

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

FERNANDO DE SOUZA BUZO

**MICORRIZAS NA CULTURA DO MILHO: PROMOÇÃO DE
CRESCIMENTO E MAIOR EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO
FOSFATADA**

Ilha Solteira

2021

FERNANDO DE SOUZA BUZO

**MICORRIZAS NA CULTURA DO MILHO: PROMOÇÃO DE
CRESCIMENTO E MAIOR EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO
FOSFATADA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, Unesp – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Orivaldo Arf
Orientador

Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo
Co-Orientador

Prof^a. Dr^a. Amaia Miren Nogales Garcia
Co-Orientadora

**Ilha Solteira
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B992m Buzo, Fernando de Souza.
Micorrizas na cultura do milho: promoção de crescimento e maior eficiência da adubação fosfatada / Fernando de Souza Buzo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
99 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2021

Orientador: Orivaldo Arf

Coorientadores: Everlon Cid Rigobelo; Amaia Miren Nogales Garcia

Inclui bibliografia

1. Doses de fósforo. 2. Fungos micorrízicos arbusculares. 3. Inoculação. 4. *Rhizophagus intraradices*. 5. Segunda safra. 6. *Zea mays* L.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Serviço
Serviço Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CDD 9 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: *Micorrizas na cultura do milho: Promoção de crescimento e maior eficiência da adubação fosfatada*

AUTOR: FERNANDO DE SOUZA BUZO

ORIENTADOR: ORIVALDO ARF

COORDINADORA: AMAIA MIREN NOGALES GARCIA

COORDINADOR: EVERLON CID RIGOBELLO

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



Prof. Dr. ORIVALDO ARF (Participação Virtual)

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. MARCO EUSTAQUIO DE SA (Participação Virtual)

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Profª Drª ELISÂNGELA DUPAS (Participação Virtual)

Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Ilha Solteira, 31 de março de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, nosso Pai, e Jesus, nosso Mestre, por todas as bênçãos e amparo que seu Amor derrama sobre nós. É graças à essa Bondade que a vida de cada um de nós pode ser bela e cheia de oportunidades, alegrias, harmonia. Muito obrigado pelo apoio na minha caminhada até aqui!

À minha amada Família: minha mãe Sônia Maria de Souza Buzo, meu pai Cássio Luiz Buzo e meu irmão Ricardo de Souza Buzo! Sem vocês nada disso teria sido possível... Obrigado por serem meu porto seguro, por me amarem como sou, pelos conselhos, apoio e socorro nos momentos difíceis e obrigado por vibrarem de alegria comigo a cada conquista nova! Agradeço pelos ensinamentos, exemplos, amizade e oportunidades. Agradeço também aos meus avós queridos: Laurinda, Rubens, Orcílio e Jandyra, cuja presença, exemplos e ensinamentos ficarão pra sempre em meu coração. Devo muito a cada um de vocês.

Meu muitíssimo obrigado ao querido Orivaldo Arf, meu professor, orientador e amigo por todos esses anos de convivência e trabalho, pelas oportunidades e confiança, pela paciência e ensinamentos, pelas boas conversas e bons momentos vivenciados! Sua participação na minha vida foi muito além do convívio profissional!

Aos meus queridos co-orientadores: Everlon Cid Rigobelo, pela parceria, pelo suporte, ensinamentos e oportunidades de trabalho que muito somou nesse momento da minha vida e carreira; e a Amaia Nogales, pela disposição e parceria que se estabeleceu, por todas as orientações, as contribuições e possibilidades que muito contribuíram a mim e este trabalho, apesar da distância.

A todo o pessoal da Equipe de Pesquisa com Cereais (Equipe Arf), pelo apoio mútuo no desenvolvimento dos trabalhos e pela convivência tão rica e prazerosa! Graças à colaboração de todos pudemos desenvolver bons trabalhos, construir boas amizades e fruir de bons momentos de lazer também!

