da planta (AP) e perfilhos por m² de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (P_2O_5) associada ou não à inoculação com microrganismos promotores de crescimento em plantas de diferentes cepas: *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328).....43

Tabela 3. Valores médios (± EP) das concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (FN) associada ou não à inoculação com microrganismos promotores de crescimento em plantas de diferentes cepas (*Azospirillum brasilense* Ab-V5 + Ab-V6, *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328). 46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 REVISÃO DE LITERATURA 16
2.1 Importância econômica das pastagens 16
2.2 *Urocholoa brizantha* cv. Marandu 17
2.3 Uso de fosfato natural em pastagens 18
2.4 Microrganismos promotores de crescimento em plantas 20
2.4.1 Solubilização de fosfato por fungos e bactérias 22
2.4.2 *Trichoderma yunnanense* 23
2.4.3 *Azospirillum brasilense* 25
2.4.4 *Bacillus mycoides* 26
2.5 Interações entre microrganismos e adubos fosfatados 27
2.6 Sustentabilidade na recuperação de pastagens em degradação 29
3 OBJETIVOS 32
3.1 Objetivo geral 32
3.2 Objetivos específicos 32
4 MATERIAL E MÉTODOS 33
4.1 Experimento 1: condições de laboratório 33
4.1.1 Solubilização de fosfato *in vitro* 33
4.3.2 Ensaio de compatibilidade com os isolados 34
4.2 Experimento 1: condições de campo 34
4.2.1 Caracterização do local 34
4.2.2 Caracterização do experimento 36
5 RESULTADOS 40
5.1 Experimento 1 40
5.2 Experimento 2 41
6 DISCUSSÃO 50
7 CONCLUSÕES 57
REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor de bovinos, equinos e bubalinos, dos quais a criação depende de forragem para sua alimentação (ABIEC, 2022). A *Urochloa brizantha* cv. Marandu é valorizada por sua persistência, capacidade de rebrota, tolerância ao frio, à seca e ao fogo, além de resistir ao ataque de pragas e responder bem à adubação fosfatada (Côrtes *et al*., 2022). No entanto, a deficiência de fósforo (P) nos solos brasileiros é um desafio, exigindo o uso de fontes de fosfato que sejam menos solúveis, mas que liberem o nutriente de forma gradual, tais como os fosfatos naturais (Guss *et al*., 1990; Korndörfer *et al*., 1999; Souza Júnior *et al*., 2018).

O P é nutriente chave para o crescimento de plantas, tais como as forrageiras, auxiliando no seu crescimento, perfilhamento e produção de matéria seca, desempenhando um papel crucial na formação de DNA, RNA, ATP e outras biomoléculas importantes. Além de também ser fundamental para a fotossíntese, transporte de energia e resistência a doenças. A adubação fosfatada é necessária para garantir a disponibilidade adequada do nutriente no solo, especialmente em solos de baixa fertilidade (Pantano *et al*., 2016). Geralmente, quando o fornecimento do nutriente no solo é baixo, as respostas das culturas à adição de fertilizante fosfatado são consideráveis. No entanto, as respostas das gramíneas a fosfatos variam significativamente. Isso ocorre devido a fatores tais como a eficiência no uso do fósforo, a atividade enzimática, a interação com o solo e diferenças genéticas. Algumas espécies absorvem melhor o nutriente, enquanto outras dependem mais de condições favoráveis do solo. Solos ácidos podem reduzir a disponibilidade de fósforo, exigindo adaptações das plantas. Por outro lado, enzimas como fosfatase ácida auxiliam na mobilização do nutriente, impactando diretamente o crescimento e a produção de biomassa (Nunes *et al*., 2008; Valkama *et al*., 2016).

Diante da degradação significativa de pastagens no Brasil, tecnologias sustentáveis, como a inoculação de microrganismos promotores de crescimento, ganham destaque (Teixeira *et al*., 2017; Embrapa, 2021). A solubilização do P pode ser feita pela microbiota do solo ou a partir da inoculação, onde há produção de ácidos orgânicos e enzimas como fosfatases que convertem o fósforo não lábil em formas solúveis que as plantas podem absorver (Silva Filho; Vidor, 2000; Alori *et al*., 2017). Bactérias dos gêneros *Bacillus* e *Azospirillum,* e fungos do gênero *Trichoderma* têm sido estudados pela associação com adubos fosfatados,

contribuindo para o manejo sustentável das pastagens (Kribel *et al*., 2019; Oliveira-Paiva *et al*., 2024; Kassogué *et al*., 2024). Assim, o uso conjunto dessas bactérias pode favorecer a otimização no manejo de pastagens. A compatibilidade entre microrganismos promotores de crescimento, como bactérias e fungos, é essencial para promover o crescimento mais eficiente das plantas. Estudos indicam que combinações específicas podem coexistir harmoniosamente, aumentando os benefícios como a aquisição de nutrientes e a produção de fitohormônios. Essa sinergia é importante para práticas agrícolas sustentáveis e tem levado ao desenvolvimento de bioinsumos comerciais, que melhoram a produtividade e a sustentabilidade na agricultura (Monnerat *et al*., 2020).

A hipótese deste trabalho é que a aplicação de microrganismos em pastagens estabelecidas de braquiária, com nível de degradação, em solos com baixa fertilidade e baixa disponibilidade fósforo, possa aumentar a produtividade, com menor uso de fertilizantes fosfatados, beneficiando economicamente os pecuaristas. Duas espécies testadas nessa pesquisa ainda apresentam poucas informações referentes à aplicação agrícola e relações com plantas. Logo, este estudo pode trazer informações relevantes no tocante à inoculação de microrganismos em pastagens consolidadas, associada a adubação com fosfato natural, devido ao fato de a sua liberação de nutrientes ser gradual, o que melhora a eficiência da absorção de fósforo pelas plantas ao longo do tempo. Além disso, este apresenta menor risco de causar impactos ambientais, garantindo um fornecimento mais estável de fósforo para o solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica das pastagens

As pastagens são ecossistemas fundamentais na Terra e cobrem cerca de 40% da superfície terrestre sem gelo, com grande importância ambiental, social e econômica (Pedreira; Sollenberger, 2020; Mesquita *et al*., 2023). Elas desempenham papel crucial na produção agropecuária, sendo a principal fonte de forragem para animais em pastejo. As pastagens ocupam aproximadamente 3,5 bilhões de hectares, sustentando a produção de carne e leite, além de contribuírem para a segurança alimentar e a economia rural mundiais (Humpenöder *et al*., 2022).

O Brasil é um dos principais produtores agropecuários do mundo, com grande parte dos ruminantes sendo criados em pastagens, e tendo a pecuária como um dos pilares do agronegócio no país (Oliveira *et al*., 2022; West *et al*., 2022). O cultivo de pastagens apresenta área total de, aproximadamente, 160 milhões de hectares, dos quais 23% são áreas de pastagem nativa (Do Valle *et al*., 2013; IBGE, 2020). As pastagens alimentam mais de 200 milhões de animais, incluindo bovinos, ovinos, caprinos, equinos e bubalinos (Schwertner *et al*., 2022). De acordo com o IBGE (2023), o país é o líder global em exportação de carne bovina. Aproximadamente 95% da carne bovina brasileira é produzida em regime de pastagens, o que confere um diferencial competitivo ao produto nacional, devido ao menor custo de produção e à qualidade da carne (Parente *et al*., 2019; Santos *et al*., 2024).

As maiores áreas de pastagens no Brasil estão concentradas principalmente regiões da Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. A Amazônia lidera com aproximadamente 56,6 milhões de hectares de pastagens cultivadas, seguida pelo Cerrado com 47 milhões e a Mata Atlântica com 28,5 milhões de hectares. Entre os estados, Pará (21,1 milhões de hectares), Mato Grosso (20,2 milhões de hectares) e Minas Gerais (19,3 milhões de hectares) são os que possuem as maiores extensões de pastagens (MAPBIOMAS, 2021).

A expansão das pastagens no Brasil enfrenta dois desafios principais e interligados: as emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes da mudança no uso da terra e do desmatamento, e as emissões provenientes do setor agrícola (CO_2, CH_4 e N_2O). Estas incluem emissões entéricas, de excretas, do solo, além de outras fontes associadas (Latawiec *et al*., 2014).

Grande parte das áreas de pastagem no Brasil era composta por espécies nativas até a década de 1970. No entanto, o cultivo de espécies forrageiras exógenas aumentou significativamente até 1980, e grande parte das pastagens naturais foi alterada devido às queimadas e aos desmatamentos, visando a criação de áreas para grandes culturas e pastagens cultivadas (Rocha *et al*., 2020; Caballero *et al*., 2023). Pastagens nativas têm um grande potencial para a manutenção da biodiversidade e são altamente adaptáveis às condições climáticas de cada bioma (Walkup *et al*., 2020), por isso, técnicas de manejo sustentáveis são necessárias para que se possa alcançar altos índices produtivos, reduzindo a degradação do solo e aumentando a resiliência do pasto (Oliveira *et al*., 2022).

2.2 *Urocholoa brizantha* cv. Marandu

As gramíneas do gênero *Urochloa,* anteriormente chamadas de gênero *Brachiaria,* têm ganhado destaque na pecuária brasileira, devido ao seu uso extensivo como pastagem (Valle *et al*., 2009). Essas espécies representam aproximadamente 80% do mercado de sementes de pastagens (Costa *et al*., 2011). Consequentemente, o Brasil se consolidou como líder mundial na produção, consumo e exportação de sementes de *Urochloa* spp. (Pereira *et al*., 2011; Ribeiro *et al*., 2019).

Urochloa brizantha, também conhecida como *Brachiaria brizantha*, capim-braquiária ou capim Marandu, é uma das gramíneas mais utilizadas em pastagens no Brasil, devido à sua alta produtividade de matéria seca e adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima (Oliveira *et al*., 2019; Catuchi *et al*., 2021). O seu uso também é indicado para o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Jank *et al*., 2011; Santos *et al*., 2015). A importância econômica dessa gramínea é evidente, pois ela contribui significativamente para a sustentabilidade e a rentabilidade da pecuária no Brasil (Aguilar *et al*., 2016). No entanto, conforme apontado por Oliveira *et al*. (2015), esse potencial não é plenamente aproveitado nos sistemas de produção, principalmente devido ao manejo inadequado das pastagens (Dias-Filho; Lopes, 2019). Esta cultivar é amplamente utilizada em sistemas de produção animal, tanto para a produção de carne quanto de leite, devido à sua capacidade de proporcionar cobertura eficiente do solo e com alta produção de forragem de bom valor nutritivo (Cavalcanti *et al*., 2021).

2.3 Uso de fosfato natural em pastagens

Nitrogênio (N) e P são dois macronutrientes requeridos no crescimento das plantas, sendo o P muito importante para o metabolismo energético das plantas. Este elemento compreende 0,2 a 0,8% da massa seca dos vegetais e é encontrado em ácidos nucléicos, enzimas, coenzimas, nucleotídeos e fosfolipídios (Santana *et al*., 2016; Nesme *et al*., 2018). No geral, os solos tropicais são naturalmente pobres em relação a esses nutrientes prontamente disponíveis para a absorção pelas raízes (Tilman *et al*., 2002).

O capim Marandu enfrenta desafios relacionados à adubação, especialmente devido à baixa disponibilidade de P no solo e à necessidade de suplementação de N para garantir um crescimento vigoroso. A deficiência do P pode comprometer o desenvolvimento radicular e a eficiência na absorção de água e nutrientes, enquanto o N é essencial para a síntese de proteínas e a produção de biomassa. Estudos indicam que doses adequadas destes elementos podem aumentar significativamente a produtividade da gramínea, melhorando sua qualidade nutricional e resistência ao pisoteio e ao pastejo intenso (Moreira *et al*., 2021; Costa *et al*., 2010).

Além disso, estratégias como a correção da acidez do solo com calcário e a aplicação estratégica de fertilizantes fosfatados e nitrogenados podem otimizar a absorção desses nutrientes, garantindo um manejo sustentável e eficiente das pastagens. O monitoramento contínuo dos teores de P no solo é essencial para ajustar a adubação conforme as necessidades da cultura, evitando desperdícios e impactos ambientais negativos.

A adubação fosfatada é crucial para o desenvolvimento adequado do capim-braquiária, pois o P é um nutriente muito importante para o crescimento radicular e a produção de biomassa, perfilhamento. Porém, um dos gargalos para a produção dessa planta é a baixa disponibilidade de P nos solos brasileiros (Lopes *et al*., 2012; Degryse *et al*., 2017; Freitas *et al*., 2019). Em solos com baixo teor de P disponível, a aplicação de adubos fosfatados pode aumentar significativamente a produtividade da pastagem (Bezerra *et al*., 2017).

As fontes de P incluem fosfatos solúveis, como o MAP, DAP, superfosfato simples e o superfosfato triplo, este último possui alta concentração do nutriente (45% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2%), e fosfatos naturais, que são menos concentrados e pouco solúveis em água. Essas características resultam em

diferenças significativas na velocidade de liberação do P para as plantas e no potencial de fixação deste elemento químico no solo (Korndörfer *et al*., 1999).

O P inorgânico na forma de fosfato é um constituinte primário da maioria dos fertilizantes fosfatados. Todavia, quando adicionado ao solo, este é sequestrado em formas que não estão imediatamente disponíveis às plantas (McLaughlin *et al*., 2011). O fósforo orgânico, por sua vez, é originado principalmente de processos biológicos que envolvem a assimilação de ortofosfato e sua posterior liberação na medida que materiais microbianos, animais e vegetais envelhecem e se decompõem por ação microbiana (Condron, 2004). Os fosfatos naturais podem ser classificados pela reatividade, que varia conforme a estabilidade da estrutura cristalina da rocha de origem. As fontes brasileiras geralmente são pouco reativas (Korndörfer *et al*., 1999). Entretanto, o fosfato natural (FN) de Gafsa, da Tunísia, é considerado reativo e contém 29,6% de P_2O_5 total e 10% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2%. Em contraste, o fosfato brasileiro Itafós é de baixa reatividade e menos concentrado, com 23,2% de P_2O_5 total e 5,5% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2% (Brasil, 2007).

A utilização de FN como fonte de P é uma prática comum em pastagens de capim Marandu. O FN é uma opção econômica e sustentável, pois libera nutriente de forma gradual, reduzindo a necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes fosfatados (Guedes *et al*., 2012; Souza Junior *et al*., 2018). No entanto, a solubilidade do FN pode ser limitada em solos com pH elevado, o que pode comprometer a disponibilidade de P para as plantas. Todavia, a acidez do solo aumenta a solubilização do fosfato natural, tornando o fósforo mais disponível para as plantas. Isso ocorre porque a acidificação promove a dissolução dos compostos de fósforo, reduzindo sua fixação em minerais como ferro e alumínio (Stamford *et al*., 2004). Para superar esse desafio, práticas prévias à aplicação do FN, tais como a calagem, e posteriores, tal como a inoculação com microrganismos solubilizadores de P podem ser adotadas para melhorar a eficiência da adubação, pois podem potencializar a liberação gradual do fósforo, garantindo maior absorção pelas plantas (Devau *et al*., 2009).

A associação simbiótica entre fungos micorrízicos e raízes de plantas aumenta a capacidade de absorção de P, sendo que plantas do gênero *Urochloa* respondem bem à inoculação com fungos micorrízicos. Isso pode ser adequada alternativa no manejo de pastagens, pois, como parte da microbiota, tal associação torna-se importante reservatório temporário de P imobilizado que pode ser mineralizado e

liberado na solução do solo, como nutriente disponível a longo prazo (Ehlers *et al*., 2010; Richardson; Simpson, 2011; Costa *et al*., 2012).

Uma forma de aumentar a produtividade das pastagens e melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo é por meio da aplicação de fertilizantes. Contudo, para explorar plenamente o potencial produtivo das forrageiras, é necessário investimento significativo, o que pode ser economicamente inviável para muitos pecuaristas. Por isso, a busca por fontes de adubação mais econômicas, que ofereçam produtividade comparável ou superior aos fertilizantes comerciais, tem levado produtores à busca por insumos e produção de biofertilizantes (Florencio *et al*., 2022). Ainda, diante do iminente esgotamento das reservas mundiais de rochas fosfáticas (Pantano *et al*., 2016), é essencial estudar estratégias para o uso mais eficiente do P na agricultura, visando maior sustentabilidade e segurança alimentar. Estudos indicam que a utilização de biofertilizantes pode ser uma alternativa promissora para a agricultura sustentável, melhorando a qualidade do solo e a produtividade das culturas (Lorentz *et al*., 2024).

A escolha do tipo de FN e sua dose adequada são cruciais para maximizar os benefícios da adubação fosfatada em pastagens de *U. brizantha* (Marques *et al*., 2020). Pesquisas indicam que diferentes fontes de FN, como o fosfato de rocha, podem variar em sua solubilidade e eficiência agronômica (Touhami *et al*., 2020; Lustosa Filho *et al*., 2020; Nunes *et al*., 2023). A interação entre *U. brizantha* e microrganismos do solo, como fungos micorrízicos arbusculares (AMF), também pode influenciar a eficiência da adubação fosfatada. A inoculação com AMF pode aumentar a absorção de P pelas plantas, melhorando a eficiência do uso de adubos fosfatados (Baptistella *et al*., 2021; Ramírez-Pedroso *et al*., 2023). A combinação de *U. brizantha* com AMF resultou em um aumento significativo na absorção de P e na produção de biomassa, destacando a importância de práticas de manejo integradas para otimizar a fertilização fosfatada em *Solanum tuberosum* (Boussageon *et al*., 2023).

2.4 Microrganismos promotores de crescimento em plantas

Os microrganismos promotores de crescimento de plantas (PGPMs) são essenciais para a agricultura sustentável, pois ajudam a melhorar a produtividade das culturas e a saúde do solo. Esses microrganismos incluem bactérias e fungos que colonizam a rizosfera, a superfície das raízes e até os tecidos internos das plantas,

promovendo o crescimento vegetal por diversos mecanismos (Van der Heijden *et al*., 2008). Bactérias como *Rhizobium* e *Azospirillum* são capazes de converter o N atmosférico (N_2) em formas utilizáveis pelas plantas, aumentando a disponibilidade deste nutriente (Singh *et al*., 2018). Os PGPMs também desempenham papel significativo no controle biológico de patógenos. Fungos como *Trichoderma* e bactérias como *Bacillus subtilis* produzem compostos antimicrobianos que inibem o crescimento de patógenos de plantas, reduzindo a incidência de doenças e promovendo a saúde geral das culturas (Lombardi *et al*., 2018; Bettiol *et al*., 2019; Lee *et al*., 2019). Além disso, a colonização das raízes por PGPMs pode induzir resistência sistêmica nas plantas, aumentando sua capacidade de resistir a estresses bióticos e abióticos (Glick, 1995; Majeed *et al*., 2018).

Os PGPMs estimulam a produção de compostos como ácido salicílico, jasmonatos e etileno, regulando a expressão de genes de defesa e promovendo alterações fisiológicas, como o fortalecimento da parede celular, a produção de metabólitos secundários e a ativação de enzimas antioxidantes, que ajudam a mitigar estresses ambientais. Além disso, a colonização das raízes por esses microrganismos induz priming, mantendo a planta em estado de alerta e permitindo uma resposta mais eficiente a patógenos e condições adversas, resultando em maior resistência a doenças, tolerância ao déficit hídrico e adaptação a solos pobres em nutrientes (Lugtenberg; Kamilova, 2009; Anamika *et al*., 2023).

Os fitormônios desempenham um papel essencial no crescimento vegetal, influenciando processos como divisão celular, elongação e diferenciação dos tecidos. Em pastagens, a produção equilibrada de auxinas, giberelinas e citocininas favorece o desenvolvimento das gramíneas, promovendo maior vigor e resistência ao estresse ambiental (Andrade *et al*., 2024). Além disso, esses hormônios regulam a expansão da área foliar, aumentando a capacidade de interceptação da luz solar e, consequentemente, a eficiência fotossintética, o que resulta em maior produção de forragem e melhor qualidade nutricional para os animais. Warnock *et al*. (2006) destacam que a área foliar e seus componentes são fundamentais para estimar o rendimento de cultivos agrícolas.