Aos amigos, que são estrelas que a Vida coloca em nossos caminhos para nos auxiliarem nos momentos difíceis e comemorarem conosco nos momentos de vitória! Eu com certeza sou uma pessoa melhor e mais feliz hoje graças a presença de cada um deles. E se cheguei até aqui, foi pela contribuição essencial de todos que fazem parte da minha vida. A amizade é, de fato, um grande tesouro que vamos adquirindo ao longo da vida. Deixo aqui meu agradecimento especial a alguns amigos que foram essenciais para esse momento: Lucas Garé, Nayara Garcia, Flávia Meirelles e Alex Rangel, Felipe Bertacine, Jeferson Souza, Pedro Giova, Maura Santos, Izabela Sanches, Pamela Morita, Juliana Correa, Juliana Martins, César Buranello, Emariene Satin, Lucas Sussai e Marcia Codo, Nathália Marchiori, Pedro Destro, Yago Vanzela, Marco Knoll, Angela Martins, Gabriel Rogério, Manu dos Santos, Paula Andrezza, Paulo Pissolito, Adalberto Rezende, Poliana Rosa, Wesley Pedroso, Letícia Zylmennith, Isabela Gatto, Fabiana Lopes, Eduardo Filliagi, Ana Célia Melges, Amanda Consoni, Beatriz Ribeiro, Lucas Sgotti, Mariana Menis, Lais Midori, Luis Otávio, Eduardo Pontes, Silvio Saraiva, Otávio Masson, Edvan Frezarin, Roberta Santos, Barbara Gomes, Rodolfo Rocha, Thais Lana, Tamires Lima.

Aos professores que fizeram parte da minha jornada, desde os professores do pré, ensino fundamental, médio, graduação e pós, com um carinho especial para o Edson Lazarini, Marco Eustáquio de Sá, Antônio Bolonhezi, Marcelo Minhoto Filho, Aparecida Boliani, Lucíola Santos, Marcelo Andreotti, Roseli Arbach, Sueli Amaral, Malta Prates, Élcio, Silvana...

À FEIS e à FCAV, as unidades da UNESP de Ilha Solteira e Jaboticabal, locais onde foram realizadas partes desse trabalho e que sem toda sua estrutura nada disso seria possível. E isso inclui todas as pessoas envolvidas nisso: o pessoal dos laboratórios, departamentos e da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão em Selvíria! Graças a vocês, pudemos instalar, conduzir, analisar e construir os resultados desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da FEIS/UNESP, à CAPES e à FAPESP pela oportunidade de estar desenvolvendo esse trabalho, com apoio, estrutura, recursos e bolsa de financiamento. O presente trabalho foi realizado inicialmente com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (bolsa de Mestrado, período 01/03/2019-31/10/2019) e, em seguida, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio do processo 2019/04120-7 (bolsa de Mestrado, período 01/11/2019-28/02/2021).

Aos membros da minha qualificação por todas as contribuições que fizeram ao trabalho, enriquecendo-o e ampliando minha visão a respeito dele. E aos membros da banca de defesa da dissertação, Elisângela Dupas e Marco Eustáquio de Sá, pela disponibilidade, participação e contribuições!

Finalmente, obrigado à todas as outras pessoas que não foram citadas diretamente, mas que fizeram parte dos meus dias e, por isso, são importantíssimos em minha vida! Afinal, cada um de nós é resultado das experiências que vive e das pessoas com quem convive!

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

As plantas necessitam de fósforo (P) para se desenvolverem e atingirem altas produtividades, mas a baixa disponibilidade deste nutriente nos solos e a pequena eficiência da adubação fosfatada exige que doses altas de P_2O_5 sejam aplicadas. Fungos micorrízicos arbusculares (FMA), em simbiose com os vegetais, promovem maior crescimento das culturas, maior absorção de água e de nutrientes, principalmente o P. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar os benefícios do uso de um inoculante a base de *Rhizophagus intraradices* para o desenvolvimento das plantas e para aumentar a eficiência da adubação fosfatada na cultura do milho. O trabalho foi conduzido em vasos para verificar como a inoculação com FMA e a adubação fosfatada influenciam o desenvolvimento inicial de plantas de milho e o acúmulo de nutrientes na parte aérea e em campo para analisar os efeitos desses dois fatores no desenvolvimento de plantas, componentes de produção, na produtividade e nas características nutricionais do milho segunda safra irrigado por aspersão. Os tratamentos consistiram na combinação de 5 doses de P_2O_5 na semeadura (0; 25; 50; 75 e 100% do recomendado) com 4 doses de inoculante contendo *R. intraradices* (0; 60; 120 e 180 g ha⁻¹). O experimento em vaso foi conduzido na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em delineamento de blocos ao acaso e esquema fatorial 5 x 4. O experimento em campo foi conduzido em área da Fazenda Experimental da UNESP, situada em Selvíria/MS nas safras de 2019 e 2020, em delineamento de blocos ao acaso e parcelas subdivididas, tendo as doses de P_2O_5 nas parcelas e as doses do inoculante nas subparcelas. Os resultados obtidos foram que a inoculação de *R. intraradices* beneficiou o desenvolvimento das plantas de milho e o acúmulo de alguns nutrientes na parte aérea, com potencial para proporcionar melhor aproveitamento da adubação fosfatada e incrementar a produtividade da cultura. A adubação fosfatada demonstrou benefícios no desenvolvimento vegetativo das plantas de milho em doses menores do que a recomendada e não houve efeito para a produtividade de grãos. Conclui-se que em condições ambientais ótimas e em sistemas agrícolas que beneficiam a comunidade de FMA nativos, a inoculação micorrízica resulta em benefícios menos expressivos, não se tornando prática necessária. Além disso, a adubação fosfatada é essencial para o desenvolvimento, nutrição e produtividade do milho, mas os efeitos imediatos podem não ser visualizados em solos com boa fertilidade.

Palavras-chave: Doses de fósforo. Fungos micorrízicos arbusculares. Inoculação. *Rhizophagus intraradices*. Segunda safra. *Zea mays* L.

ABSTRACT

Plants need phosphorus to grow and achieve high yields, but the low availability of this nutrient in soils and the low efficiency of phosphate fertilization requires that high doses of P_2O_5 be applied. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), in symbiosis with vegetables, promote greater crop growth, greater absorption of water and nutrients, especially phosphorus. Thus, the objective of the work was to evaluate the benefits of using an inoculant based on *Rhizophagus intraradices* for the development of plants and to increase the efficiency of phosphate fertilization in the corn crop. The work was conducted in pots to verify how inoculation with AMF and phosphate fertilization influence the initial development of corn plants and the accumulation of nutrients in the aerial part and in the field to analyze the effects of these two factors on the development of plants, components of production, productivity and nutritional characteristics of second crop corn irrigated by sprinkler. The treatments consisted of combining 5 doses of P_2O_5 at sowing (0; 25; 50; 75 and 100% of the recommended) with 4 doses of inoculant containing *R. intraradices* (0; 60; 120 and 180 g ha⁻¹). The pot experiment was conducted at the Engineering Faculty of Ilha Solteira, in a randomized block design and 5 x 4 factorial scheme. The field experiment was conducted in an area of UNESP's Experimental Farm, located in Selvíria / MS in the 2019 harvests. and 2020, in a randomized block design and subdivided plots, with P_2O_5 doses in plots and inoculant doses in subplots. Among the main conclusions, it is noteworthy that the inoculation of *R. intraradices* benefited the development of corn plants and the accumulation of some nutrients in the aerial part, with the potential to provide better use of phosphate fertilization and increase crop productivity. However, in optimal environmental conditions and in agricultural systems that benefit the native AMF community, mycorrhizal inoculation results in less expressive benefits. In addition, phosphate fertilization is essential for the development, nutrition and productivity of corn, but the immediate effects may not be seen in soils with good fertility.