O uso de microrganismos do solo, seja de forma natural ou por inoculação, tem sido importante para a saúde e fertilidade do solo (Alori *et al*., 2017). Esses microrganismos promovem o crescimento das plantas ao aumentar a área de absorção das raízes e a disponibilidade de nutrientes, também atuando na fixação de nitrogênio; ao melhorar a estrutura do solo; ao produzir fitormônios e compostos

orgânicos voláteis que estimulam o desenvolvimento vegetal e proteção das plantas contra patógenos (Zhang *et al*., 2018; Mendes *et al*., 2013). A inoculação de microrganismos específicos pode potencializar esses benefícios, resultando numa agricultura mais sustentável e produtiva (Gomes *et al*., 2016).

Outro mecanismo importante dos PGPMs é a solubilização de fosfatos. Microrganismos como *Bacillus* e *Pseudomonas* podem solubilizar fosfatos insolúveis no solo, tornando o P disponível para as plantas (Miller *et al*., 2010; Oteino *et al*., 2015; FranchI, 2022). Este processo é crucial em solos com baixa disponibilidade de P, onde a aplicação de fertilizantes fosfatados pode ser menos eficiente. Além disso, alguns microrganismos produzem sideróforos, que são compostos que quelam ferro e tornam este nutriente mais disponível para as plantas (Ahmemd; Holmström, 2015). Os sideróforos solubilizam o ferro insolúvel, permitindo sua absorção, e ajudam a liberar o fósforo fixado em óxidos de ferro, aumentando sua disponibilidade. Além disso, promovem o crescimento vegetal, fortalecem as raízes e favorecem microrganismos benéficos, contribuindo para a saúde do solo e a produtividade das pastagens (Pereira *et al*., 2009).

2.4.1 Solubilização de fosfato por fungos e bactérias

A utilização de microrganismos do solo como inoculantes é vantajosa para disponibilizar o P em solos com baixa concentração solúvel desse nutriente (Richardson, 2000). A solubilização de fosfato por microrganismos é um processo chave para a nutrição das plantas, uma vez que a maior parte do P presente no solo está na forma de fosfatos inorgânicos não lábeis, que não podem ser diretamente utilizados pelas plantas (Nahas, 2002; Vincent *et al*., 2010; Oliveira-Paiva *et al*., 2022).

Diversos microrganismos solubilizadores de P são reportados na literatura, incluindo actinobactérias, fungos, bactérias, micorrizas arbusculares e cianobactérias. Esses microrganismos hidrolisam o fósforo orgânico e inorgânico, tornando-o solúvel e disponível para as plantas (Rawat *et al*., 2021). Dentre eles, Silva *et al*. (2023) citaram fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias dos gêneros *Azospirillum, Bacillus* e *Pseudomonas,* os quais têm mostrado potencial para solubilizar fosfatos inorgânicos, promovendo assim o crescimento e a produtividade das plantas. Os microrganismos podem auxiliar na solubilização de fostato de diversas formas, as quais incluem: a liberação de enzimas extracelulares, via mineralização bioquímica, e

de P durante a degradação do substrato, via mineralização biológica, e a secreção de complexos ou compostos dissobilizadores de minerais, tais como sideróforos e ácidos orgânicos (Sharma *et al*., 2013).

A interação entre os microrganismos e a biodisponibilidade de nutrientes às plantas é variável, e a solubilização do P é realizada por muitas bactérias saprofíticas e fungos que agem sobre fosfatos do solo pouco solúveis, principalmente por mecanismos mediados por quelatos (Whitelaw, 1999). Fungos podem ampliar a superfície radicular das plantas por meio da proliferação de seu micélio. Isso auxilia na exploração radicular no solo, permitindo o acesso em microagregados, que antes eram inacessíveis apenas com a exploração radicular (Begum *et al*., 2019) incrementando a absorção de nutrientes. As bactérias atuam na promoção de crescimento das raízes em plantas, e favorecem também a solubilização de P a partir da redução do pH no solo via produção de ácidos orgânicos (Billah *et al*., 2019). Whitelaw (1999) verificou que *Penicillium radicum* é capaz de solubilizar vários tipos de fosfatos em meio líquido. Além disso, estirpes dos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Rhizobium* são conhecidas por sua eficiência na solubilização de fosfato (Rodríguez; Fraga, 1999).

2.4.2 *Trichoderma yunnanense*

Trichoderma spp. abrange fungos promotores de crescimento de plantas e que têm sido usados com sucesso em escala comercial para o controle biológico de fitopatógenos como *Fusarium oxysporum*, *Rizoctonia solani*, *Armillaria mellea* e *Chondrostereum purpureum* (Benítez *et al*., 2004; El-Komy *et al*., 2015). Esse fungo revolucionou o controle biológico de doenças de plantas no Brasil desde 1987, quando o primeiro produto à base desse fungo foi lançado. Atualmente, biofungicidas à base de *Trichoderma* são usados em diversas culturas, como soja, algodão, milho, feijão, morango, citros, cana-de-açúcar, café, tabaco, hortaliças, ornamentais, frutíferas, espécies florestais e pastagens. Além do controle de doenças, produtos de *Trichoderma* também são utilizados para promover o crescimento das plantas. Mundialmente, estes fungos são frequentemente usados como agentes de biocontrole na agricultura, com mais de 250 biofungicidas comerciais à base de *Trichoderma* registrados (Woo *et al*., 2014). No Brasil, são registrados 78 produtos à base de *T. harzianum* (Bettiol *et al*., 2019; Agrofit, 2024).

Espécies de *Trichoderma* habitam a rizosfera de plantas, que as atrai devido à presença de açúcares e exsudatos derivados da raiz (Lombardi *et al*., 2018). Essas cepas são chamadas de “cepas competentes da rizosfera” e são particularmente adequadas para uso como inoculantes devido à sua longa persistência nas raízes e propriedades benéficas, tais como antagonismo a fitopatógenos e estímulo do crescimento em plantas (López-Bucio *et al*., 2015). Há uma grande variação na capacidade antagônica e na ação bioestimulante de *Trichoderma*, resultando em cepas com predominância de ação bioestimulante e outras com atividade antagônica predominante. Assim, algumas cepas deste fungo são mais adequadas para o controle biológico como biopesticidas, enquanto outras são mais eficazes para estimular o crescimento das culturas e a absorção de nutrientes, atuando como bioestimulantes (Shoresh et a., 2010; Colla *et al*., 2015). Os esporos de *Trichoderma* podem ser aplicados às culturas via pré-plantio em sementes ou material de propagação, incorporação no solo durante a semeadura ou transplante, rega por irrigação, imersão de raízes ou aplicação direta em sementes e raízes – colonização de maior sucesso (Woo *et al*., 2014).

A aplicação de *Trichoderma* spp. tem propiciado resultados promissores na melhoria da produtividade agrícola pela contribuição no manejo de doenças e eficiência da adubação fosfatada, como citado por Mercl *et al*. (2020), e para a sustentabilidade ambiental, de acordo com Mollah e Hassan (2023). *Trichoderma harzianum* é um dos fungos mais comumente empregados no controle biológico de doenças de plantas no Brasil, e está presente em 38% dos produtos comerciais, se destacando no controle biológico de doenças de plantas e na promoção do crescimento vegetal (Gams; Meyer, 1998; Petrisor *et al*., 2015). Ele coloniza raízes, compete com outros microrganismos no solo, e produz enzimas que degradam fungos patogênicos (Sempere Ferre; Santamarina, 2010; Adnan *et al*., 2019). Suas funções incluem combater fungos fitopatogênicos e aumentar a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Li *et al*., 2015a; Pani *et al*., 2021). Contudo, a descoberta de novas cepas de *Trichoderma* tem sido importante para aumentar o arsenal de microrganismos com ações positivas na agricultura, sejam fitossanitárias e/ou para o incremento da produtividade de plantas.

Trichoderma yunnanense é um fungo emergente, cujos estudos apontam potencial uso na agricultura para controle de fitopatógenos e promoção de

crescimento em plantas (Karmakar *et al*., 2021; Zhu *et al*., 2024). Entretanto, pouco se sabe a respeito do seu potencial quando inoculado em pastagens.

2.4.3 *Azospirillum brasilense*

Os microrganismos do gênero *Azosporillum*, bactéria endofítica, passaram a ganhar grande destaque no cenário mundial a partir da década de 1970, tendo 10 espécies descritas (Cassán *et al*., 2020). Eles podem ser encontrados em todas as partes da planta, especialmente nas raízes de gramíneas, tais como a cana-de-açúcar, o milho, o arroz e o trigo (Gonçalves *et al*., 2020). Sua atenção é voltada à descoberta de um benefício agrícola e ambiental, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (Cassán; Diaz-Zorita, 2016). O N_2 não pode ser absorvido pelas plantas sem auxílio de mecanismos que o convertam em amônia (NH_3), assimilável pelos vegetais. A FBN, outrora mediada pela conversão natural do N_2 atmosférico, via descargas elétricas, ou artificial, baseada no uso de fertilizantes nitrogenados, atualmente, é feita em grande escala a partir do auxílio de bactérias fixadoras de N_2 (Soumare *et al*., 2020).

A capacidade de FBN de *Azospirillum* foi detectada inicialmente por uma pesquisadora da Embrapa, Dra. Johanna Döbereiner (Fukami *et al*., 2018). No Brasil, um dos microrganismos mais estudados é o *Azospirillum brasilense*, que vem comprovando na agricultura os seguintes benefícios:

a) *Reduzir os custos com a adubação nitrogenada:* inoculantes contendo as estirpes selecionadas desse microrganismo pode gerar economia de cerca de US$ 2 bilhões por ano (Rodrigues, 2023);
b) *Promover o crescimento das plantas:* isso ocorre devido à produção de compostos que ajudam nos processos biometabólicos das plantas, como os hormônios vegetais ácido indol-acético, giberelinas e citocininas (Tien *et al*., 1979; Fukami *et al*., 2018). As plantas têm um estímulo ao crescimento e densidade radicular, aumentando a superfície de contato das raízes com o solo e o consequente aproveitamento de água e nutrientes (Hasegawa *et al*., 2000; Munns; Tester, 2008);
c) *Melhorias em parâmetros fotossintéticos*: a associação com plantas faz com que elas passem a ter um uso mais eficiente da radiação do solar, refletindo na maior taxa de crescimento e maior produção de massa seca das plantas (Barassi *et al*., 2008);

d) *Tolerância a estresses*: em virtude do sistema radicular das plantas ser mais desenvolvido, elas passam a apresentar maior vigor e maior tolerância a estresses hídricos e salinos (Corassa *et al*. 2013; Fukami *et al*., 2018); e
e) *Solubilização de fósforo*: isso torna o nutriente mais acessível às plantas (Turan *et al*., 2012).

2.4.4 *Bacillus mycoides*

Bacillus mycoides é uma bactéria Gram-positiva, não móvel, pertencente ao grupo *Bacillus cereus*. Esta espécie é conhecida por formar colônias com células ligadas de ponta a ponta, ou seja, como as células organizam seu crescimento conectando-se umas às outras, criando filamentos contínuos que se estendem radialmente na colônia e se curvam no sentido horário ou anti-horário (Shahzad *et al*., 2024). A morfologia das colônias de *B. mycoides* é um traço genético que pode ser influenciado por fatores ambientais ou do meio onde é cultivado, como a dureza do ágar e a concentração de nutrientes (Rocha *et al*., 2023).

Além de sua morfologia distinta, *B. mycoides* tem sido estudada por seu uso potencial como agente de biocontrole e promotor de crescimento de plantas (Stratford *et al*., 2013). Pesquisas comparativas de transcriptômica revelaram que cepas endofíticas e de solo dessa bactéria respondem de maneira diferente aos exsudatos de raízes de batata (Boussageon *et al*., 2023). As cepas endofíticas mostraram capacidade de colonização mais forte e resposta mais pronunciada em termos de expressão gênica, em comparação com as cepas derivadas do solo (YI *et al*., 2017). Esses resultados sugerem que *B. mycoides* pode ter adaptações genéticas específicas que favorecem sua interação com plantas hospedeiras (Di Franco *et al*., 2002).

A capacidade de *B. mycoides* de formar padrões complexos em colônias também tem implicações para a compreensão da multicelularidade e da diferenciação em bactérias. A formação de colônias padronizadas pode proporcionar vantagens como proliferação aumentada, acesso a nutrientes inacessíveis para indivíduos isolados e defesa coletiva contra condições adversas (Stratford *et al*., 2013). Modelos matemáticos têm sido utilizados para analisar a formação de colônias bacterianas como um exemplo de complexidade em sistemas abertos, considerando variáveis como a produção cíclica de quimioatraentes e quimiorrepelentes (Tan; Liu, 2020; Trunet *et al*., 2024).

Bacillus mycoides tem mostrado potencial significativo quando associado a adubos fosfatados, especialmente no que se refere ao estresse por metais pesados em plantas (Ambrosini *et al*., 2016; Beryl *et al*., 2021). Um estudo recente investigou o efeito combinado de *B. mycoides* endofítico e fosfato de rocha na mitigação do estresse causado por metais pesados em plantas de trigo. Os resultados indicaram que a combinação dessa bactéria e fosfato de rocha aumentou o comprimento do caule, a largura das folhas e o conteúdo de proteínas e açúcares nas plantas, além de reduzir os acúmulos de níquel e zinco (Shahzad *et al*., 2024). Isso sugere que o uso desta bactéria pode melhorar a nutrição das plantas e reduzir a toxicidade dos metais pesados quando usado em conjunto com adubos fosfatados. Além disso, a interação dessa bactéria com fungos micorrízicos arbusculares (AMFs) e bactérias degradadoras de fosfato pode melhorar a nutrição com P nas plantas (Nanjundappa *et al*. 2019; Wilkes *et al*., 2020). Em estudo com batatas, a inoculação com um consórcio de Bacillaceae, incluindo *B. mycoides*, proporcionou impacto positivo na colonização por AMF, na nutrição de P das plantas e no rendimento dos tubérculos (Yi *et al*., 2017). Esses resultados destacam a capacidade desse microrganismo em atuar sinergicamente com outros microrganismos do solo para melhorar a disponibilidade de P para as plantas.

A capacidade de *B. mycoides* de solubilizar fosfatos insolúveis também é um fator importante na sua associação com adubos fosfatados, aumentando também a disponibilidade de P para as plantas (Santos; Oliveira, 2005). Essa característica é particularmente útil em solos onde o nutriente está presente em formas não disponíveis para as plantas, permitindo utilização mais eficiente dos adubos fosfatados (Saeid *et al*., 2018). A bioinoculação deste microrganismo é apontada como satisfatória para o crescimento e desenvolvimento de gramíneas (Costa *et al*., 2022).

2.5 Interações entre microrganismos e adubos fosfatados

Os microrganismos presentes no solo são importantes para incrementar a absorção de nutrientes pelas plantas, participando de diversos processos biológicos. Alguns desses microrganismos têm a capacidade de solubilizar o P não lábil no solo, tornando-o disponível para as plantas. Além da fertilização mineral, a solubilização e mineralização de P por microrganismos são métodos eficazes para aumentar a quantidade deste nutriente acessível às plantas. Muitos microrganismos no solo e na

rizosfera são conhecidos por liberar P do solo por meio desses processos (Bald *et al*., 2021; Timmofeeva *et al*., 2022).

Segundo Wakelin *et al*. (2012), os microrganismos podem solubilizar e mineralizar o P através de vários mecanismos, que podem incluir:

a) *Alteração dos equilíbrios de sorção*: Isso traz o fosfato para a solução do solo, tornando-o disponível para as plantas;
b) *Aumento do ciclo da matéria orgânica*: Tanto a matéria orgânica das plantas quanto a microbiana são recicladas, liberando fósforo no processo;
c) *Solubilização ou mineralização de P*: Isso ocorre a partir de fontes de fósforo inorgânico ou orgânico que estão pouco disponíveis.

Os dois primeiros mecanismos são considerados não específicos e estão relacionados à atividade microbiana geral do solo, em vez de processos específicos do ciclo do P. O terceiro mecanismo pode ser dividido em processos gerais e específicos. Os processos gerais estão associados à exsudação de prótons (H^+) no solo, que normalmente ocorre após a assimilação microbiana de amônio (NH_4^+) e de outros cátions. Enquanto os processos específicos da exsudação de prótons (H^+) no ciclo do P envolvem mecanismos que diretamente influenciam a disponibilidade desse nutriente para as plantas, tais como a solubilização de fosfatos minerais, onde microrganismos liberam ácidos orgânicos e prótons para dissolver compostos de fósforo, tornando-os mais acessíveis às plantas (Illmer; Schinner, 1995).

As interações entre microrganismos e adubos fosfatados desempenham papel crucial na produção sustentável de pastagens (Muir *et al*., 2011; Mendoza *et al*., 2016), especialmente em sistemas que utilizam *U. brizantha* (Alves Filho *et al*., 2016). A utilização de PGPMs pode aumentar a eficiência dos adubos fosfatados, melhorando a exploração das raízes no solo (efeito hormonal) e/ou a disponibilidade de P para as plantas, promovendo crescimento mais vigoroso e sustentável, pois as plantas aproveitam melhor os fertilizantes, reduzindo a necessidade de aplicações excessivas e minimizando impactos ambientais (Demetz; Insam, 1999; Rosa *et al*., 2020).

Um exemplo recente de inovação nessa área é a tecnologia de inoculação multifuncional desenvolvida pela Embrapa (2021), que combina microrganismos como *A. brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*. Esses microrganismos não apenas aumentam a produção de biomassa das pastagens, mas também melhoram a

absorção de nutrientes como N, P e potássio. A inoculação com esses microrganismos pode ser feita via sementes ou foliar, atendendo tanto pastagens recém-estabelecidas quanto já estabelecidas.

Além disso, a solubilização de fosfatos insolúveis por microrganismos é um mecanismo importante para aumentar a disponibilidade de P no solo. Microrganismos como *Bacillus* spp. e *Pseudomonas* spp. são conhecidos por suas capacidades de solubilizar fosfatos e torná-los acessíveis às plantas (Swain *et al*., 2012; Oteino *et al*., 2015; Saeid *et al*., 2018; Rezende *et al*., 2021). Essa interação é particularmente benéfica em solos ácidos e com baixos teores de P, onde a aplicação de adubos fosfatados pode ser menos eficiente sem a presença destes microrganismos (Prakash; Arora, 2019; Rezende *et al*., 2021; Rawat *et al*., 2021).

A integração de microrganismos multifuncionais na adubação fosfatada também pode contribuir para a sustentabilidade ambiental. A utilização de biofertilizantes à base de microrganismos pode reduzir a necessidade de fertilizantes minerais, diminuindo os custos de produção e os impactos ambientais associados à lixiviação de nutrientes (Kumar *et al*., 2022). Ademais, a inoculação com microrganismos pode promover o acúmulo de carbono na biomassa das pastagens, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Gao *et al*., 2016; Pinheiro *et al*., 2020).

2.6 Sustentabilidade na recuperação de pastagens em degradação

A degradação de pastagens é definida como redução permanente ou temporária da capacidade produtiva do solo (Stocking; Murnaghan 2001), sendo resultante de fatores tais como: estabelecimento da pastagem em solos frágeis ou inférteis; uso de gramíneas com baixa adaptabilidade ou com pouca adaptabilidade; compactação do solo; decréscimo na fertilidade do solo, especialmente em P e N, ou falta de manejo na fertilização; bem como a compactação e erosão do solo (Myster; Montangnini, 2008).

O manejo inadequado da pastagem, incluindo taxa de lotação excessiva e altura de pastejo inadequada, pode acelerar a degradação do solo e reduzir a produtividade da forrageira. A superlotação leva à compactação do solo, dificultando a infiltração de água e a absorção de nutrientes, enquanto o pastejo excessivo impede a recuperação das plantas, reduzindo a cobertura vegetal e aumentando a vulnerabilidade à erosão (SENAR, 2012).

Além das perdas na produtividade do rebanho, seja para leite ou carne, há ainda perdas ambientais como erosão do solo, assoreamento de corpos d'água, redução da biodiversidade e emissão de gases de efeito estufa devido à menor capacidade de sequestro de carbono pelo solo (Holmann *et al*., 2004; SENAR, 2012). Logo, a sustentabilidade na recuperação de pastagens em degradação é um tema crucial para a agricultura moderna, especialmente no contexto brasileiro, onde vastas áreas de pastagens estão em diferentes estágios de degradação. A recuperação dessas áreas é essencial não apenas para aumentar a produtividade agropecuária, mas também para promover a sustentabilidade ambiental e econômica (Silva *et al*., 2017; Strassburg *et al*., 2017).