Keywords: *Zea mays* L. *Rhizophagus intraradices*. Phosphorus doses. Inoculation. Arbuscular mycorrhizal fungi. Second crop.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Dados climáticos de precipitação, temperatura média, insolação e umidade relativa do ar média referentes ao período de condução do experimento. Ilha Solteira/SP, 2020.....	27
Figura 2	- Altura de plantas [A], diâmetro do colmo [B] e massa seca de raiz [C] em função de doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho.....	33
Figura 3	- Análise de componentes principais (PCA) para as variáveis relacionadas à adubação fosfatada e inoculação micorrízica em milho e agrupamento em função das doses de P_2O_5 aplicadas no solo [A] e doses do inoculante micorrízico na semente de milho [B].....	36
Figura 4	- Correlação Parcial de Pearson entre os acúmulos de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn), a altura de plantas, diâmetro de colmo, massa seca da parte aérea, massa seca de raiz e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares após doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho.....	38
Figura 5	- Dados climáticos de precipitação (mm), temperatura média ($^{\circ}C$), insolação ($h\ dia^{-1}$) e umidade relativa do ar média (%) referentes ao período de condução do experimento. Selvíria/MS, 2019 e 2020.....	49
Figura 6	- Representação de um dos quatro blocos do experimento com a distribuição dos tratamentos em parcelas e subparcelas.....	51
Figura 7	- Dados climáticos de precipitação (mm), temperatura média ($^{\circ}C$), insolação ($h\ dia^{-1}$) e umidade relativa do ar média (%) referentes ao período de condução do experimento. Selvíria/MS, 2019 e 2020.....	72
Figura 8	- Teor foliar de fósforo - P [A], Zinco - Zn [B] e teor nos grãos de Magnésio - Mg [C] em função de doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho na safra de 2020.	78
Figura 9	- Teores foliares de K em 2019 [A] e Mg em 2020 [B] em milho em função da adubação fosfatada.....	79
Figura 10	- Teores de P em 2020 [A] e S em 2019 [B] nos grãos de milho em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Desenvolvimento vegetativo e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares em plantas de milho em V ₈ em função da adubação fosfatada e inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	31
Tabela 2	- Acúmulo de macronutrientes (nitrogênio – N, fósforo – P, potássio – K, cálcio – Ca, magnésio – Mg e enxofre – S) na parte aérea de plantas de milho em V ₈ em função da adubação fosfatada e inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	34
Tabela 3	- Acúmulo de micronutrientes (cobre – Cu, ferro – Fe; manganês – Mn e zinco – Zn) na parte aérea de plantas de milho em V ₈ em função da adubação fosfatada e inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	35
Tabela 4	- Análise química do solo na camada de 0,00-0,20 m das áreas experimentais. Selvíria/MS, 2019 e 2020.....	50
Tabela 5	- Atividade da fosfatase ácida (FOSFATASE), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares no solo (ESPOROS) e porcentagem de colonização micorrízicas raízes de milho (COLONIZAÇÃO) em função de doses de P ₂ O ₅ e doses de inoculante contendo <i>Rhizophagus intraradices</i> . Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020.....	56
Tabela 6	- Índice de Clorofila Foliar (ICF), altura de planta (Altplant), altura de inserção da espiga (Altins), diâmetro do colmo (diacolm) e matéria seca de planta (MSP) em função de doses de P ₂ O ₅ e doses de inoculante contendo <i>Rhizophagus intraradices</i> . Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020.....	57
Tabela 7	- Comprimento de espiga (COMPESP), diâmetro de espiga (DIAMESP), número de fileiras por espiga (NUMFIL) e número de grãos por fileira (GFIL) em função de doses de P ₂ O ₅ e doses de inoculante contendo <i>Rhizophagus intraradices</i> . Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020.....	58
Tabela 8	- Massa da espiga despilhada (MESP), massa de grãos por espiga (MGRAO), massa do sabugo (MSAB), massa de mil grãos (M1000) e	

	produtividade (PRODT) em função de doses de P_2O_5 e doses de inoculante contendo <i>Rhizophagus intraradices</i> . Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020.....	59
Tabela 9	- Teores foliares de macronutrientes em milho por ocasião do florescimento da cultura em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	77
Tabela 10	- Teores de micronutrientes nos grãos de milho colhidos em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	77
Tabela 11	- Teores foliares de micronutrientes no milho por ocasião do florescimento da cultura em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	80
Tabela 12	- Teores de macronutrientes nos grãos de milho colhidos em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com <i>Rhizophagus intraradices</i> nas sementes.....	81

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	13
1.1	INTRODUÇÃO.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2.1	Milho.....	14
1.2.2	Fósforo.....	15
1.2.3	Micorrizas.....	16
1.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
	REFERÊNCIAS.....	20
	CAPÍTULO 2: FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ADUBAÇÃO FOSFATADA BENEFICIAM O DESENVOLVIMENTO INICIAL E O ACÚMULO DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE MILHO.....	25
2.1	INTRODUÇÃO.....	25
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.2.1	Avaliações realizadas.....	28
2.2.2	Análise estatística.....	29
2.3	RESULTADOS.....	30
2.4	DISCUSSÃO.....	38
2.5	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	CAPÍTULO 3: MICORRIZAS PROMOVEM CRESCIMENTO E MAIOR EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO?	47
3.1	INTRODUÇÃO.....	47
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3.2.1	Localização do experimento.....	48
3.2.2	Material biológico.....	50
3.2.3	Delineamento experimental e tratamentos.....	50
3.2.4	Instalação e condução do experimento.....	51
3.2.5	Avaliações realizadas.....	53
3.2.6	Análise estatística.....	54

3.3	RESULTADOS.....	55
3.4	DISCUSSÃO.....	60
3.5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65
	CAPÍTULO 4: ADUBAÇÃO FOSFATADA E INOCULAÇÃO MICORRÍZICA AUMENTAM OS TEORES DE NUTRIENTES EM FOLHAS E GRÃOS DE MILHO.....	69
4.1	INTRODUÇÃO.....	69
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	70
4.2.1	Localização do experimento.....	70
4.2.2	Material biológico.....	73
4.2.3	Delineamento experimental e tratamentos.....	73
4.2.4	Instalação e condução do experimento.....	74
4.2.5	Avaliações realizadas.....	75
4.2.6	Análise estatística.....	76
4.3	RESULTADOS.....	76
4.4	DISCUSSÃO.....	82
4.5	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	85
	CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
	APÊNDICE A – Imagens dos experimentos.....	89