A recuperação de pastagens degradadas envolve várias estratégias, incluindo a correção da fertilidade do solo, o manejo adequado da vegetação e a introdução de práticas de manejo sustentável (Oliveira *et al*., 2001; Mosier *et al*., 2021). A adubação fosfatada, por exemplo, é uma prática fundamental para a recuperação de pastagens, pois, como supracitado, o P é um nutriente muito importante para o crescimento das plantas (Daniels *et al*., 2001; Serrano *et al*., 2010; Alewell *et al*., 2020). A utilização de FN pode ser uma alternativa sustentável, pois libera P de forma gradual, reduzindo a necessidade de aplicações frequentes e minimizando os impactos ambientais (Guedes *et al*., 2012; Cabral *et al*., 2020). Rodrigues *et al*., (2007) observaram que a revegetação de áreas degradadas remanescentes da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil com *U. brizantha*, proporcionou teores de matéria orgânica e volume de macroporos semelhantes ao do Cerrado natural e maiores que o solo exposto.

Além da adubação, os sistemas agroflorestais e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) são outras estratégias sustentáveis para a recuperação de pastagens degradadas. Nestes sistemas, há a combinação da produção agrícola, pecuária e florestal em uma mesma área, promovendo a diversificação da produção e a melhoria da qualidade do solo. A ILPF pode aumentar a resiliência dos sistemas de produção, reduzir a emissão de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade econômica e ambiental (Glatzle *et al*., 2021; Valani *et al*., 2021). Ainda, a integração com PGPMs pode aumentar a eficiência da recuperação de pastagens. Microrganismos como *A. brasilense* podem promover o crescimento radicular e incrementar a absorção de nutrientes pelas plantas, resultando em pastagens mais vigorosas e produtivas (Duarte *et al*., 2020; Hungria *et al*., 2022). A inoculação com esses

microrganismos pode ser feita via sementes ou foliar, atendendo tanto pastagens recém-estabelecidas quanto já estabelecidas (Heinrichs *et al*., 2020; Guimarães *et al*., 2022).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade de solubilização de fosfato e compatibilidade de microrganismos promotores de crescimento (*Azospirillum brasilense, Bacillus mycoides e Trichoderma yunnanense*), bem como avaliar o efeito de doses de P_2O_5 – fosfato natural (FN) e da aplicação dos microrganismso em áreas de pastagem consolidada com *U. brizantha* cv. Marandu, com início de degradação moderada.

3.2 Objetivos específicos

a) Selecionar dentre os microrganismos testados, aquele(s) capaz(es) de solubilizar P, visando fornecer *"insights"* relevantes para investigações futuras sobre essas interações microbianas aplicadas à inoculação em pastagens;
b) Avaliar a compatibilidade entre os microrganismos testados *in vitro*;
c) Verificar o efeito de doses de P_2O_5 associadas ou não à aplicação dos microrganismos nas características morfológicas e no crescimento da planta;
d) Avaliar o efeito de doses de P_2O_5 associadas ou não à aplicação dos microrganismos na produção de biomassa e na produtividade da forrageira;
e) Comparar o efeito da adubação fosfatada e aplicação dos microrganismos na concentração de nutrientes, acúmulo e eficiência do uso de P na parte aérea da planta.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos, sendo o primeiro em condições de laboratório e o segundo em condições de campo. Em laboratório, o as análises foram realizadas no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da AMTec Bioagrícola, Iturama – MG, Brasil e em campo, o experimento foi implementado na Fazenda Escola da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Iturama, Minas Gerais, em pastagem consolidada de *U. brizantha* cv. Marandu, cultivada há aproximadamente 30 anos e em início de degradação moderada (nível 2). Essas pastagens são caracterizadas pelo aumento na infestação de plantas daninhas ou no percentual de solo descoberto, tendo a capacidade de suporte animal decrescendo entre 30 e 50% (Dias-Filho, 2023).

4.1 Experimento 1: condições de laboratório

4.1.1 Solubilização de fosfato *in vitro*

Para o ensaio de solubilização de fosfato *in vitro* dos isolados dos microrganismos, foi utilizado o método de Sylvester-Bradley *et al*. (1982), o qual se baseia na adição de fosfato insolúvel ao meio. Para análise de fosfato de cálcio e formação do fosfato inorgânico (fosfato de bicálcico: $CaHPO_4$), uma solução de 100 mL de K_2HPO_4 a 10% e 50 mL de solução de $CaCl_2$ a 10%, autoclavadas separadamente e adicionados a 850 mL de meio, foi preparada até formar um precipitado fino, correspondente ao fosfato inorgânico ($CaHPO_4$). O meio de cultura utilizado foi o NBRIP [glicose (10g), $MgCl_2$ $6H_2O$ (5g), $MgSO_4$ (0,25g), KCl (0,2g), $(NH_4)_2SO_4$ (0,1g), ágar (15g), água destilada (1L)] com pH 7,0. Após a preparação, o meio foi vertido em placas de Petri.

Os microrganismos foram crescidos por 48 h em caldo nutriente a 28° C sob agitação constante de 150 rpm. Foram transferidos 5 uL (10^8 UFC mL^{-1}) de cada isolado microbiano (tratamentos) para as placas de Petri. Em seguida, eles foram incubados a 28 °C. Após 7 dias, a atividade de solubilização do fosfato foi determinada pela presença ou ausência de halo ao redor das colônias, comum para os organismos capazes de solubilizar fosfato. O diâmetro do halo (DH) e da colônia (DC) foram mensurados para quantificação do índice de solubilização (IS) de acordo com a equação:

$$\mathrm{IS} = {}^{DH\ (mm)}/_{DC\ (mm)}$$

A classificação dos isolados quanto a capacidade de solubilização é mediada pelo valor de IS, sendo considerado baixo (IS<2), médio (2≤IS≤4) e alto (IS>4) (Berraquero *et al*., 1976). A estimativa quantitativa de solubilização de fosfato foi realizada usando quatro repetições em delineamento inteiramente ao acaso.

4.3.2 Ensaio de compatibilidade com os isolados

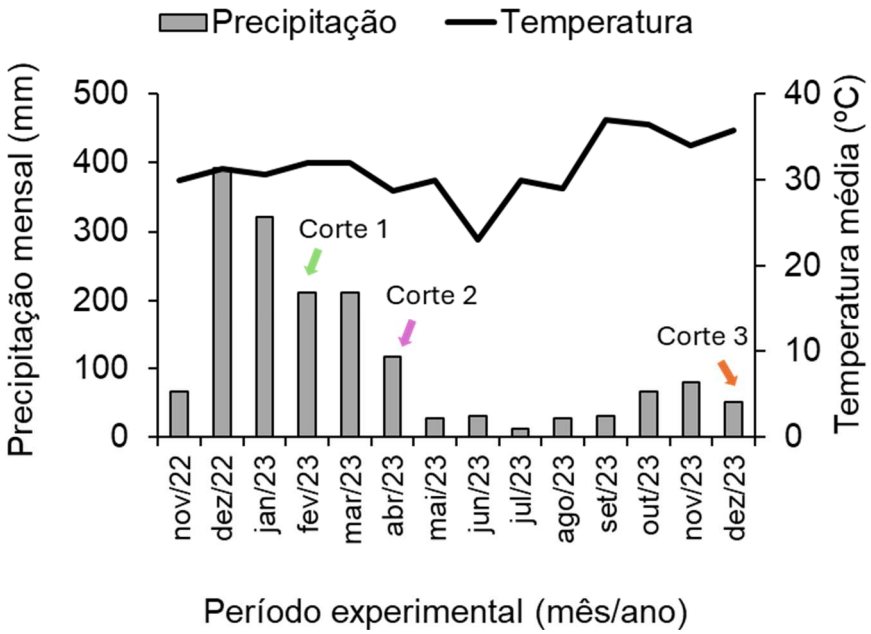
As cepas de microrganismos foram confrontadas na mesma placa de Petri para avaliar sua compatibilidade *in vitro.* O teste foi feito utilizando a metodologia de pareamento de culturas, descrita por Dennis e Webster (1971), dispondo os tratamentos: *B. mycoides* + *A. brasilense.* No bioensaio utilizando o isolado do fungo: *T. yunnanense* + *B. mycoides* e *T. yunnanense* + *A. brasilense*, 5 mm de micélio do fungo foi disposto no centro de placas de Petri de 90 mm de diâmetro, contendo meio BDA. As bactérias testadas foram cultivadas em meio caldo nutriente por 48 h a 28°C sob agitação constante de 150 rpm, onde foi feito ajuste da suspensão para 10^8 UFC mL^{-1}. Em seguida, 5 µl da suspensão bacteriana foram distribuídos em quatro pontos equidistantes, formando um quadrante. Os microrganismos foram confrontados com as cepas de *A. brasilense* separadamente. As placas foram incubadas a 28 ± 2 °C, sob luz branca contínua, em triplicata e a compatibilidade da cepa foi determinada pela ausência de uma zona de inibição.

4.2 Experimento 2: condições de campo

4.2.1 Caracterização do local

A Fazenda Escola da UFTM fica localizada na latitude 19º 43’ 47,48’’S e longitude 50º 14’ 01,47’’O, com elevação de 440 metros de altitude. O período experimental foi de novembro de 2022 a dezembro de 2023, no qual foram realizados três cortes das plantas para coleta e análise. O clima do local é definido como Aw, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al*., 2013), sendo caracterizado com temperatura média anual de 24,7 ºC e precipitação média anual de 1378 mm. Durante o período de avaliação foram coletadas informações sobre as condições climáticas de acordo com os dados do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Figura 1).

Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura médias Iturama, Minas Gerais, Brasil durante os períodos de crescimento de *Urochloa brizantha* cv. Marandu entre os meses de novembro de 2022 e dezembro de 2023. Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE). As setas representam os meses em que foram realizados os cortes da planta (seta verde indica o primeiro corte – fevereiro, a seta lilás indica o segundo corte e – abril e a seta laranja indica o terceiro corte – dezembro.



Fonte: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Antes da montagem do experimento foi realizada a amostragem do solo na profundidade de 0,0 a 0,20 m, sendo realizadas as análises químicas, segundo metodologia de van Raij *et al*. (2001): para P, K, Ca e Mg foi utilizado o método da resina trocadora de íons; pH em $CaCl_2$; matéria orgânica via colorimetria; H + Al com solução tampão SMP e Al em KCl. Ainda, realizou-se a análise de granulometria do solo segundo metodologia de Teixeira *et al*. (2017) (Tabela 1). As plantas foram cultivadas em um Latossolo Vermelho distrófico, de acordo com Santos *et al*. (2018), com textura areno-argilosa, conforme dados apresentados na tabela 1. O solo foi corrigido com calcário dolomítico (90% de PRNT) na dose de 4000 kg ha^{-1} aplicado a lanço, sem incorporação, 90 dias antes da adubação fosfatada e da inoculação com microrganismos, com o objetivo de elevar a saturação por bases para 70%.

Tabela 1. Atributos químicos do solo na camada de 0–0,20 m e análise granulométrica antes do início do ensaio no campo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Atributos químicos do solo	Camada de 0,0 – 0,20 m
P (resina)	3 mg dm^{-3}
S-SO_4	2 mg dm^{-3}
Matéria orgânica	18 g dm^{-3}
pH ($CaCl_2$)	4,4
K	1,3 $mmol_c$ dm^{-3}
Ca	5,0 $mmol_c$ dm^{-3}
Mg	5,0 $mmol_c$ dm^{-3}
H + Al	31,0 $mmol_c$ dm^{-3}
CTC	42,3 $mmol_c$ dm^{-3}
B (água quente)	0,27 mg dm^{-3}
Cu (DTPA)	3,3 mg dm^{-3}
Fe (DTPA)	15,0 mg dm^{-3}
Mn (DTPA)	4,2 mg dm^{-3}
Zn (DTPA)	0,4 mg dm^{-3}
Saturação por bases	27%
Análise granulométrica	**Total**
Areia total	759 g kg^{-1}
Argila	184 g kg^{-1}
Silte	57 g kg^{-1}

DTPA = solução quelante de ácido dietilenotriaminapentaacético
Fonte: Próprio autor.

Vale salientar que antes da implantação do experimento, quatro meses antes, houve manejo fitossanitário na área. Foram realizados o controle mecânico de plantas daninhas e a destruição manual de cupinzeiros, além da distribuição uniforme de iscas para controle de formigas cortadeiras à base de Fipronil®.

4.2.2 Caracterização do experimento

O experimento foi implantado em delineamento de blocos casualizados (DBC) em arranjo fatorial 4 × 4, sendo quatro doses de fosfato natural - FN (0; 33; 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e 4 tratamentos de inoculação: Controle – sem inoculação e inoculação com *A. brasilense*, *B. mycoides* e *T. yunnanense*. Os isolados foram fornecidos pela AMTec Bioagrícola, Iturama, Brasil. Foram usadas quatro repetições, totalizando 64 parcelas de 3,0 m × 3,0 m (9 m^2). Os dois últimos estão em coleção

oficial da empresa e depositados na Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia André Tosello, codificados respectivamente como CCT 8332 e CCT 8328. O isolado de *A. brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6) faz parte da coleção da Embrapa Soja.

O FN foi extraído de rocha fosfática pela indústria de fertilizantes Rialma, Taipas do Tocantins, Tocantins, Brasil. O material apresentou as seguintes características granulométricas: 100% passando por 2 mm, 77% passando por 0,3 mm e 45% passando por 0,075 mm. A composição química da rocha fosfática foi: 58,0% de SiO_2; 12,1% de CaO; 9,3% de P_2O_5 solúvel em CNA + água; 2,6% de K_2O; 1,7% de MgO; 7,5% de Al_2O_3; 3,7% de FeO_2; 0,12% de N_2O; 0,40% de TiO_2; e 0,30% de MnO.

Após a aplicação do FN (20/11/2022), a lanço e sem incorporação ao solo, conforme os tratamentos supracitados, foram aplicados 300 mL ha^{-1} de cepas dos microrganismos na concentração de 2 x 10^8 UFC mL^{-1}, via pulverização (250 L ha^{-1} de calda) sobre as plantas forrageiras (23/11/2022). Essa aplicação foi feita quando houve precipitação de 10 mm no local do experimento. Para isso foi usado um pulverizador costal de CO_2 com pressão de 30 psi e bico tipo leque simples com abertura de 110º (Magno Jet®). No momento da aplicação foram seguidas as recomendações da tecnologia aplicação: temperatura < 30 ºC; UR >60% e vento entre 3 e 10 km h^{-1}. Todo esse processo foi realizado uma única vez, no início do experimento, ou seja, avaliou-se o efeito residual da adubação fosfatada e da inoculação dos microrganismos nos cortes do capim.

As avaliações foram realizadas no período destacado na Figura 1 (fevereiro, março e dezembro de 2023). Este período compreende as datas nas quais as plantas apresentavam a altura média necessária para análise (cortes). Os cortes da parte aérea da forragem foram realizados manualmente quando a pastagem apresentava em média 45 cm de altura na melhor parcela. Cada corte foi realizado com a utilização de cutelos, a 15 cm da altura do solo, numa área de 0,25 m^2 por parcela. Os valores dos cortes foram extrapolados para 1 m^2 e o total multiplicado por 10000 m^2, visando a obtenção dos valores estimados para 1 ha. As seguintes variáveis foram analisadas:

a) Teor de clorofila foliar (atLEAF), altura das plantas e perfilhamento

Antes do corte do capim foram realizadas análises do teor de clorofila, medidas da altura das plantas e contagem do número de perfilhos por m^2 de cada parcela. A

leitura da clorofila foi realizada na posição do terço médio da lâmina de folhas recém-expandidas a partir do ápice de cada planta, com aparelho atLEAF CHL Plus, onde foram tomadas leituras de unidades atLEAF em 5 folhas (Novichonok *et al*., 2018). Para avaliação da altura média das plantas, realizada com auxílio de uma régua milimetrada, foram usadas cinco repetições dentro da parcela. Em seguida foi realizada a contagem do número de perfilhos por m² (uma repetição por parcela) usando um círculo metálico com área conhecida de 0,008 m², fixado no mesmo local durante todo o experimento. Os valores obtidos em cada repetição foram extrapolados posteriormente para 1 m².

b) Massa seca da parte aérea média e acumulada, teor de proteína bruta e relação folha:colmo

A massa de forragem foi mensurada por meio do uso de um objeto quadrado plástico com área conhecida (1 m²) por unidade experimental. Os quadrados foram posicionados em pontos representativos de cada parcela e a forragem contida no seu interior foi cortada a 15 cm de altura em relação ao solo (simulando altura de pastejo). Foram retiradas duas amostras do material colhido. Parte do material foi separada (pseudocolmo – colmo + bainha) para análise da relação folha:colmo e outra separada para a determinação da massa seca (MS) e para análise do teor de proteína bruta (lâmina foliar verde). O material foi pesado e seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 ºC por 72 h, conforme descrição de Silva e Queiroz (2002). O teor de proteína bruta da planta foi calculado multiplicando-se o teor de N-total por 6,25 (Silva e Queiroz, 2002). Os valores de MS amostrados no campo foram convertidos para kg ha^{-1} de massa seca de forragem por hectare. A soma dos valores obtidos dos três cortes foi usada para análise do acúmulo de massa seca da gramínea (ACMS). A relação folha:colmo (RFC) foi mensurada a partir da massa seca das folhas dividido pela massa seca dos colmos. Essa análise é importante para avaliar a qualidade da forragem, pois as folhas geralmente possuem maior valor nutritivo do que os colmos.

b) Concentração de macro e micronutrientes na forragem, fósforo extraído da produção total e eficiência do uso de P da forragem

Após secagem e moagem da massa seca da forragem em moinho tipo Willey, determinou-se as concentrações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e

micronutrientes (Fe, Cu, Mn e Zn) na parte aérea, seguindo metodologia de Malavolta *et al*. (1997). As análises foram realizadas no Laboratório de Nutrição de Plantas da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP, Brasil.

O fósforo extraído da produção total (PEP) também foi avaliado. A análise foi realizada com base na média do somatório dos valores médios de P acumulados das forrageiras (parte ceifada) obtidos dos três cortes. A partir dos dados de massa seca e do teor de P, bem como do conteúdo desse nutriente na biomassa vegetal, calculou-se a eficiência de uso de fósforo (EUP), convertida para g mg^{-1}, conforme Siddiqi & Glass (1981):

$$\text{EUP} = \frac{massa\ de\ matéria\ seca^2}{conteúdo\ de\ P}$$

4.3 Análise dos dados

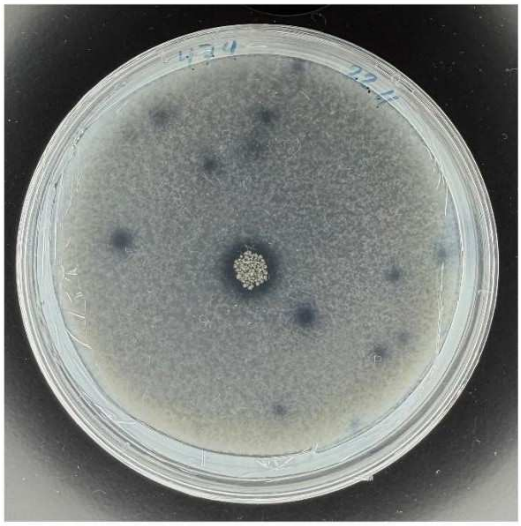
Para cada variável, utilizou-se os dados médios de três cortes da *Urochloa brizantha* cv. Marandu no experimento 2. Estes dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e os resultados obtidos foram submetidos a teste de média, sendo as médias das respostas dos efeitos isolados ou da interação entre os fatores comparadas pelo teste Tukey ($\alpha = 0,05$). O teste de média também foi aplicado aos ensaios de solubilização de fosfato e compatibilidade entre os organismos, quando necessário. A análise de regressão foi utilizada para as doses de FN e as equações significativas (teste F e $p < 0,05$) com os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram ajustadas. Os dados foram analisados usando o software R 4.4.1 (R Core Team, 2024).

5 RESULTADOS

5.1 Experimento 1

Não foram observados halos de solubilização no meio contendo os isolados de *A. brasilense* e *T. yunnanense*. Em contrapartida, houve formação do halo no isolado de *B. mycoides* (Figura 2), cujo valor de IS foi de 1,6 ± 0,06. A capacidade de solubilização dos microrganismos estudados foi considerada baixa (IS<2).

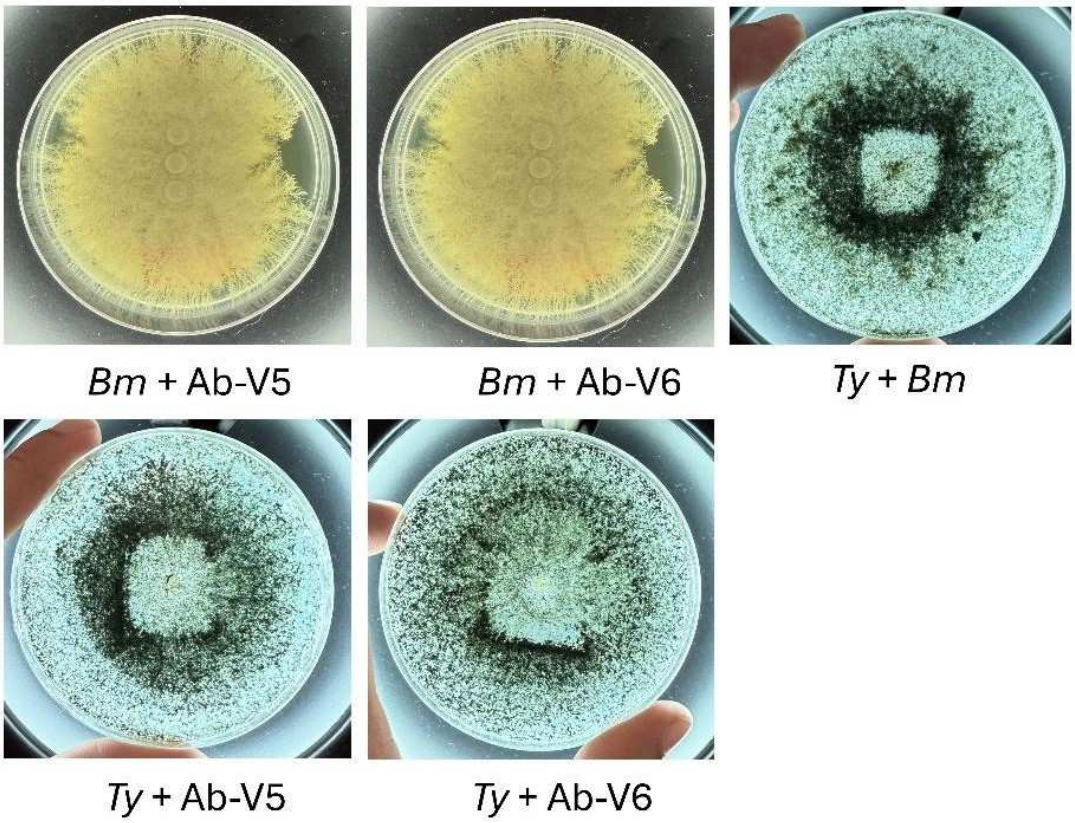
Figura 2. *Bacillus mycoides* exibindo halo de solubilização de fosfato em meio NBRIP.



Fonte: Próprio autor.

Não foi observada nenhuma zona de inibição entre os microrganismos testados. Diante disso, verificou-se que todas as combinações (coinoculações) destes microrganismos foram compatíveis entre si (Figura 3).

Figura 3. Compatibilidade entre *Azospirillum brasilense* (Abv5 + Abv6), *Bacillus mycoides* (*Bm*) e *Trichoderma yunnanense* (*Ty*) sob co-cultivo em condições *in vitro*.

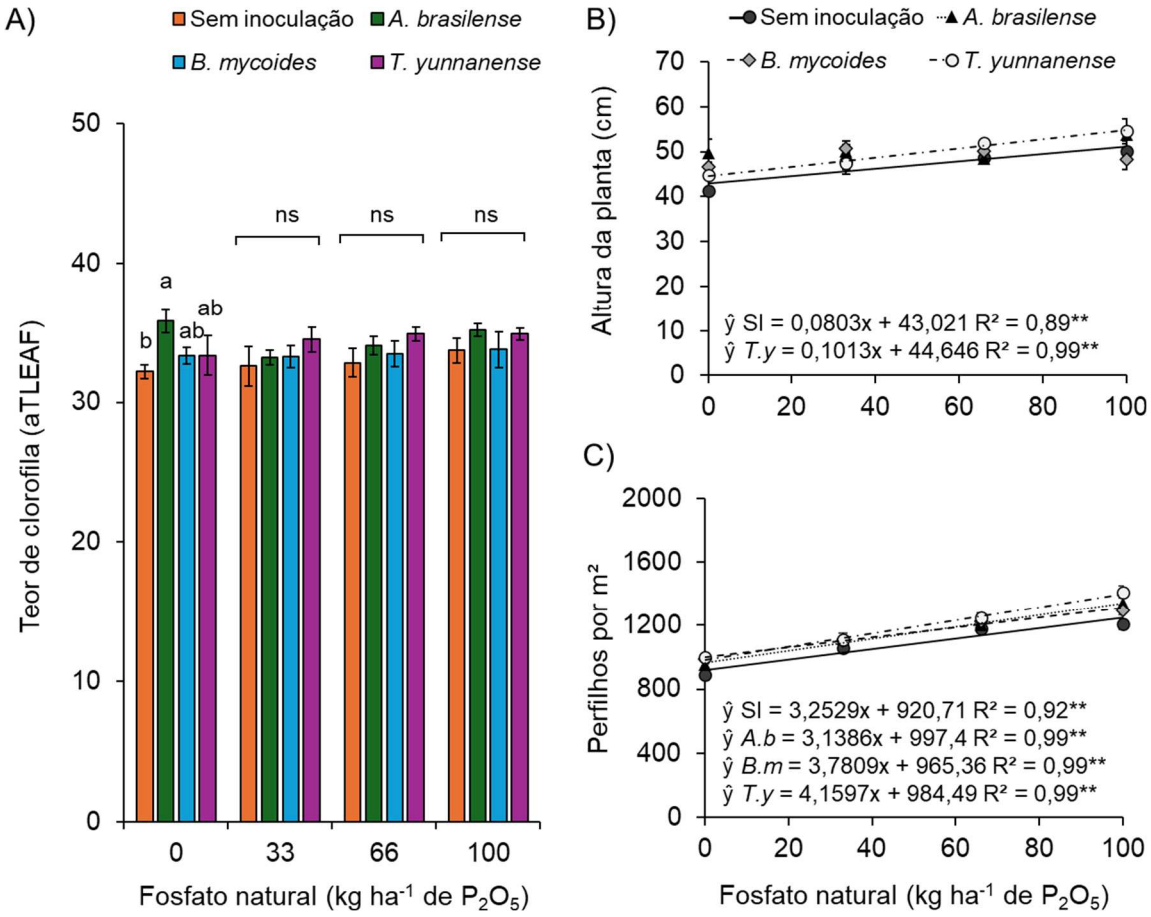


Fonte: Próprio autor.

5.2 Experimento 2

O teor médio de clorofila da *U. brizantha* cv. Marandu dos três cortes foi influenciado apenas pelas inoculações ($F_{45,3} = 6{,}104$; $p = 0{,}0014$), sendo maior quando aplicado *A. brasilense* sem associação com FN quando comparado ao tratamento sem inoculação, aproximadamente 36 aTLEAF (Figura 4A). A altura média da planta nos três cortes foi influenciada pela inoculação de *A. brasilense* com e sem uso de FN ($F_{45,3} = 2{,}989$; $p = 0{,}0408$), com valor médio observado de 50 cm (Tabela 2). Os demais inóculos comportaram-se tal como *A. brasilense*. A altura da planta aumentou de forma linear de acordo com o aumento da dose de FN ($F_{45,3} = 8{,}667$; $p = 0{,}0001$) associada à inoculação com *A. brasilense* e *T. yunnanense* (Figura 4B).

Figura 4. A) Teor de clorofila, B) altura da planta e C) perfilhamento médios de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e ns indica nenhuma diferença significativa. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo linear. Onde não há linha de tendência não houve ajuste de modelo de regressão.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2. Valores médios (± EP) da altura da planta (AP) e perfilhos por m² de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (P_2O_5) associada ou não à inoculação com microrganismos promotores de crescimento em plantas de diferentes cepas: *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328).

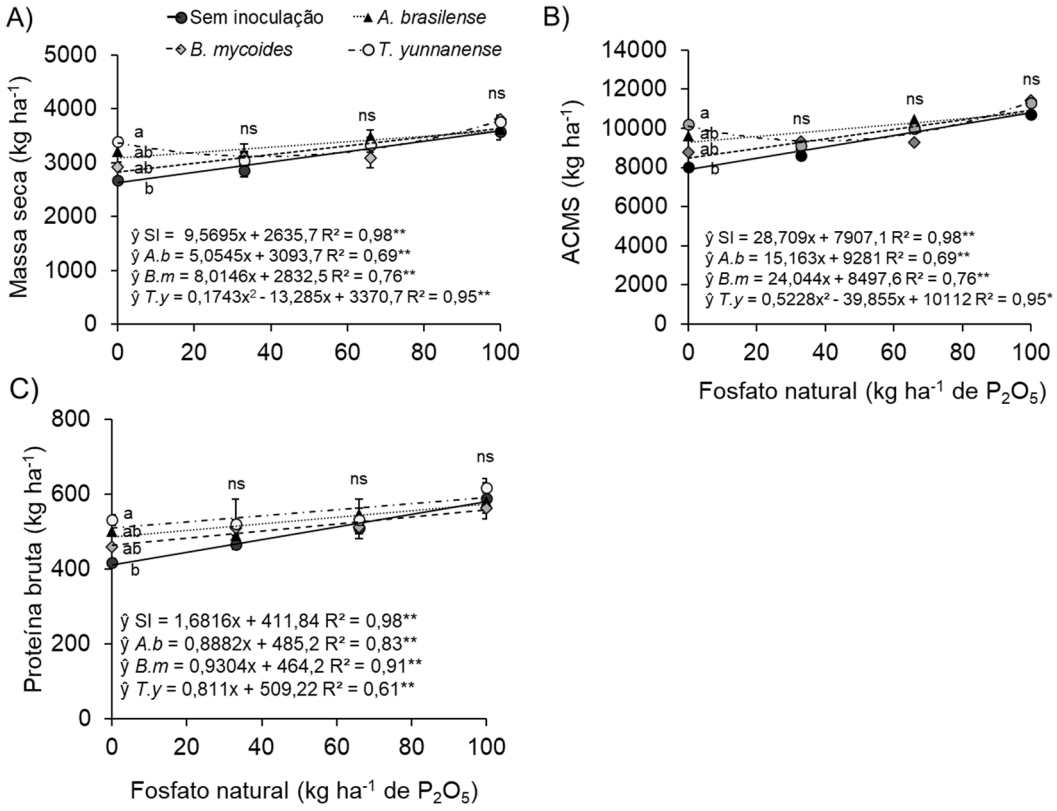
Variáveis	Doses (kg ha^{-1} de P_2O_5)	Sem inoculação	*A. brasiliense*	*B. mycoides*	*T. yunnanense*
Altura da planta (cm)	0	41,4 ± 0,44 B	49,6 ± 3,18 A	46,6 ± 1,13 AB	44,8 ± 0,70 AB
	33	48,0 ± 1,86	50,0 ± 1,60	50,8 ± 1,57	47,4 ± 2,35
	66	48,6 ± 1,12	48,5 ± 0,57	50,1 ± 1,63	52,0 ± 0,32
	100	50,2 ± 2,31	53,7 ± 1,31	48,2 ± 2,16	54,5 ± 2,76
Perfilhos por m²	0	887,3 ± 29,73 B	952,2 ± 16,18 AB	989,9 ± 31,32 A	998,1 ± 14,34 A
	33	1056,4 ± 20,48	1117,3 ± 19,77	1101,6 ± 22,02	1107,5 ± 41,88
	66	1177,9 ± 29,48	1200,3 ± 30,72	1225,3 ± 19,96	1247,2 ± 31,59
	100	1208,6 ± 32,47 C	1344,2 ± 22,35 AB	1297,3 ± 30,55 BC	1413,0 ± 37,89 A

Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na linha indicam diferença estatística significativa entre os microrganismos e a ausência de adubação com FN em cada dose isolada pelo [1]teste de Tukey ($P < 0,05$).
Fonte: Próprio autor.

Quando houve a inoculação com *B. mycoides* e *T. yunnanense* sem aplicar o FN, houve maior perfilhamento, em torno de 990 perfilhos por m² ($F_{45,3} = 11,431$; $p < 0,001$), tendo-se *A. brasilense* não diferindo destes inóculos (Tabela 2). O uso de doses de P_2O_5 associado ou não com a inoculação com microrganismos resultou em aumento linear do número de perfilhos por m² ($F_{45,3} = 132,185$; $p < 0,001$) (Figura 4C), indicando a importância do P para o perfilhamento desta gramínea forrageira. Não houve interação entre as inoculações e as doses de FN para o perfilhamento ($F_{45,9} = 11,431$; $p < 0,001$).

A produtividade média de MS da parte aérea dos três cortes de *U. brizantha* cv. Marandu foi influenciada pelas doses de FN ($F_{45,3} = 18,034$; $p < 0,0001$), ou seja, com o aumento das doses houve aumento linear dessa produção, tanto na ausência de inoculação quanto na inoculação com *A. brasilense* e *B. mycoides*. Houve uma resposta quadrática da planta quando *T. yunnanense* foi aplicado associado às doses de FN, havendo leve redução na menor dose e aumento a partir do aumento da dose de 66 a 100 kg ha^{-1} de P_2O_5. A inoculação com *T. yunnanense* sem a adubação fosfatada aumentou a produção de MS da forrageira comparado à ausência de aplicação do FN nos três cortes ($F_{48,3} = 2,752$; $p = 0,04$) (Figura 5A).

Figura 5. A) Massa seca média, B) acúmulo de massa seca da parte aérea (ACMS) e C) teor de proteína bruta em três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) na dose 0 pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e ns indica nenhuma diferença significativa entre as inoculações em cada dose específica. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (** e *) com ajuste aos modelos linear ou quadrático.



Fonte: Próprio autor.

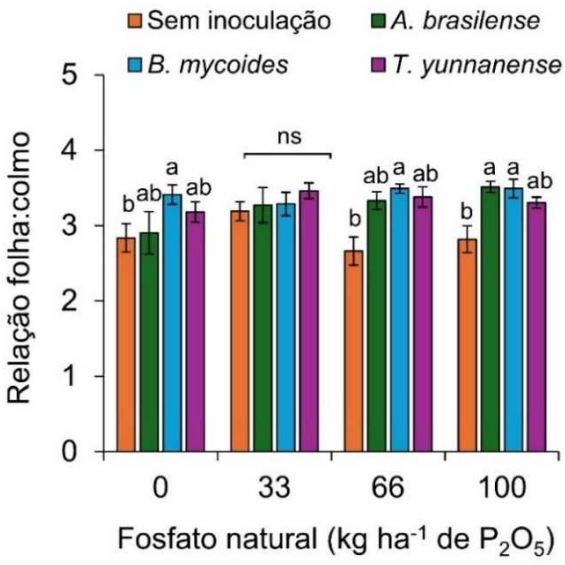
O acúmulo de massa seca na parte aérea da planta foi influenciado pelas inoculações, quando não foi aplicado FN ($F_{48,3}$ = 2,2992; p = 0,004) e pelas doses de P_2O_5 aplicadas ($F_{48,3}$ = 19,608; $p < 0,0001$). A inoculação de *T. yunnanense* favoreceu o ACMS comparado ao tratamento sem inoculação (10147,9 kg ha^{-1}), sem, no entanto, diferir dos demais inóculos. Foram observadas respostas quadrática e linear para os microrganismos supracitados (Figura 5B).

O teor de proteína bruta do capim Marandu médio dos três cortes foi influenciado pelas doses de P_2O_5 ($F_{45,3}$ = 12,349; $p < 0,0001$), com ajuste linear crescente com as doses, quando associado ou não com a inoculação dos

microrganismos (Figura 5C). Houve efeito isolado da inoculação com *T. yunnanense* em *U. brizantha* cv. Marandu, sendo superior quando comparado a ausência de FN ($F_{45,3}$ = 12,349; p < 0,0001), com valor médio dos três cortes de 531 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 5C).

A relação folha:colmo (RFC) do capim Marandu foi influenciada apenas nos tratamentos com ou sem inoculação de microrganismos em cada dose de P_2O_5 ($F_{45,3}$ = 10,497; p = 0,005) (Figura 6). *Bacillus mycoides* promoveu incremento aproximado de 35% à RFC da planta comparado ao tratamento sem inoculação e aplicação de doses de P_2O_5. Por outro lado, na dose 33 kg ha^{-1} de P_2O_5 não houve diferença significativa entre os microrganismos e na dose de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5, os maiores valores foram observados quando da inoculação com *A. brasilense* e *B. mycoides* (Figura 6).

Figura 6. Relação folha:colmo média de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação e com inoculação de diferentes cepas *de* microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre os microrganismos e ausência de FN (SI) em cada dose isolada pelo teste de Tukey (p < 0,05) e ns indica nenhuma diferença significativa.



Fonte: Próprio autor.

Observou-se interação entre a inoculação e as doses de FN para as concentrações de Ca ($F_{45,9}$ = 2,087; p =0,0491) e de Mg ($F_{45,9}$ = 2,495; p = 0,0209) na parte aérea da braquiária em três cortes. Para Ca, a associação de *T. yunnanense*

com 33 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi maior em relação ao *A. brasilense*, enquanto que para Mg na mesma dose de 33 kg ha^{-1} de P_2O_5 houve diferença para os tratamentos sem inoculação e inoculação com *B. mycoides* (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios (± EP) das concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (FN) associada ou não à inoculação com microrganismos promotores de crescimento em plantas de diferentes cepas (*Azospirillum brasilense* Ab-V5 + Ab-V6, *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328).

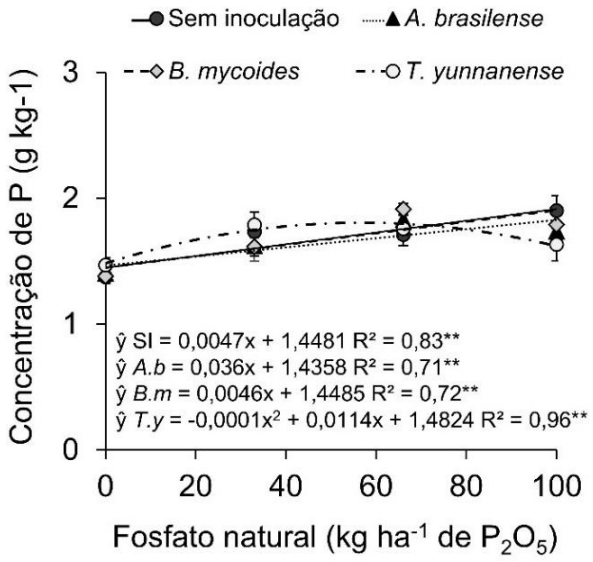
Nut.	Doses (kg ha^{-1} de P_2O_5)	Sem inoculação	*A. brasilense*	*B. mycoides*	*T. yunnanense*
Ca (g kg^{-1})	0	1,7 ± 0,13 aA	1,9 ± 0,36 aA	1,8 ± 0,09 aA	1,7 ± 0,06 aA
	33	2,1 ± 0,15 aAB	1,6 ± 0,11 aB	2,1 ± 0,14 aAB	2,3 ± 0,35 aA
	66	1,7 ± 0,08 aA	1,8 ± 0,12 aA	1,8 ± 0,14 aA	2,3 ± 0,34 aA
	100	1,7 ± 0,11 aA	2,2 ± 0,30 aA	1,9 ± 0,16 aA	1,8 ± 0,20 aA
Mg (g kg^{-1})	0	1,6 ± 0,12 aA	2,2 ± 0,53 aA	1,8 ± 0,08 aA	1,7 ± 0,15 bA
	33	2,3 ± 0,33 aA	1,7 ± 0,22 aA	2,4 ± 0,20 aA	2,6 ± 0,62 abA
	66	1,8 ± 0,08 aB	1,9 ± 0,26 aAB	1,8 ± 0,13 aB	2,8 ± 0,51 aA
	100	1,8 ± 0,24 aA	2,6 ± 0,51 aA	1,8 ± 0,12 aA	1,9 ± 0,32 abA

Médias seguidas de letras diferentes minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam diferença estatística significativa entre as doses de P_2O_5 aplicadas e entre os microrganismos e a ausência de adubação com FN em cada dose isolada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), respectivamente. Nut. = nutriente.

Fonte: Próprio autor.

A concentração dos macronutrientes N (8,6 g kg^{-1}), K (14,1 g kg^{-1}) e S (1,2 g kg^{-1}) não apesentou respostas significativas à inoculação ou às doses de FN. Por outro lado, houve aumento linear da concentração de P em função do aumento das doses de FN, associados ou não à inoculação com *A. brasilense* e *B. mycoides*, e ajuste quadrático quando aplicado em associação a *T. yunnanense*, em que notou-se ponto de máximo de 57 kg ha^{-1} de P_2O_5 ($F_{45,3} = 20,064$; $p < 0,0001$) (Figura 7).

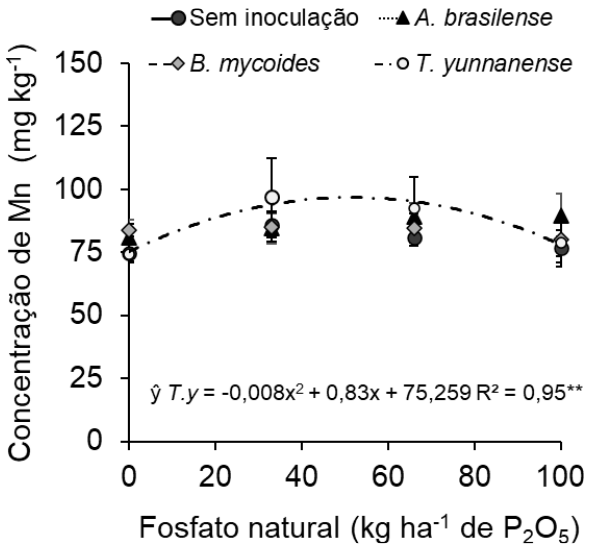
Figura 7. Concentração média de fósforo (P) na parte aérea da *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação *de* diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)] durante três cortes. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste aos modelos linear ou quadrático.



Fonte: Próprio autor.

Em relação a concentração de micronutrientes, houve apenas efeito das doses de FN para a concentração de Mn na planta ($F_{45,3}$ = 3,00; p = 0,0403). Verificou-se ajuste quadrático quando da inoculação apenas com *T. yunnanense* com ponto de máximo calculado para 52 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 8). A planta apresentou concentrações médias de 25,5; 71,0 e 21,8 mg kg^{-1} para Cu, Fe e Zn, respectivamente.

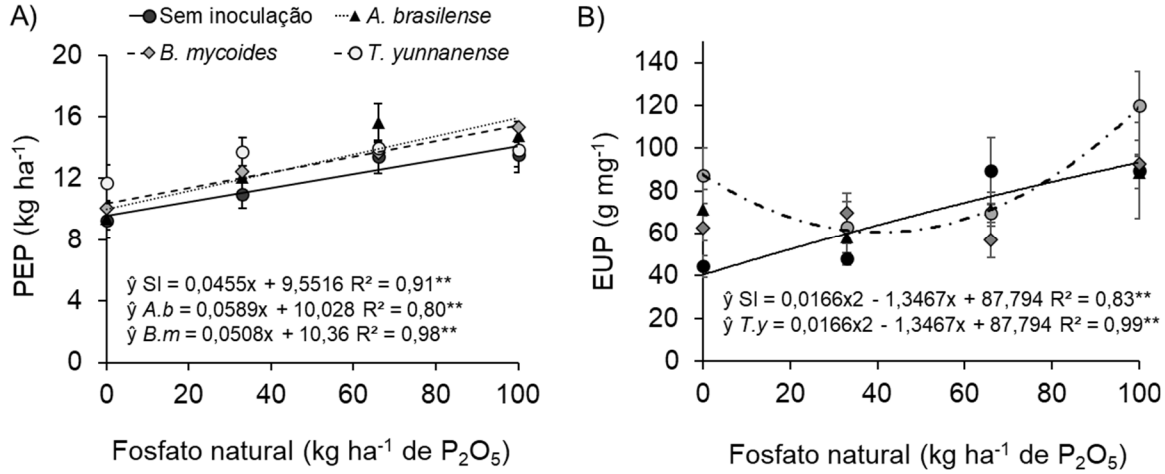
Figura 8. Concentração média de manganês (Mn) na parte aérea de *Urochloa brizantha* cv. Marandu durante três cortes em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo quadrático. Onde não há linha de tendência não houve ajuste de modelo de regressão.



Fonte: Próprio autor.

O PEP total da planta foi influenciado apenas pelas doses de FN ($F_{45,3}$ = 18,194; p < 0,0001), sendo que nos tratamentos sem inoculação e com inoculação dos microrganismos *A. brasilense* e *B. mycoides* houve aumento linear (~15 kg ha^{-1}). *Trichoderma yunnanense* não respondeu às doses de FN para PEP (Figura 9A). A EUP da forrageira não foi afetada pela inoculação dos microrganismos ($F_{48,3}$ = 1,999; p = 0,1267), mas foi influenciada pelas doses de FN ($F_{48,3}$ = 9,501; p < 0,0001). As repostas significativas estatisticamente foram observadas apenas nos tratamentos sem inoculação, onde a EUP aumentou de forma linear com o aumento da dose e FN, e quando houve a de *T. yunnanense*, com resposta quadrática inversa, com decréscimo nas menores doses e ponto de máximo na maior dose (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) (Figura 9B). Não houve interação entre ambos fatores ($F_{48,9}$ = 1,650; p = 0,1281). Vale destacar que sem a aplicação de fósforo, os três microrganismos testados, principalmente o *Trichoderma yunnanense,* promoveram maior EUP em relação ao controle sem inoculação (Figura 9B)

Figura 9. A) Média do fósforo extraído da produção total (PEP) e B) eficiência do uso de fósforo (EUP) de três cortes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da adubação com doses de fosfato natural (0, 33, 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5) sem inoculação (SI) e com inoculação de diferentes cepas de microrganismos [*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6), *Bacillus mycoides* (CCT 8332) e *Trichoderma yunnanense* (CCT 8328)]. As linhas presentes nos gráficos correspondem a regressões significativas (**) com ajuste ao modelo linear.



Fonte: próprio autor.

6 DISCUSSÃO

O fósforo é um nutriente indispensável crítico para o desenvolvimento das plantas, e sua deficiência normalmente dificulta o crescimento. Atualmente, o aproveitamento de microrganismos solubilizadores de P oferece uma nova abordagem para facilitar a absorção de P insolúvel do solo pelas plantas. Constatou-se nesse estudo que houve solubilização de fosfato por *B. mycoides* (Figura 2), fato também observado em estudos anteriores para *Bacillus* spp. e para *Bacillus licheniformes* (AnsarI; Ahmad, 2019; Tsegaye *et al*., 2019). Apesar de um valor baixo de solubilização observado, os índices podem variar entre as espécies de *Bacillus*. Mažylytė *et al*. (2022) reportaram valores >2 para uma cepa de *Bacillus* sp. e Thomas *et al*. (2018) encontraram valores de IS = 1,4 para *B. licheniformes.* Cepas de *B. subtilis* podem aumentar positivamente o crescimento e a produtividade das plantas pela solubilização de fosfato (Rafique *et al*., 2017), tal como é apresentado nessa pesquisa para *B. mycoides* em relação à RFC. Segundo Ahmad *et al*. (2021), a capacidade das rizobactérias de solubilizar P e seu impacto positivo na economia agrícola, em aplicação destes microrganismos como inoculantes, representa uma alternativa eficiente para suprir as necessidades nutricionais das plantas. Fungos do gênero *Trichoderma* são considerados solubilizadores de fosfato, contribuindo para o aumento da aquisição do nutriente pelas plantas, além de ter outros efeitos positivos no crescimento delas, como a proteção e indução de resistência a pragas e doenças (Stummer *et al*., 2022; Kinyungu *et al*., 2023). Entretanto, isso não foi observado para *T. yunnanense* nesse estudo.

De acordo com os resultados para o coinoculações testadas em laboratório e a compatibilidade comprovada no presente trabalho (Figura 3), a combinação destes microrganismos para aplicação em campo deve ser levada em consideração em estudos futuros, pois, pode haver sinergismo ainda maior às plantas, e a geração de produtos comerciais para agricultura sustentável. Os resultados constatados para *T. yunnanense* são recentes e fornecem novas perspectivas para a aplicação na agricultura/pecuária, no que diz respeito a formulação de produtos. Fifani *et al*. (2022) confirmaram a compatibilidade de *T. harzianum* com *Bacillus velezensis* e, El-Katatny e Idres (2014) reportaram a combinação positiva entre *Trichoderma* e *Azospirillum*. Além disso, há um efeito sinérgico da coinoculação de *B. subtilis* com *Trichoderma asperellum* na melhoria do crescimento, produção de biomassa e absorção de P no

capim Marandu, resultando em melhor eficiência no uso de nutrientes, pois estes microrganismos criam um biofilme que permite sua ampla colonização e aproveitamento do nutriente pelas plantas (Costa *et al*., 2022).

A inoculação de gramíneas com microrganismos promotores de crescimento tem sido estudada e resultados significativos no crescimento e redução de doses de fertilizantes minerais têm sido apresentados (Kidd *et al*., 2016; Tshewang *et al*., 2021). Nesse estudo foi observado que o FN foi crucial para o crescimento de *U. brizantha* cv Marandu. No entanto, a inoculação de microrganismos, mesmo que não associada às doses de FN, promoveram incrementos no crescimento, produtividade de matéria seca, relação folha:colmo e teores de proteína da gramínea.

O uso de FN propiciou alterações positivas para o capim Marandu e isso foi evidenciado quando houve aumento até 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 4), fato também observado por Dias *et al*. (2015) para o capim Piatã sob adubação com FN. O uso de P promove maior crescimento de forrageiras devido ao fato de desempenhar função estrutural na planta e por participar de diversos processos metabólicos e de transferência, bem como de armazenamento de energia na planta, além de fazer parte de compostos orgânicos como o ATP e de aminoácidos (Malavolta, 2006).

A aplicação de doses maiores de FN aumentou a altura das plantas do capim Marandu (Figura 4B), o que também foi reportado em outros trabalhos, nos quais ocorreu estabilização a partir da dose de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Lopes *et al*., 2011; Santiago *et al*., 2017). Todavia, quando não houve adição de FN, tanto a altura de planta quanto o número de perfilhos aumentaram em decorrência da inoculação com *A. brasilense* (Tabela 2). Scott *et al*. (2020) também relataram maior altura do milho quando essa bactéria foi inoculada via semente. Além disso, estudos indicam que a aplicação de *A. brasilense* contribui significativamente na produção de capim forrageiro, aumentando o teor de N e a altura das plantas (Duarte *et al*., 2020). Isso pode ocorrer devido ao fato da bactéria, além de auxiliar na fixação biológica de nitrogênio em gramíneas, promove também a produção de fitormônios, como a auxina, a qual é importante para o crescimento da planta, regulando sua altura (Fibach-Paldi *et al*., 2012; Pankievicz *et al*., 2015; Pedreira *et al*., 2017; MUNARETO *et al*., 2019). A fixação de N promovida por *A. brasilense* deve explicar o fato de o teor de clorofila ter sido incrementado quando essa bactéria foi inoculada sem associação com FN, como ocorreu em capim Mavuno (Sá *et al*., 2019).

De acordo com Cecato *et al*. (2000) o P tem forte influência na formação de raízes e no perfilhamento de capins, fato este que pode explicar o aumento linear de perfilhos por m^2 com o FN. O perfilhamento foi favorecido pela aplicação isolada dos microrganismos, especialmente com *B. mycoides* e *T. yunnanense*, ou em associação com 100 kg ha^{-1} de FN (Figura 4C), corroborando com estudos que apontam a importância da inoculação de microrganismos para o aumento do crescimento em capim Marandu, muitas vezes atrelada a altas doses de P_2O_5 (Costa *et al*., 2022). O efeito da maior dose de FN pode estar relacionado à idade e ao nível de degradação da pastagem, aos teores iniciais de P no solo – 3 mg dm^{-3} e a necessidade de adubação fosfatada, uma vez que a degradação das pastagens tropicais está ligada ao declínio estrutural do solo e à redução do P do solo (Nesper *et al*., 2015).

O aumento da atividade microbiana ao redor das raízes das plantas resulta em uma renovação mais rápida da matéria orgânica do solo, alterando ciclos importantes em solos de pastagem (Millard; Singh, 2010). Além disso, a inoculação de microrganismos promove alterações na morfologia e arquitetura radicular de pastagens, sendo incluídos nesse processo o aumento do número de raízes laterais e pelos radiculares, o que amplia a superfície radicular disponível para absorção de nutrientes (Pedreira *et al*., 2017). O aumento radicular, bem como os cortes da planta durante o período experimental, deve explicar o porquê do incremento à altura e à densidade de perfilhos da planta quando foi feita a aplicação de microrganismos, sem associação com FN (Tabela 2).

A adubação fosfatada sem inoculação e sua associação com todos os microrganismos testados neste estudo aumentaram a produção de massa seca (MS) da parte aérea do capim Marandu. Entre os tratamentos utilizados, quando as plantas não tiveram aplicação de FN ao solo, o fungo *T. yunnanense* se destacou positivamente na produção de MS (Figura 5A). Oliveira *et al*. (2024) também observaram esse aumento na cultura do milho e sugerem que fertilizantes ecologicamente corretos com maior eficiência agronômica podem ser desenvolvidos utilizando *T. harzianum*, contribuindo para aumentar a eficiência do uso de fósforo (P) na agricultura. *Trichoderma* spp. e outros microrganismos promotores de crescimento em plantas produzem carboxilatos que mobilizam formas pouco móveis de P e reduzem a sorção desse nutriente no solo (Li *et al*., 2015). Poucos estudos têm apresentado o potencial de *T. yunnanense*, mas é possível que haja uma longa persistência destes nas raízes das plantas forrageiras perenes ou semiperenes em

pastagens, fornecendo diversos benefícios, tais como a promoção de crescimento, estimulando o desenvolvimento radicular e aumento da absorção de nutrientes, melhoria da qualidade do solo e indução de resistência sistêmica a estresses bióticos e abióticos (Resende *et al*., 2004). Isso acontece em outras plantas, gramíneas ou dicotiledôneas, e é reportado para *T. harzianum* (López-Bucio *et al*., 2015; Muzakir *et al*., 2024).

A aplicação de *A. brasilense*, associada ou não à adubação com FN, também promoveu o aumento da produção de MS da planta, similar aos resultados dos estudos de Heinrichs *et al*. (2020) e Gomes *et al*. (2023) com capim Marandu, nos quais tal aumento ocorreu em função da inoculação com este mesmo microrganismo e com *Azospirillum baldaniorum*, respectivamente. A inoculação dessa bactéria promove a solubilização e maior disponibilidade de P inorgânico no solo, resultando em aumento da produtividade e da qualidade do capim Kikuyu, quando em associação com FN (Torres-Cuesta *et al*., 2023). O aumento do sistema radicular por espécies de *Azospirillum* está associado ao fato de apresentarem um metabolismo flexível de carbono e nitrogênio que aumenta sua capacidade de competir pela colonização da rizosfera, para melhorar a absorção de nutrientes, como o P, que é pouco móvel, bem como pela excreta do fitormônio AIA, que desempenha papel crucial no crescimento da planta (Bashan *et al*., 2004; Bashan & Bashan, 2010; Quadros *et al*., 2014).

O fósforo está associado ao metabolismo energético da planta, influenciando na absorção de nutrientes que é um processo ativo, o que reflete em crescimento das plantas e na síntese de proteínas (Oliveira *et al*., 2022). O teor de proteína bruta médio dos três cortes de *U. brizantha* cv. Marandu aumentou linearmente com as doses de FN e a com a associação com microrganismos (Figura 5C). A inoculação de bactérias diazotróficas e *Trichoderma longibrachiatum* incrementou a proteína bruta de gramíneas, beneficiando a nutrição animal (Salomao *et al*., 2016; Gandra *et al*., 2017).

Em condições de pastejo, o consumo animal é influenciado pela disponibilidade de forragem e pela estrutura da vegetação, como a relação folha:colmo (RFC) (Rodrigues *et al*., 2007). A maior RFC pode proporcionar melhor eficiência de pastejo pelos animais, pois representa forragens com maior teor de proteína, digestibilidade e consumo, além de conferir melhor adaptação e tolerância ao pastejo e ao corte (Cunha *et al*., 2007; Brennecke *et al*., 2016.). O uso de *B. mycoides* se

destacou no aumento dessa relação no capim Marandu nessa pesquisa, quando não houve associação com FN e ainda, quando associado à dose de 66 e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 6). Essa bactéria é reportada como colonizadora da rizosfera, solubilizadora de fosfato e promotora do crescimento em plantas (Stefan *et al*., 2013; Yi *et al*., 2018), entretanto, seus efeitos em pastagens ainda são pouco conhecidos. Outros estudos reportaram efeitos positivos desse microrganismo em plantas em ganhos na parte aérea e na raiz, devido à maior solubilização de P (Turan *et al*., 2007; Costa *et al*., 2022). Ambrosini *et al*. (2016) e Beryl *et al*. (2021) indicaram o potencial dessa bactéria como biofertilizante na agricultura, em culturas como o girassol. Outros estudos com esse microrganismo, no que tange à sua aplicação em pastagens, devem ser realizados.

O aumento das doses FN e a associação com a inoculação dos microrganismos testados aumentaram a concentração de P no capim Marandu, com exceção ao *T. yunnanense* com ponto de máximo calculado para 57 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 7). Era esperado que com o aumento de FN houvesse maior absorção desse macronutriente pelo capim Marandu, como foi observado para o capim Congo por Rosolem *et al*. (2014).

Azospirillum brasilense e *B. mycoides* associados ao FN aumentaram significativamente a concentração de P na planta, assim como na dose de 52 kg ha^{-1} de P_2O_5 com a inoculação de *T. yunnanense*. Torres-Cuesta *et al*. (2023) relataram que *A. brasilense* associado com FN (134,5 kg ha^{-1}) aumentam a disponibilidade de P no solo e sua absorção em capim Kikuyu. Também Ambrosini *et al*. (2016) verificaram aumento nos teores de P em girassol com *B. mycoides.* Enquanto Rheinheimer *et al*. (2002) observaram que adicionar P_2O_5 ao solo eleva o teor de P na biomassa microbiana, mesmo que em baixas proporções, melhorando a eficiência da adubação. *Trichoderma yunnanense* pode aumentar a biomassa das pastagens e fornecer P às plantas, como acontece em milho inoculado *T. harzianum*, reduzindo desta forma, o uso de fertilizantes minerais escassos e insustentáveis (Vinci *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018).

O incremento nos teores de Ca e Mg é relatado para espécies de *Trichoderma*, como observamos nesta pesquisa (Tabela 3) o que favorece o crescimento e expressão de resistência a doenças e estresses (Anwar *et al*., 2023) pelas plantas de trigo. O Ca e o Mg melhoram o crescimento e a absorção de nutrientes em gramíneas. Para animais domésticos, o Ca tem papel fundamental no

desenvolvimento ósseo e na saúde reprodutiva, enquanto o Mg é necessário para a uso de energia, transmissão nervosa e função imunológica (Pinotti *et al*., 2021).

Dentre os micronutrientes, o aumento da concentração de Mn apresentou respostas somente à adubação fosfatada associada à inoculação com *T. yunnanense*. Verificou-se ajuste quadrático com ponto de máximo calculado para 52 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 8). Esse resultado parece ser novo e relevante para essa espécie de fungo em pastagens. De acordo com Al *et al*. (2019), *Trichoderma* promoveu aumento da solubilização e concentração de Mn no solo e na rizosfera, respectivamente, aumentando a disponibilidade deste micronutriente às plantas. O Mn é crucial tanto para gramíneas, pois é essencial para o crescimento da forragem e é um importante ativador enzimático, como das enzimas oxidases, quanto para os animais de criação, devido ao fato de ser importante no desenvolvimento ósseo, saúde reprodutiva e ativação enzimática (Ge *et al*., 2021; Studer *et al*., 2022).

Para PEP e EUP, os resultados indicaram que, dentre os tratamentos usados, o uso de FN isoladamente ou associado à inoculação de *T. yunnanense* apresenta uma boa eficiência de uso de P na produção de matéria seca de *U. brizantha* cv. Marandu. Isso foi relatado para *U. brizantha* comparada a outras gramíneas forrageiras (Ramos *et al*., 2009). Estudos evidenciaram como a relação de espécies de *Trichoderma* com a EUP é variável em gramíneas e de acordo com a forma de aplicação. O revestimento de fertilizante fosfatado com *T. harziannum* (1500 UFC $planta^{-1}$) aumentou a EUP em plantas de milho () e a inoculação de *Trichoderma viride* (1×10^7 UFC L^{-1}) reduziu a PUE de *Chloris virgata* (Song *et al*., 2024). A EUP reflete a eficiência de uso de P em todo o nível da planta (Hayes *et al*., 2022) e esse estudo mostrou que essa eficiência aumentou com o incremento da dose de P_2O_5 quando inoculado com *T. yunnanense*.

As pastagens degradadas apresentam capacidade produtiva drasticamente reduzida (Dias-Filho, 2014). Assim, novas cepas de microrganismos podem ser úteis na formulação de novos inoculantes, visando aumentar a produtividade de culturas e contribuir para a redução do uso de fertilizantes fosfatados nos campos agrícolas (Ambrosini *et al*, 2016; Saxena *et al*., 2020), visto que foram capazes de suprir a necessidade das plantas e favorecerem seu crescimento e produtividade, isoladamente. Por fim, este trabalho sugere que a prática de inoculação de bactérias e/ou fungos promotores de crescimento pode representar um componente importante nos esforços para reverter a degradação das pastagens brasileiras. Devido ao fato de

já existirem vários estudos que descrevem a importante contribuição de *A. brasilense* para forrageiras como o capim Marandu, e os resultados dessa pesquisa apontam as cepas de *B. mycoides* e *T. yunnanense* como candidatas promissoras para experimentos de campo e futuros estudos de interações com plantas.

7 CONCLUSÕES

Bacillus mycoides tem capacidade de solubilizar fosfato e os microrganismos testados são compatíveis para aplicação conjunta (coinoculação).

O incremento de doses de fosfato natural, até 100 kg ha^{-1} de P_2O_5, beneficiam o perfilhamento, o acúmulo de P, a produtividade de matéria seca da parte aérea e de proteína de *U. brizantha* cv. Marandu, independentemente da inoculação com microrganismos.

Sem aplicar o fosfato natural, o uso isolado de *A. brasilense* aumenta a altura de planta e o teor de clorofila foliar do capim Marandu, o *B. mycoides* incrementa o perfilhamento e a relação folha:colmo, enquanto que *T. yunnanense* aumenta o perfilhamento, produtividade e acúmulo de matéria seca da parte aérea, bem como o teor de proteína de *U. brizantha* cv. Marandu.

O *T. yunnanense* aumenta a altura de plantas e as concentrações de Mn e de P até 57 kg ha^{-1} de P_2O_5 na parte aérea da planta, bem como aumenta a eficiência de uso de P na dose de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5.

REFERÊNCIAS

ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Beef report 2020 –Perfil da Pecuária do Brasil**. Disponível em: http://abiec.com.br/puFblicacoes/beef-report-2020/. Acesso em: 17 ago. 2024.

ADNAN, M.; ISLAM, W.; SHABBIR, A.; KHAN, K. A.; GHRAMH, H. A.; HUANG, Z.; CHEN, H. Y. H.; LU, G. D. Plant defense against fungal pathogens by antagonistic fungi with *Trichoderma* in focus. **Microbial Pathogenesis**, v. 129, p. 7-18, 2019.

AGROFIT. **Sistema de agrotóxicos fitossanitários. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 12 ago. 2024.

AGUILAR, P. B.; TEIXEIRA, F. A.; SILVA, F. F. D.; PIRES, A. J. V.; NASCIMENTO, P. V. N.; SANTOS, O. O. D. Economic viability of production of Nellore heifers on Urochloa brizantha cv. Marandu pastures deferred and fertilized with nitrogen. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 38, n. 1, p. 69-76, 2016.

AHMAD, I.; AHMAD, M.; HUSSAIN, A.; JAMIL, M. Integrated use of phosphate-solubilizing *Bacillus subtilis* strain IA6 and zinc-solubilizing *Bacillus* sp. strain IA16: a promising approach for improving cotton growth. **Folia Microbiologica**, v. 66, n. 1, p. 115-125, 2021.

ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 4546, 2020.

ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 971, 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, K. G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeintschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ALVES FILHO, A.; QUINTÃ, R. M.; DE CAMARGO, R.; CLEMENTE, M. A.; QUEIROZ, I. D. S. Sources of phosphorus for the establishment of palisade grass (*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) RD Webster). **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 23, p. 2024-2031, 2016.

AMBROSINI, A.; STEFANSKI, T.; LISBOA, B. B.; BENEDUZI, A.; VARGAS, L. K.; PASSAGLIA, L. M. P. Diazotrophic bacilli isolated from the sunflower rhizosphere and the potential of *Bacillus mycoides* B38V as biofertiliser. **Annals of Applied Biology**, v. 168, n. 1, p. 93-110, 2016.

ANAMIKA, P. A.; SHEHZAD, S.; RANI, A.; SHARMA, P.; MOHAMMAD, K. F.; MEHTA, S. Microbial elicitors for priming plant defense mechanisms. *In*: SINGH, N. K.; CHATTOPADHYAY, A.; LICHTFOUSE, E. (ed.) **Sustainable Agriculture Reviews 60:** Microbial processes in agriculture. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 175-196.

ANDRADE, E. B.; TEIXEIRA, F. A.; FRIES, D. D.; CRUZ, N. T.; JARDIM, R. R.; DA SILVA, H. S.; DOS SANTOS, B. E. F.; VIEIRA, T. M.; SEIXAS, A. A.; DOS SANTOS, J. P. Exogenous phytohormones and growth-promoting microorganisms in Basilisk grass cultivation. **Agronomy Research**, v. 22, n. S3, p. 1405-1420, 2024.

ANSARI, F. A.; AHMAD, I. Fluorescent *Pseudomonas*-FAP2 and *Bacillus licheniformis* interact positively in biofilm mode enhancing plant growth and photosynthetic attributes. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 4547, 2019.

ANWAR, S.; ALI, A.; ULLAH, Z.; BINJAWHAR, D. N.; SHER, H.; ALI, R.; IQBAL, R.; ALI, I. The Impact of *Trichoderma harzianum* together with copper and boron on wheat yield. **ACS Agricultural Science & Technology**, v. 3, n. 6, p. 517-527, 2023.

BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: A diversidade invisível e a sua importância. **Bio Diverso**, v. 1, n. 1, 2021.

BAPTISTELLA, J. L. C.; LLERENA, J. P. P.; DOMINGUES-JÚNIOR, A. P.; FERNIE, A. R.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Differential responses of three *Urochloa* species to low phosphorus availability. **Annals of Applied Biology**, v. 179, n. 2, p. 216-230, 2021.

BARASSI, C. A.; SUELDO, R. J.; CREUS, C. M.; CARROZZI, L. E.; CASANOVAS, W. M.; PEREYRA, M. A. Potencialidad de *Azospirillum* en optimizer el crecimiento vegetal bajo condiciones adversas. In: CASSÁN, F. D.; GARCIA DE SALAMONE, I. (Eds) ***Azospirillum* sp.: cell physiology, plant interactions and agronomic research in Argentina**. Argentina: Asociación Argentina de Microbiologia, pp. 49-59.

BASHAN, Y. ; BASHAN, L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth - a critical assessment. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 77-136, 2010.

BASHAN, Y.; HOLGUIN, G.; DE-BASHAN, L. E. Review: *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, v. 50, p. 521-577, 2004.

BEGUM, N.; QIN, C.; AHANGER, M.A.; OLIVEIRA, S.; KHAN, M.I.; ASHRAF, M.; ZHANG, L. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1068, 2019.

BENÍTEZ, T.; RINCÓN, A. M.; LIMÓN, M. C.; CODÓN, A. C. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. **International microbiology**, v. 7, n. 4, p. 249-260, 2004.

BERRAQUERO, F.R.; BAYA, A.M.; CORMENZANA, A.R. Establecimiento de índices para el estudio de la solubilización de fosfatos por bacterias del suelo. **Ars Pharmaceutica**, v.17, p.399-406, 1976.

BERYL, G. P.; THAZEEM, B.; UMESH, M.; SENTHILKUMAR, K.; KUMAR, M. N.; PREETHI, K. Bioconversion of feather composts using proteolytic *Bacillus mycoides* for their possible application as biofertilizer in agriculture. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 12, p. 6795-6809, 2021.

BETTIOL, W.; SILVA, J. C.; CASTRO, M. L. M. P. Uso atual e perspectivas do *Trichoderma* no Brasil. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (Eds) ***Trichoderma*:** uso na agricultura. Brasília: Embrapa, 2019, pp. 21-43.

BEZERRA, F. J. S. M.; LEITE, M. L. M. V.; LUCENA, L. R. R.; PEREIRA, J. S.; SILVA, M. J. A.; Características agronômicas de *Urochloa mosambicensis* em função do nitrogênio e fósforo. **Academia Agrária**, v.4, p. 92-102, 2017.

BILLAH, M.; KHAN, M.; BANO, A.; HASSAN, T. U.; MUNIR, A.; GURMANI, A. R. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 10, p. 904-916, 2019.

BOUSSAGEON, R.; SPORTES, A.; LEMAITRE, J.-P.; VAN TUINEN, D.; LAPADATESCU, C.; TRÉPANIER, M.; WIPF, D.; COURTY, P.-E. (2023). A Bacillaceae consortium positively impacts arbuscular mycorrhizal fungus colonisation, plant phosphate nutrition, and tuber yield in *Solanum tuberosum* cv. Jazzy. **Symbiosis**, v. 89, n. 2, p. 235-250, 2023.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007. **Definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura**. DOU, 01/03/2007, Seção 1, 2007. p. 38.

BRENNECKE, K.; BERTIPAGLIA, L. M. A.; ANTONIAZZI, A.; SOUZA, E. F. Inoculação da bactéria *Pseudomonas fluorescens* no índice de crescimento da *Brachiaria decumbens* spp. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 14, p. 217-224, 2016.

CABALLERO, C. B.; BIGGS, T. W.; VERGOPOLAN, N.; WEST, T. A.; RUHOFF, A. Transformation of Brazil's biomes: The dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. **Science of the Total Environment**, v. 896, p. 166323, 2023.

CABRAL, C. E. A.; CABRAL, C. H.; SANTOS, A. R.; CARVALHO, K. S.; BONFIM-SILVA, E. M.; MOTTA, L. J.; MATTOS, J. F.; ALVES, L. B.; BAYS, A. P. Ammonium sulfate enhances the effectiveness of reactive natural phosphate for fertilizing tropical grasses. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 8, n. 2, p. 86-92, 2020.

CASSÁN, F.; CONIGLIO, A.; LÓPEZ, G.; MOLINA, R.; NIEVAS, S.; DE CARLAN, C. L. N.; DONADIO, F.; TORRES, D.; ROSAS, S.; PEDROSA, F. O.; SOUZA, E.; ZORITA, M. D.; DE-BASHAN, L.; MORA, V. Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, p. 461-479, 2020.

CASSÁN, F.; DIAZ-ZORITA, M. *Azospirillum* sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, p. 117-130, 2016.

CATUCHI, T. A.; PARMEZAN, G. C., BRESSAN, F. V., ARANDA, E. A., ABRANTES, F. L., CUSTÓDIO, C. C., & TIRITAN, C. S. Corte sequencial de *Urochloa brizantha* cv. MG 5 altera época de florescimento e componentes de produção de sementes. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20200912, 2021.

CAVALCANTI, A. C.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, I.; DIAS, J. R. M.; FREITAS, M. S. M.; CARVALHO, A. J. C. D. Establishment of leaf nutrient patterns for the nutritional diagnosis of *Urochloa brizantha* pastures in two seasons. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e50359, 2021.

CECATO, U.; YANAKA, F. Y., BRITO FILHO, M. R. T.; SANTOS, T. G., CANTO, M. W.; ONORATO, W.; M.; PETERNELLI, M. Influence of nitrogen and phosphorus fertilization on yield, sprouting and tillering of marandu grass (*Brachiaria brizantha* [Hochst] Stapf cv. Marandu). **Acta Scientiarum. Animal Science**, v. 22, n. 3, p. 817-822, 2000.

COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; DI MATTIA, E.; EL-NAKHEL, C.; CARDARELLI, M. Co-inoculation of Glomus intraradices and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 8, p. 1706-1715, 2015.

CONDRON, L. M. Phosphorus-surplus and deficiency. In: **Managing soil quality: Challenges in modern agriculture**. Wallingford UK: CABI Publishing, 2004. p. 69-84.

CORASSA, G. M.; BERTOLLO, G. M.; GALLON, M.; BONA, S. D.; SANTI, A. L. Inoculação com *Azospirillum brasilense* associada à adubação nitrogenada em trigo na região norte do Rio Grande do Sul. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 1298-1308, 2013.

CÔRTES, I. H. G. *et al*. *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*). In: JAYME, D. G.; GONÇALVES, L. C.; RAMIREZ, M. A.; MENEZES, R. A. (Eds) **Gramíneas forrageiras tropicais.** Belo Horizonte, MG: FEPE, 2022. 115 p.

COSTA, C. J.; ARAÚJO, R. B.; VILLAS BÔAS, H. D. C. Tratamentos para superação de dormência em sementes de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 519-524, 2011.

COSTA, K. A. P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I. P. Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 62, p. 192-199, 2010.

COSTA, N. L.; PAULINO, V. T.; DA COSTA, R. S. C.; PEREIRA, R. D. A.; TOWNSEND, C. R.; MAGALHÃES, J. A. Efeito de micorrizas arbusculares sobre o crescimento e nutrição mineral de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Ciência Animal Brasileira**, v. 13, n. 4, p. 406-411, 2012.

COSTA, S. D. A. D.; CARDOSO, A. F.; CASTRO, G. L. S. D.; JÚNIOR, D. D. D. S.; SILVA, T. C. D.; SILVA, G. B. D. Co-Inoculation of *Trichoderma asperellum* with *Bacillus subtilis* to promote growth and nutrient absorption in Marandu grass. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, n. 1, p. 3228594, 2022.

COSTA, S. E. V. G. A.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, Á. V. D.; SILVA, T. O. D.; SILVA, T. R. D. Crescimento e nutrição da braquiária em função de fontes de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1419-1427, 2008.

CUNHA, M. V.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; MELLO, A C. L.; FREITAS, E. V.; APOLINÁRIO, V. X. O. Genótipos de capim-elefante sob pastejo durante o período seco na Zona da Mata de Pernambuco: fatores relacionados à eficiência do pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, n.2, p.291-300, 2007.

DANIELS, M. B.; DELAUNE, P.; MOORE JR, P. A.; MAUROMOUSTAKOS, A.; CHAPMAN, S. L.; LANGSTON, J. M. Soil phosphorus variability in pastures: implications for sampling and environmental management strategies. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, n. 6, p. 2157-2165, 2001.

DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; DA SILVA, R. C.; MCLAUGHLIN, M. J. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers–effect of soil pH, granulation and base excess. **Plant and Soil**, v. 410, p. 139-152, 2017.

DEMETZ, M.; INSAM, H. Phosphorus availability in a forest soil determined with a respiratory assay compared to chemical methods. **Geoderma**, v. 89, n. 3-4, p. 259-271, 1999.

DEVAU, N.; LE CADRE, E.; HINSINGER, P.; JAILLARD, B.; GÉRARD, F. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: experimental and mechanistic modelling approaches. **Applied Geochemistry**, v. 24, n. 11, p. 2163-2174, 2009.

DI FRANCO, C.; BECCARI, E.; SANTINI, T.; PISANESCHI, G.; TECCE, G. Colony shape as a genetic trait in the pattern-forming *Bacillus mycoides*. **BMC Microbiology**, v. 2, p. 1-15, 2002.

DIAS, D. G.; PEGORARO, R. F.; ALVES, D. D.; PORTO, E.M.V.; SANTOS NETO, J. A.; ASPIAZÚ, I. Produção do capim Piatã submetido a diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.4, p.330-335, 2015.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens:** conceitos, processos e estratégias de recuperação e de prevenção. Belém, PA: Ed. do Autor, 2023. 216p.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico de pastagens no Brasil**. Documentos 402. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Brasil, 2014.

DIAS-FILHO, M. B.; LOPES, M. J. S. **Respostas de cultivares de *Brachiaria humidicolae* de *Brachiaria Brizantha* 'Marandu' ao alagamento do solo**. Embrapa -Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 137, p. 1-27, 2019.

DO VALLE, C. B.; EUCLIDES, V. P.; MONTAGNER, D. B.; FERNANDES, C.; MACEDO, M.; VERZIGNASSI, J.; MACHADO, L. A. Z. BRS Paiaguás: A new Brachiaria (Urochloa) cultivar for tropical pastures in Brazil. **Tropical Grasslands**, v. 1, p. 121-122.

DUARTE, C. F. D.; CECATO, U.; BISERRA, T. T.; MAMÉDIO, D.; GALBEIRO, S. *Azospirillum* spp. in grasses and forages. Review. **Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias**, v. 11, n. 1, 2020.

EHLERS, K.; BAKKEN, L. R.; FROSTEGÅRD, Å.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K. Phosphorus limitation in a Ferralsol: impact on microbial activity and cell internal P pools. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 4, p. 558-566, 2010.

ELHAISSOUFI, W.; GHOULAM, C.; BARAKAT, A.; ZEROUAL, Y.; BARGAZ, A. Phosphate bacterial solubilization: a key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. **Journal of Advanced Research**, v. 38, p. 13-28, 2022.

EL-KATATNY, M. H.; IDRES, M. M. Effects of single and combined inoculations with *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* on seedling growth or yield parameters of wheat (*Triticum vulgaris* L., Giza 168) and corn (*Zea mays* L., hybrid 310). **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 12, p. 1913-1936, 2014.

EL-KOMY, M. H.; SALEH, A. A.; ERANTHODI, A.; MOLAN, Y. Y. Characterization of novel *Trichoderma asperellum* isolates to select effective biocontrol agents against tomato *Fusarium* wilt. **The Plant Pathology Journal**, v. 31, n. 1, p. 50, 2015.

EMBRAPA. **Inoculação multifuncional visa revolucionar as pastagens brasileiras**. Embrapa Notícias. 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/63768128/inoculacao-multifuncional-visa-revolucionar-as-pastagens-brasileiras. Acesso em: 12 ago. 2024

FIBACH-PALDI, S.; BURDMAN, S.; OKON, Y. Key physiological properties contributing to rhizosphere adaptation and plant growth promotion abilities of *Azospirillum brasilense*. **FEMS Microbiology Letters**, v. 326, n. 2, p. 99-108, 2012.

FIFANI, B. ; STEELS, S.; HELMUS, C. ; DELACUVELLERIE, A.; DERACINOIS, B.; PHALIP, V.; DELVIGNE, F.; JACQUES, P. Coculture of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus velezensis* based on metabolic cross-feeding modulates lipopeptide production. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, p. 1059, 2022.

FLORENCIO, C.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; FAVARO, C. P.; BRONI, M. G.; VELLOSO, C. C. V.; KLAIC, R.; RIBEIRO, C.; FARINAS, C. S.; MATTOSO, L. H. Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável. **Química Nova**, v. 45, p. 1133-1145, 2022.

FRANCHI, E.; CARDACI, A.; PIETRINI, I.; FUSINI, D.; CONTE, A.; DE FOLLY D'AURIS, A.; GRIFONI, M.; PEDRON., F.; BARABFIERI, M; PETRUZZELLI, G.; VOCCIANTE, M. Nature-based solutions for restoring an agricultural area contaminated by an oil spill. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2250, 2022.

FRANCO, J.; URQUIETA, E.; MAIN, G.; DIAZ, O.; PLATA, G.; CRESPO, L. Control biológico de enfermedades de plantas en Bolivia. In: BETTIOL, W.; RIVERA, M.C.; MONDINO, P.; MONTEALEGRE, J.R.; COLMENÁREZ, Y.C. (Eds.) **Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe**, p. 83, 2014.

FREITAS, A.; MACIEL, J.; SILVA, M.; SANTOS, J. Interferência de *Urochloa brizantha* no sistema radicular de *Phaseolus Vulgaris* adubado com fósforo. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019185690, 2019.

FUKAMI, J.; CEREZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **Amb Express**, v. 8, n. 1, p. 73, 2018.

GAMS, W.; MEYER, W. What exactly is *Trichoderma harzianum*?. **Mycologia**, v. 90, n. 5, p. 904-915, 1998.

GANDRA, J. R.; OLIVEIRA, E. D.; GOES, R. D.; OLIVEIRA, K. D.; TAKIYA, C. S.; VALLE, T. D.; ... PAUSE, A. D. S. Microbial inoculant and an extract of *Trichoderma longibrachiatum* with xylanase activity effect on chemical composition, fermentative profile and aerobic stability of guinea grass (*Pancium maximum* Jacq.) silage. **Journal of Animal and Feed Sciences**, v. 26, n. 4, p. 339-347, 2017.

GAO, N.; SHEN, W.; KAKUTA, H.; TANAKA, N.; FUJIWARA, T.; NISHIZAWA, T.; TAKAYA, N.; NAGAMINE, T.; ISOBE, K.; OTSUKA, S.; SENOO, K. Inoculation with nitrous oxide (N2O)-reducing denitrifier strains simultaneously mitigates N_2O emission from pasture soil and promotes growth of pasture plants. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 97, p. 83-91, 2016.

GE, X.; CHEN, F.; SAQLAIN, L.; MA, J.; KHAN, Z. I.; AHMAD, K.; ... SOHAIL, M. Evaluation of pasture allowance of manganese for ruminants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 40, p. 56906-56914, 2021.

GLATZLE, S.; STUERZ, S.; GIESE, M.; PEREIRA, M.; DE ALMEIDA, R. G.; BUNGENSTAB, D. J.; MACEDO, M. C. M.; ASCH, F. Seasonal dynamics of soil moisture in an integrated-crop-livestock-forestry system in Central-West Brazil. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 245, 2021.

GLICK, B. R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. Canadian **Journal of Microbiology**, v. 41, p. 109–117, 1995.

GOMES, E. A.; SILVA, U. C.; PAIVA; C. A. O.; LANA, U. G. P.; MARRIEL, I. E.; SANTOS, V. L. **Microrganismos promotores do crescimento de plantas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 51 p.

GOMES, L. B. E.; SILVA, T. F. R. D.; ALVES, G. C.; REIS, V. M. Growth promotion in different *Urochloa* species inoculated with *Azospirillum baldaniorum*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03079, 2023.

GONÇALVES, M. C., DA SILVA, K. C., DA SILVA OLIVEIRA, C. E., STEINER, F. Nitrogênio e *Azospirillum brasilense* no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar. **Colloquium Agrariae,** p. 72-81, 2020.

GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LOBATO, A. K. S.; GUEDES, R. S.; AVILA, W. S.; SILVA, S. P. Natural phosphate and liming improves phosphorus extraction in two tropical grasses grown in degraded Amazon soil. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 10, n. 3-4, p. 1165-1168, 2012.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Pointing 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. 1748, 2022.

GUSS, A.; GOMIDE, J.A.; NOVAIS, R.F. Exigências de fósforo para estabelecimento de quatro leguminosas forrageiras em solos com distintas características físico químicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.19, p.450-458, 1990.

HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J. K.; BOHNERT, H. J. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Biology**, v. 51, n. 1, p. 463-499, 2000.

HAYES, P.; ADEM, G. D.; PARIASCA-TANAKA, J.; WISSUWA, M. Leaf phosphorus fractionation in rice to understand internal phosphorus-use efficiency. **Annals of Botany**, v. 129, n. 3, p. 287-302, 2022.

HEINRICHS, R.; MEIRELLES, G. C.; SANTOS, L. F. D. M.; LIRA, M. V. D. S.; LAPAZ, A. D. M.; NOGUEIRA, M. A.; BONINI, C. S. B.; SOARES FILHO, C. V.; MOREIRA, A. *Azospirillum* inoculation of 'Marandu' palisade grass seeds: effects on forage production and nutritional status. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 2, p. 465-478, 2020.

HOLMANN, F.; ARGEL, P.; RIVAS, L.; WHITE, D.; ESTRADA, R. D.; BURGOS, C.; PEREZ, E.; RAMIREZ, G.; MEDINA, A. Is it worth to recuperate degraded pasturelands? An evaluation of profits and costs from the perspective of livestock producers and extension agents in Honduras. **Livestock Research for Rural Development**, v. 16, n. 11, p. 19, 2004.

HUMPENÖDER, F.; BODIRSKY, B. L.; WEINDL, I.; LOTZE-CAMPEN, H.; LINDER, T.; POPP, A. Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein. **Nature**, v. 605, n. 7908, p. 90-96, 2022.

HUNGRIA, M.; BARBOSA, J. Z.; RONDINA, A. B. L.; NOGUEIRA, M. A. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 5, p. 2969-2980, 2022.

ILLMER, P.; SCHINNER, F. Solubilization of inorganic calcium phosphates – solubilization mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 3, p. 257-263, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. SIDRA – **Sistema IBGE de Recuperação Automática: Censo Agropecuário**. 2017. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/202. Acesso em: 10 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil para 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/35145-entre-2000-e-2020-a-area-agricola-do-pais-cresceu-230-mil-km-e-a-vegetacao-natural-diminuiu-513-mil-km. Acesso em: 10 ago. 2024.

JANK, L.; VALLE, C. D.; RESENDE, R. M. S. Breeding tropical forages. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 11, p. 27-34., 2011.

KARMAKAR, P.; SENGUPTA, K.; DAS, P.; BHATTACHARYA, S. G.; SAHA, A. K. Biocontrol and plant growth promoting potential of *Trichoderma yunnanense*. **Vegetos**, v. 34, p. 928–936, 2021.

KASSOGUÉ, A.; TOUNKARA, B.; MALLÉ, I.; DAO, S.; OUÉDRAOGO, P. W.; DICKO, A. H.; DIALLO, K. A.; OUATTARA, D.; NANTOUMÉ, D.; DIARRA, O.; BABANA, A. H. Improving sorghum (*Sorghum bicolor* L.) production through the use of *Azospirillum* sp. AZ6 and *Trichoderma harzianum* T4-Based biostimulants. **Journal of Advances in Microbiology**, v. 24, n. 10, p. 29-36, 2024.

KIDD D. R.; RYAN M. H.; HALING R. E.; LAMBERS H.; SANDRAL G. A.; YANG Z.; CULVENOR R. A.; CAWTHRAY G. R.; STEFANSKI A.; SIMPSON R. J. Rhizosphere carboxylates and morphological root traits in pasture legumes and grasses. **Plant and Soil**, v. 402, n 1-2, p. 77–89, 2016.

KINYUNGU, S. W.; AGBESSENOU, A.; SUBRAMANIAN, S.; KHAMIS, F. M.; AKUTSE, K. S. One stone for two birds: Endophytic fungi promote maize seedlings growth and negatively impact the life history parameters of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. **Frontiers in Physiology**, v. 14, p. 1253305, 2023.

KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, p. 391-396, 1999.

KRIBEL, S.; QOSTAL, S.; OUAZZANI TOUHAMI, A.; SELMAOUI, K.; MOURIA, A.; BENKIRANE, R.; DOUIRA, A. Quantitative and qualitative estimation of Moroccan *Trichoderma* isolates capacity to solubilize rock phosphate. **Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica**, v. 54, n. 2, p. 157-171, 2019.

KUMAR, S.; SINDHU, S. S.; KUMAR, R. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 3, p. 100094, 2022.

LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B.; VALENTIM, J. F.; RAMOS, F.; ALVES-PINTO, H. N. Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. **Animal**, v. 8, n. 8, p. 1255-1263, 2014.

LEE, N. K.; KIM, W. S.; PAIK, H. D. *Bacillus* strains as human probiotics: characterization, safety, microbiome, and probiotic carrier. **Food Sciene and Biotechnology**, v. 28, p. 1297–305, 2019.

LI, H.; SOARES, M. A.; TORRES, M. S.; BERGEN, M.; WHITE JR, J. F. Endophytic bacterium, *Bacillus amyloliquefaciens*, enhances ornamental hosta resistance to diseases and insect pests. **Journal of Plant Interactions**, v. 10, n. 1, p. 224-229, 2015a.

LI, R. X.; CAI, F.; PANG, G.; SHEN, Q. R.; LI, R.; CHEN, W. Solubilisation of phosphate and micronutrients by *Trichoderma harzianum* and its relationship with the promotion of tomato plant growth. **PloS one**, v. 10, n. 6, p. e0130081, 2015b.

LOMBARDI, N.; VITALE, S.; TURRÀ, D.; REVERBERI, M.; FANELLI, C.; VINALE, F.; MARRA, R.; RUOCCO, M.; PASCALE, A.; D'ERRICO, G.; WOO, S. L.; LORITO, M. Root exudates of stressed plants stimulate and attract *Trichoderma* soil fungi. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 31, n. 10, p. 982-994, 2018.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of agricultural development of the Brazilian Cerrado. **International Potash Institute**, v. 32, p. 29-56, 2012.

LOPES, J.; EVANGELISTA, A. R.; PINTO, J. C.; QUEIROZ, D. S.; MUNIZ, J. A. Doses de fósforo no estabelecimento de capim-xaraés e estilosantes Mineirão em consórcio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 2658-2665, 2011.

LÓPEZ-BUCIO, J.; PELAGIO-FLORES, R.; HERRERA-ESTRELLA, A. *Trichoderma* as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 109-123, 2015.

LORENTZ, J. F.; CALIJURI, M. L.; RAD, C.; CECON, P. R.; ASSEMANY, P. P.; MARTINEZ, J. M.; KHOLSSI, R. Microalgae biomass as a conditioner and regulator of soil quality and fertility. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 2, p. 198, 2024.

LUGTENBERG, B. J. J.; KAMILOVA, F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. **Annual Review of Microbiology**, v. 63, p. 541-556, 2009.

LUSTOSA FILHO, J. F.; CARNEIRO, J. S. S.; BARBOSA, C. F.; DE LIMA, K. P.; LEITE, A. A.; MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. **Science of the Total Environment**, v. 709, p. 136028, 2020.

MAJEED, A.; MUHAMMAD, Z.; AHMAD, H. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops. **Plant Cell Reports**, v. 37, n. 12, p. 1599-1609, 2018.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos. 319 p. 1998

MAPBIOMAS. **Pastagens brasileiras ocupam área equivalente a todo o estado do Amazonas**. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/2021/10/13/pastagens-brasileiras-ocupam-area-equivalente-a-todo-o-estado-do-amazonas/. Acesso em: 10 ago. 2024.

MARQUES, A. C. R.; OLIVEIRA, L. B. D.; BRUNETTO, G.; TAVARES, M. D. S.; QUADROS, F. L. F. D.; NICOLOSO, F. T. Interaction between growth strategies and phosphorus use efficiency in grasses from South America natural grasslands. **Revista Ceres**, v. 67, n. 1, p. 62-69, 2020.

MAŽYLYTĖ, R.; KAZIŪNIENĖ, J.; OROLA, L.: VALKOVSKA, V.; LASTAUSKIENĖ, E.; GEGECKAS, A. Phosphate solubilizing microorganism *Bacillus* sp. MVY-004 and its significance for biomineral fertilizers' development in agrobiotechnology. **Biology**, v. 11, n. 2, p. 254, 2022.

McLAUGHLIN, M.; MCBEATH, T. M.; SMERNIK, R.; STACEY, S. P.; AJIBOYE, B.; GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils – implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. **Plant and Soil**, v. 349, p. 69-87, 2011.

MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant-beneficial, plant pathogenic and human-pathogenic microorganisms. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, p. 634-663, 2013.

MENDOZA, R.; BAILLERES, M.; GARCÍA, I.; RUIZ, O. Phosphorus fertilization of a grass-legume mixture: effect on plant growth, nutrients acquisition and symbiotic associations with soil microorganisms. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 5, p. 691-701, 2016.

MERCL, F.; GARCÍA-SÁNCHEZ, M.; KULHÁNEK, M.; KOŠNÁŘ, Z.; SZÁKOVÁ, J.; TLUSTOŠ, P. Improved phosphorus fertilisation efficiency of wood ash by fungal strains *Penicillium* sp. PK112 and *Trichoderma harzianum* OMG08 on acidic soil. **Applied Soil Ecology**, v. 147, p. 103360, 2020.

MILLARD, P.; SINGH, B. K. Does grassland vegetation drive soil microbial diversity?. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, p. 147-158, 2010.

MILLER, S. H.; BROWNE, P.; PRIGENT-COMBARET, C.; COMBES-MEYNET, E.; MORRISSEY, J. P.; O'GARA, F. Biochemical and genomic comparison of inorganic phosphate solubilization in *Pseudomonas* species. **Environmental Microbiology Reports**, v. 2, n. 3, p. 403-411, 2010.

MOLLAH, M. M. I.; HASSAN, N. Efficacy of *Trichoderma harzianum*, as a biological fungicide against fungal diseases of potato, late blight and early blight. **Journal of Natural Pesticide Research**, v. 5, p. 100047, 2023.

MONNERAT, R.; MONTALVÃO S. C. L.; MARTINS, E. S.; QUEIROZ, P. R. M.; SILVA, E. Y. Y.; GARCIA, A. R. M.; CASTRO, M. T.; ROCHA, G. T.; FERREIRA, A. D. C. L.; GOMES, A. C. M. M. **Manual de produção e controle de qualidade de produtos biológicos à base de bactérias do gênero *Bacillus* para uso na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020. 46 p.

MOREIRA, A. G.; SCHLINDWEIN, J. A.; FIORELLI, E. C.; AGUIAR, I. S. Doses de máxima eficiência técnica e econômica de nitrogênio, fósforo, potássio e calcário para o capim-marandu. **Enciclopédia Biosfera**, v.18 n.37; p. 191, 2021.

MOSIER, S.; CÓRDOVA, S. C.; ROBERTSON, G. P. Restoring soil fertility on degraded lands to meet food, fuel, and climate security needs via perennialization. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 706142, 2021.

MUIR, J. P.; PITMAN, W. D.; FOSTER., J. L. Sustainable, low-input, warm-season, grass–legume grassland mixtures: Mission (nearly) impossible?. **Grass and Forage Science**, v. 66, n. 3, p. 301-315, 2011.

MUNARETO, J. D.; MARTIN, T. N.; FIPKE, G. M.; CUNHA, V. S.; ROSA, G. B. Nitrogen management alternatives using *Azospirillum brasilense* in wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, e00276, 2019.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology,** v. 59, n. 1, p. 651-681, 2008.

MUZAKIR, M.; HIFNALISA, H.; JAUHARLINA, J.; MURI, A. P.; DAHLIATI, N.; SRIWATI, R. *Trichoderma yunnanense* isolated from patchouli plant as a bio-conversion agent for solid organic waste. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 10, p. 101021, 2024.

MYSTER, R. W.; MONTAGNINI, F. Management for sustainability and restoration of degraded pastures in the Neotropics. In: **Post-agricultural succession in the Neotropics**, p. 265-295, 2008.

NAHAS, E. Microrganismos do solo produtores de fosfatases em diferentes sistemas agrícolas. **Bragantia**, v. 61, n. 3, p. 267–275, 2002.

NANJUNDAPPA, A.; BAGYARAJ, D. J.; SAXENA, A. K.; KUMAR, M.; CHAKDAR, H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 23, 2019.

NESME, T.; METSON, G. S.; BENNETT, E. M. Global phosphorus flows through agricultural trade. **Global Environmental Change**, v. 50, p. 133-141, 2018.

NESPER, M.; BÜNEMANN, E. K.; FONTE, S. J.; RAO, I. M.; VELASQUEZ, J. E.; RAMIREZ, B.; HEGGLIN, D.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, v. 257, p. 123-133, 2015.

NOVICHONOK, E. V.; NOVICHONOK, A. O.; KURBATOVA, J. A.; MARKOVSKAYA, E. F. Use of the atLEAF+ chlorophyll meter for a nondestructive estimate of chlorophyll content. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 130-137, 2016.

NUNES, F. N.; CANTARUTTI, R. B.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. D.; TÓTOLA, M. R.; RIBEIRO, B. N. Atividade de fosfatases em gramíneas forrageiras em resposta à disponibilidade de fósforo no solo e à altura de corte das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1899-1909, 2008.

NUNES, J. O.; POMPEU, R. C. F. F.; BUENO, L. G.; TAVARES, R. D. K. O.; CLARK, M. V. G.; SAGRILO, E.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SOUZA, H. A. D. Response of *Urochloa mosambicensis* genotypes to phosphorus fertilization in soil with low phosphorus levels. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 24, p. e20230028, 2023.

OLIVEIRA, A. P.; CASAGRANDE, D. R.; BERTIPAGLIA, L. M. A.; BARBERO, R. P., BERCHIELLI, T. T.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Supplementation for beef cattle on Marandu grass pastures with different herbage allowances. **Animal Production Science**, v. 56, n. 1, p. 123–129, 2015.

OLIVEIRA, H. P.; MELO, R. O.; CAVALCANTE, V. S.; MONTEIRO, T. S. A.; DE FREITAS, L. G.; LAMBERS, H.; VALADARES, S. V. Phosphate fertilizers coated with phosphate-solubilising *Trichoderma harzianum* increase phosphorus uptake and growth of *Zea mays*. **Plant and Soil**, p. 1-12, 2024.

OLIVEIRA, H. P.; MELO, R. O.; CAVALCANTE, V. S.; MONTEIRO, T. S. A.; FREITAS, L. G.; LAMBERS, H.; VALADARES, S. V. Phosphate fertilizers coated with phosphate-solubilising *Trichoderma harzianum* increase phosphorus uptake and growth of *Zea mays*. **Plant and Soil**, p. 1-12, 2024.

OLIVEIRA, L. B. D.; TIECHER, T.; MARQUES, A. C. R.; SOMAVILLA, A.; RUTHES, B. E. S.; CRESTANI, C.; KASCHUCK, G.; RHEINHEIMER, D. S.; QUADROS, F. L. F. D. Phosphate sources affect P and N nutrition in pluri-specific natural grasslands in the Brazilian Pampa biome. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210145, 2022.

OLIVEIRA, L. C. A.; CARNEIRO, M. D. A.; LITTER, F. A., De CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; CAIONE, G. Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.14, p. 1-15, 2021.

OLIVEIRA, O. C.; OLIVEIRA, I. P.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; MIRANDA, C. H. B.; VILELA, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Response of degraded pastures in the Brazilian Cerrado to chemical fertilization. **Pasturas Tropicales**, v. 23, n. 1, p. 14-18, 2001.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A., PEDROSO, A. D. F., ALVES, T. C., LEMES, A. P., OLIVEIRA, B. A., PEZZOPANE, J. R. M.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest Biome. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 958751, 2022.

OLIVEIRA, T. P.; FLORES, H. L.; MELO, S. P. Uso de siligesso 70® na recuperação de pastagem degradada de capim Marandu na região do cerrado. **Revista Panorâmica**, edição especial, p. 36-48, 2019.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al*. Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1426166, 2024.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; DE SOUSA, S. M., LANA, U. D. P.; MARRIEL, I. E. Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. In: EMBRAPA SOJA. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: [s. n.], 2022. p. 163-179.

OTEINO, N.; LALLY, R. D.; KIWANUKA, S.; LLOYD, A.; RYAN, D.; GERMAINE, K. J.; DOWLING, D. N. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 745, 2015.

PANI, S.; KUMAR, A.; SHARMA, A. *Trichoderma harzianum*: An overview. **Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Science**, v. 10, n. 6, p. 32-39, 2021.

PANKIEVICZ, V. C. S.; DO AMARAL, F. P., SANTOS, K. F., AGTUCA, B., XU, Y., SCHUELLER, M. J.; ARISI, A. C. M.; STEFFENS, M. B. R.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O.; STACEY, G.; FERRIERI, R. A. Robust biological nitrogen fixation in a model grass–bacterial association. **The Plant Journal**, v. 81, n. 6, p. 907-919, 2015.

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, p. 732-740, 2016.

PARENTE, L.; MESQUITA, V., MIZIARA, F., BAUMANN, L., FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, p. 111301, 2019.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1996.

PEDREIRA, B. C.; BARBOSA, P. L.; PEREIRA, L. E. T.; MOMBACH, M. A.; DOMICIANO, L. F.; PEREIRA, D. H.; FERREIRA, A. Tiller density and tillering on *Brachiaria brizantha* cv. Marandu pastures inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 69, n. 4, p. 1039-1046, 2017.

PEDREIRA, B.; SOLLENBERGER, L. E. **Como perceber a importância das pastagens a serviço da sociedade.** Nordeste Rural, negócios do campo. Disponível em: https://nordesterural.com.br/como-perceber-a-importancia-das-pastagens-a-servico-da-sociedade/. Acesso em: 10 ago. 2024.

PEREIRA, A. L.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M. D.; CAVALCANTE, Í. H. L.; SILVA, V. A. D.; MARTINS FILHO, M. V. Atributos do solo sob pastagens em sistema de sequeiro e irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 377-384, 2009.

PEREIRA, C. E.; OLIVEIRA, J. A.; ROSA, M. C. M.; KIKUTI, A. L. P. Armazenamento de sementes de braquiária peletizadas e tratadas com fungicida e inseticida. **Ciência Rural**, Fortaleza, v. 41, n. 12, p. 2060-2065, 2011.

PETRISOR, C.; PAICA, A.; CONSTANTINESCU, F. Screening of Trichoderma sp. strains for producing hydrolytic enzymes. **Romanian Journal for Plant Protection**, v. 8, p. 7-10, 2015.

PINHEIRO, P. L.; PASSOS, R. R.; PEÇANHA, A. L.; MENDONCA, E. D. S. Application of biofertilizer in degraded pasture modified C dynamics and improved forage yield in a short-term period at the tropical region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 12, p. 1889-1897, 2020.

PINOTTI, L.; MANONI, M.; FERRARI, L.; TRETOLA, M.; CAZZOLA, R.; GIVENS, I. The contribution of dietary magnesium in farm animals and human nutrition. **Nutrients**, v. 13, n. 2, p. 509, 2021.

PRAKASH, J.; ARORA, N. K. Phosphate-solubilizing Bacillus sp. enhances growth, phosphorus uptake and oil yield of Mentha arvensis L. **3 Biotech**, v. 9, n. 4, p. 126, 2019.

QUADROS, P. D. D.; ROESCH, L. F. W.; SILVA, P. R. F. D.; VIEIRA, V. M.; ROEHRS, D. D.; CAMARGO, F. A. D. O. Desempenho agronômico a campo de híbridos de milho inoculados com *Azospirillum*. **Revista Ceres**, v. 61, p. 209-218, 2014.

R Core Team. **R:** A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL 2024 https://www.R-project.org/.

RAFIQUE, M.; SULTAN, T.; ORTAS, I.; CHAUDHARY, H. J. Enhancement of maize plant growth with inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and biochar amendment in soil. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 5, p. 460-469, 2017.

RAMÍREZ-PEDROSO, J. F.; PAZ-MEDEL, M.; GONZÁLEZ-CAÑIZARES, P. J.; RIVERA-ESPINOSA, R.; HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Biofertilization with mycorrhizal fungi on *Urochloa* grasses in a low-fertility acid soil. **Pastos y Forrajes**, v. 46, p. e20, 2023.

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, n. 1, p. 49-68, 2021.

RESENDE, M. D. L.; OLIVEIRA, J. A. D.; GUIMARÃES, R. M.; VON PINHO, R. G.; VIEIRA, A. R. Inoculação de sementes de milho utilizando o *Trichoderma harzianum* como promotor de crescimento. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, p. 793-798, 2004.

REZENDE, C. C.; SILVA, M. A.; FRASCA, L. L. M.; FARIA, D. R.; FILIPPI, M. C. C.; LANNA, A. C.; NASCENTE, A. S. **Microrganismos multifuncionais: utilização na agricultura**. 2021. Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1136809/1/rsd-2021.pgl Acesso em 12 ago. 2024

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, p. 1853-1871, 2002.

RIBEIRO, E. C. G.; REIS, R. D. G. E.; VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Physiological quality of *Urochloa brizantha* seeds submitted to priming with calcium salts. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 49, p. e55341, 2019.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 989-996, 2011.

ROCHA, A. K. P.; ALVES, C. P.; DA SILVA, J. N.; DA SILVA, T. G. F.; LEITE, M. L. D. M. V.; JUNIOR, B. C. Principais ecossistemas usados como pastagem nativa do Brasil: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e3859108592-e3859108592, 2020.

ROCHA, G. T.; MONTALVÃO, S. C. L.; QUEIROZ, P. R. M.; BERÇOT, M. R.; GOMES, A. C. M. M.; MONNERAT, R. G. Morphological and biochemical characterization of bacterial species of *Bacillus*, *Lysinibacillus* and *Brevibacillus*. **Revista Ceres**, v. 70, p. 91-104, 2023.

RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, p. 73-80, 2007.

RODRIGUES, L. Mapa registra duas novas estirpes do *Azospirillum brasilense*. Revista Cultivar. 2023 Disponível em: https://revistacultivar.com.br/noticias/mapa-registra-duas-novas-estirpes-do-azospirillum-brasilense Acesso em julho de 2024.

RODRIGUES, R. C.; MOURÃO, G. B.; BRENNECKE, K., LUZ, P. H. D. C.; HERLING, V. R. Produção de massa seca, relação folha/colmo e alguns índices de crescimento do *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés cultivado com a combinação de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 394-400, 2008.

RODRÍGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, n. 4-5, p. 319-339, 1999.

ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; JALAL, A.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G. C.; BARCO NETO, M.; PAVINATO, P. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with growth-promoting bacteria associated with the reduction of phosphate fertilization in sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 32, 2020.

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; BULL, J. C. L. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 309-315, 2014.

SÁ, G. C. R.; CARVALHO, C. L. M.; MOREIRA, A.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V. Biomass yield, nitrogen accumulation and nutritive value of Mavuno grass inoculated with plant growth-promoting bacteria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 15, p.1931-1942, 2019.

SAEID, A.; PROCHOWNIK, E.; DOBROWOLSKA-IWANEK, J. Phosphorus solubilization by *Bacillus* species. **Molecules**, v. 23, n. 11, p. 2897, 2018.

SALOMAO, L. G.; CAROLINA, S. A. D. S.; EDNA, M. B. S.; ANALY, C. P. Nutritional characteristics of marandu grass (Brachiaria brizantha cv. marandu) subjected to inoculation with associative diazotrophic bacteria. **African Journal of Microbiology Research**, v. 10, n. 24, p. 873-882, 2016.

SANTANA, E. B.; MARQUES, E. L. S.; DIAS, J. C. T. Effects of phosphate-solubilizing bacteria, native microorganisms, and rock dust on *Jatropha curcas* L. growth. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 4, p. 15048729, 2016.

SANTIAGO, F. E. M.; NÓBREGA, J. C. A.; SANTIAGO, F. L. A.; EDVAN, R. L.; NÓBREGA, R. S. A.; MOREIRA, F. M. S. Lime and phosphate application as mycorrhizae stimulation to enhance growth and yield of Marandu grass. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4Supl1, p. 2323-2336, 2017.

SANTOS, C. O.; SIQUEIRA PINTO, A.; SANTOS, M. P.; ALVES, B. J. R.; NETO, M. B. R.; FERREIRA, L. G. Livestock intensification and environmental sustainability: An analysis based on pasture management scenarios in the brazilian savanna. **Journal of Environmental Management**, v. 355, p. 120473, 2024.

SANTOS, F. A.; OLIVEIRA, L. A. Características fisiológicas e ecológicas de isolados de rizóbios oriundos de solos ácidos de Iranduba, Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 661-669, 2005.

SANTOS, F. L. S.; MELO, W. R. F.; COELHO, P. H. M.; BENETT, C. G. S.; DOTTO, M. C. Crescimento inicial de espécies de *Urochloa* em função da profundidade de semeadura. **Revista de Agricultura Neotropical,** v. 2, n. 4, p. 1-6, 2015.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Solos. 2018. 356 p.

SAXENA, A. K.; KUMAR, M.; CHAKDAR, H.; ANUROOPA, N.; BAGYARAJ, D. J. *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 6, p. 1583-1594, 2020.

SCHWERTNER, J. J. G.; SCHWERTNER, E.; SOUZA, F. R.; DA SILVA, R. A.; CORONEL, D. A. Desempenho dos principais estados brasileiros exportadores de carne bovina (2000-2020). **Sinergia**, v. 26, n. 2, p. 27-45, 2022.

SCOTT, S.; HOUSH, A.; POWELL, G.; BENOIT, M.; ANSTAETT, A.; GERHEART, A.; BENOIT, M.; WILDER, S.; SCHUELLER, M.; FERRIERI, R. A. *Azospirillum brasilense* (HM053) boosts corn yield and ferritin content. **Agronomy**, v. 10, p. 394-405, 2020.

SEMPERE FERRE, F.; SANTAMARINA, M. P. Efficacy of *Trichoderma harzianum* in suppression of *Fusarium culmorum*. **Annals of Microbiology**, v. 60, p. 335-340, 2010.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL - SENAR. **Manejo de Pastagens**. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – 2. ed. Brasília: 2012. 34 p. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/storage/arquivos/157-PASTAGENS-NOVO_2022-06-03- 142701_gzxh.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

SERRANO, J. M.; PEÇA, J. O.; SILVA, J. R. M.; SHAHIDIAN, S.; CARVALHO, M. Phosphorus dynamics in permanent pastures: differential fertilizing and the animal effect. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 90, p. 63-74, 2011.

SHAHZAD, A.; ASLAM, U.; FERDOUS, S.; QIN, M.; SIDDIQUE, A.; BILLAH, M.; NAEEM, M.; MAHMOOD, Z.; KAYANI, S. Combined effect of endophytic *Bacillus mycoides* and rock phosphate on the amelioration of heavy metal stress in wheat plants. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 125, 2024.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, p. 1-14, 2013.

SHORESH, M.; HARMAN, G. E.; MASTOURI, F. Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agentes. **Annual Review of Phytopathology**, v. 48, n. 1, p. 21-43, 2010.

SIDDIQI, M.Y. & GLASS, A.D.M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289-302, 1981.

SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. Solubilização de fostatos por microrganismos na presença de fontes de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 311-319, 2000.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos:** métodos químicos e biológicos. 3.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 235p.

SILVA, L. I.; PEREIRA, M. C.; CARVALHO, A. M. X. D.; BUTTRÓS, V. H.; PASQUAL, M.; DÓRIA, J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 462, 2023.

SILVA, L. I.; PEREIRA, M. C.; CARVALHO, A. M. X.; BUTTRÓS, V. H.; PASQUAL, M.; DÓRIA, J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 462, 2023.

SILVA, R. O.; BARIONI, L. G.; HALL, J. J.; MORETTI, A. C.; VELOSO, R. F.; ALEXANDER, P.; CRESPOLINI, M.; MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 201-211, 2017.

SINGH, V. K.; SINGH, A. K.; SINGH, P. P. *et al*. Interaction of plant growth promoting bacteria with tomato under abiotic stress: A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 267, p. 129–140, 2018.

SONG, M.; LIN, X.; WEI, X., ZENG, Q.; MU, C.; ZHOU, X. *Trichoderma viride* improves phosphorus uptake and the growth of *Chloris virgata* under phosphorus-deficient conditions. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1425034, 2024.

SOUMARE, A.; DIEDHIOU, A. G.; THUITA, M.; HAFIDI, M.; OUHDOUCH, Y.; GOPALAKRISHNAN, S.; KOUISNI, L. Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. **Plants**, v. 9, n. 8, p. 1011, 2020.

SOUZA JUNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, M. L.; GARCEZ, T. B.; RICHART, A. C.; BARBOSA, N. G. S. Natural reactive phosphate and poultry litter association on growth of forage grasses in an Amazonian Oxisol. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, 2018.

STAMFORD, N. P.; MOURA, A. M. M. F.; SANTOS, K. S.; SANTOS, P. R. Atuação de *Acidithiobacillus* na solubilização de fosfato natural em solo de tabuleiro cultivado com jacatupé (*Pachyrhizus erosus*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 75-83, 2004.

STEFAN, M.; MUNTEANU, N.; STOLERU, V.; MIHASAN, M.; HRITCU, L. Seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria enhances photosynthesis and yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 151, p. 22-29, 2013.

STOCKING, M.; MURNAGHAN, N. **Handbook for the field assessment of land degradation**. London: Earthscan Publications Ltd. 2001. 169 p.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.

STRATFORD, J. P.; WOODLEY, M. A.; PARK, S. Variation in the morphology of *Bacillus mycoides* due to applied force and substrate structure. **PloS One**, v. 8, n. 12, p. e81549, 2013.

STUDER, J. M.; SCHWEER, W. P.; GABLER, N. K.; ROSS, J. W. Functions of manganese in reproduction. **Animal Reproduction Science**, v. 238, p. 106924, 2022.

STUMMER, B. E.; ZHANG, X.; YANG, H.; HARVEY, P. R. Co-inoculation of *Trichoderma gamsii* A5MH and *Trichoderma harzianum* Tr906 in wheat suppresses in planta abundance of the crown rot pathogen *Fusarium pseudograminearum* and impacts the rhizosphere soil fungal microbiome. **Biological Control**, v. 165, p. 104809, 2022.

SWAIN, M. R.; LAXMINARAYANA, K.; RAY, R. C. Phosphorus solubilization by thermotolerant *Bacillus subtilis* isolated from cow dung microflora. **Agricultural Research**, v. 1, p. 273-279, 2012.

SYLVESTER-BRADLEY, R.; ASAKAWA, N.; LA TORRACA, S.; MAGALHÃES, F. M.M M.; OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, R. M. Levantamento quantitativo de microrganismos solubilizadores de fosfatos na rizosfera de gramíneas e leguminosas forrageiras na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 12, n. 1, p. 15-22, 1982.

TAN, P. Y; LIU, Y. Modelling bacterial chemotaxis for indirectly binding attractants. **Journal of Theoretical Biology**, v. 487, p. 110120, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; FONTANA, A.; TEXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. - Portal Embrapa. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo. Acesso em: 24 abr. 2025.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev. e ampl. Brasília, GL: Embrapa, 2017. 574 p.

THOMAS, S.; MATHEW, L.; RISHAD, K. Isolation and molecular identification of phosphate solubilizing bacteria, Bacillus licheniformis UBPSB-07 capable of enhancing seed germination in Vigna radiata L. **Phytomorphology**, v. 68, n. 1&2, p. 13-18, 2018.

TIEN, T. M.; GASKINS, M. H.; HUBBELL, D. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 37, n. 5, p. 1016-1024, 1979.

TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, p. 671-677, 2002.

TIMMOFEEVA, A.; GALYAMOVA, M.; SEDYKH, S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. **Plants**, v. 11, n. 16, p. 2119, 2022.

TORRES-CUESTA, D.; MORA-MOTTA, D.; CHAVARRO-BERMEO, J. P.; OLAYA-MONTES, A.; VARGAS-GARCIA, C.; BONILLA, R.; ESTRADA-BONILLA, G. Phosphate-solubilizing bacteria with low-solubility fertilizer improve soil P availability and yield of kikuyu grass. **Microorganisms**, v. 11, n. 7, p. 1748, 2023.

TOUHAMI, D.; MCDOWELL, R. W.; CONDRON, L. M. Role of organic anions and phosphatase enzymes in phosphorus acquisition in the rhizospheres of legumes and grasses grown in a low phosphorus pasture soil. **Plants**, v. 9, n. 9, p. 1185, 2020.

TRUNET, C.; VISCHER, N.; COROLLER, L.; BRUL, S. Germination and outgrowth of *Bacillus mycoides* KBAB4 spores are impacted by environmental pH, quantitatively analyzed at single cell level with sporetracker. **Food Microbiology**, v. 121, p. 104509, 2024.

TSEGAYE, Z.; GIZAW, B.; TEFERA, G.; FELEKE, A.; CHANIYALEW, S.; ALEMU, T.; ASSEFA, F. Isolamento e caracterização bioquímica de bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGP) que colonizam a rizosfera da cultura de Tef durante o estágio de muda. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v. 14, p.10586–10596, 2019.

TSHEWANG., S.; RENGEL, Z.; SIDDIQUE, K. H.; SOLAIMAN, Z. M. Microbial consortium inoculant increases pasture grasses yield in low-phosphorus soil by influencing root morphology, rhizosphere carboxylate exudation and mycorrhizal colonisation, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 2, p. 540–549, 2021.

TURAN, M.; ATAOGLU, N.; SAHIN, F. Effects of *Bacillus* FS-3 on growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plants and availability of phosphorus in soil. **Plant Soil and Environment**, v. 53, n. 2, p. 58, 2007.

TURAN, M.; GULLUCE, M.; VON WIRÉN, N.; SAHIN, F. Yield promotion and phosphorus solubilization by plant growth-promoting rhizobacteria in extensive wheat production in Turkey. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 6, p. 818-826, 2012.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; DA SILVA, L. F. S.; BOVI, R. C.; COOPER, M. Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 1, p. 22-36, 2021.

VALKAMA, E.; VIRKAJÄRVI, P.; UUSITALO, R.; YLIVAINIO, K.; TURTOLA, E. Meta-analysis of grass ley response to phosphorus fertilization in Finland. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 36-53, 2016.

VALLE, C. B.; JANK, L.; RESENDE, R. M. S.O melhoramento de forrageiras tropicais no Brasil. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 4, p. 460-472, 2009.

van der HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; Van STRAALEN, N. M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v. 11, n. 3, p. 296–310, 2008.

van RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico. 2001. 284 p.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 1, p. 48–57, fev. 2010.

VINCI, G.; COZZOLINO, V.; MAZZEI, P.; MONDA, H.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A. An alternative to mineral phosphorus fertilizers: The combined effects of *Trichoderma harzianum* and compost on *Zea mays*, as revealed by 1H NMR and GC-MS metabolomics. **PloS One**, v. 13, n. 12, e0209664, 2018.

WAKELIN, S.; MANDER, C.; GERARD, E.; JANSA, J.; ERB, A.; YOUNG, S.; CONDRON, L.; O'CALLAGHAN, M. Response of soil microbial communities to contrasted histories of phosphorus fertilisation in pastures. **Applied Soil Ecology**, v. 61, p. 40-48, 2012.

WALKUP, J.; FREEDMAN, Z.; KOTCON, J.; MORRISSEY, E. M. Pasture in crop rotations influences microbial biodiversity and function reducing the potential for nitrogen loss from compost. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 304, p. 107122, 2020.

WARNOCK, R.; VALENZUELA, J.; TRUJILLO, A.; MADRIZ, P.; GUTIÉRREZ, M. Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. **Agronomía Tropical**, v. 56, n. 1, p. 2, 2006.

WEST, T. A.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; GIBBS, H. K. Protected areas still used to produce Brazil's cattle. **Conservation Letters**, v. 15, n. 6, p. e12916, 2022.

WHITELAW, M. A. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. **Advances in Agronomy**, v. 69, p. 99-151, 1999.

WILKES, T. I.; WARNER, D. J.; EDMONDS-BROWN, V.; DAVIES, K. G. Species-specific interactions of *Bacillus* innocula and arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with Winter Wheat. **Microorganisms**, v. 8, n. 11, p. 1795, 2020.

WOO, S. L.; RUOCCO, M.; VINALE, F.; NIGRO, M.; MARRA, R.; LOMBARDI, N.; PASCALE, A.; LANZUISE, S.; MANGANIELLO, G.; LORITO, M. *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. **The Open Mycology Journal**, v. 8, n. 1, 2014.

YI, Y. ***Bacillus mycoides***: novel tools for studying the mechanisms of its interaction with plants. Tese de doutorado: University of Groningen. 2018. 165 p.

YI, Y.; DE JONG, A.; FRENZEL, E.; VAN ELSAS, J. D.; KUIPERS, O. P. Comparative transcriptomics of *Bacillus mycoides* strains in response to potato-root exudates reveals different genetic adaptation of endophytic and soil isolates. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 1487, 2017.

ZHANG, H.; KIM, M. S.; SUN, Y.; DOWD, S. E.; SHI, H.; PARE, P. W. Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. **Molecular Plant Microbe Interactions**, Saint Paul, v. 21, n. 6, p. 737-744, 2008.

ZHU, Y.; ZHANG, J.; GAO, X.; SHEN, Y.; QIN, L.; ZHU, B. Metabolites from a co-culture of *Trichoderma yunnanense* and *Paenibacillus peoriae* improve resistance to corm rot disease in Crocus sativus. **Industrial Crops and Products**, v. 213, p. 118465, 2024.