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

O milho é o mais importante cereal de interesse agrícola no panorama mundial e sua importância para o ser humano se deve a sua ampla variedade de utilizações, entre elas para a alimentação animal, alimentação humana e processamento industrial (DUARTE; MATTOSO; GARCIA, 2011). O cultivo de segunda safra ocorre após a cultura de verão ser colhida, enfrentando o sério risco da baixa disponibilidade de água no solo. Melhorias tecnológicas têm auxiliado os produtores nesse cultivo, aumentando a produtividade e melhorando a estabilidade produtiva da cultura, incluindo novos híbridos e o emprego de insumos e práticas culturais mais adequados, como a adoção do sistema plantio direto (DUARTE, 2015).

A exigência do milho em fósforo (P) é inferior à de nitrogênio e potássio, mas as doses recomendadas e aplicadas são altas em função da baixa eficiência da adubação fosfatada (COELHO *et al.*, 2002). Isso é consequência do fato de os solos brasileiros serem carentes de P em função do material de origem e da alta capacidade de adsorção do P pelas partículas do solo (RAIJ, 1991).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são capazes de promover o crescimento das plantas em função do aumento na absorção de nutrientes, utilização de formas de elementos não disponíveis no solo, armazenamento temporário de nutrientes, favorecimento de outros microorganismos benéficos, melhorias para a relação água-planta, produção de substâncias de crescimento vegetal, maior tolerância a estresses ambientais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Nesse sentido, destaca-se a participação dos FMA na dinâmica do P no solo e na planta, mostrando-se como uma alternativa vantajosa para aumentar a eficiência da adubação fosfatada e permitir o uso de formas de P no solo que não são disponíveis para as plantas. Assim, torna-se necessário entender como utilizar os FMA para proporcionar melhor desenvolvimento da cultura e reduzir a necessidade de P na semeadura do milho safrinha para tornar essa modalidade de cultivo tão relevante cada vez mais sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA

1.2.1 Milho

Segundo o oitavo levantamento do USDA para a safra 2020/21, a produção mundial de milho é estimada em 1,13 bilhões de toneladas do grão, sendo que os maiores produtores mundiais são EUA (360,25 milhões t), China (260,78 milhões t), Brasil (109,00 milhões t), União Europeia (63,60 milhões t) e Argentina (47,5 milhões t). O consumo mundial total é estimado em 1,15 bilhões de toneladas e os maiores consumidores são EUA, China, União Europeia e Brasil, nessa ordem (USDA, 2021).

No Brasil, trata-se de um cultivo tradicional e com relevante papel socioeconômico, principalmente no que se refere ao valor da produção agropecuária, área cultivada e volume produzido, com destaque para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (FANCELLI; DOURADO NETO, 2001). Segundo o quinto levantamento da safra 2020/21 da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), estima-se que cerca de 14,36 milhões de ha serão cultivados com milho segunda safra no Brasil, resultando em produtividade aproximada de 5,58 t ha⁻¹ e totalizando produção de 80,08 milhões de t do grão (CONAB, 2021).

Com um cenário externo favorável, o Brasil ampliou sua produção interna do grão (foram 3,5 milhões de ha a mais em 2014/15 em relação a 2004/05). E essa expansão ocorreu majoritariamente na segunda safra (ou safrinha), que registrou um salto de mais de 200% na área cultivada. Com o consequente aumento do volume produzido, o milho se tornou a terceira cultura que mais gera renda ao país, estando abaixo apenas da soja e da cana-de-açúcar (SOLOGUREN, 2015).

O uso mais intensivo do solo, com maior número de cultivos por ano, tem sido promovido já há algum tempo com o intuito de aumentar a renda dos agricultores e a oferta de alimentos, resultando em maior produtividade por área, principalmente quando se adotam tecnologias apropriadas, incluindo melhor manejo do solo e tratos culturais adequados para cada cultura (FERREIRA, 1996). Assim, o cultivo do milho na safrinha tem sido viável economicamente para o produtor, pois além do retorno financeiro, proporciona os benefícios agrônômicos da rotação de culturas e aumento da palhada nas áreas (CASAGRANDE; FORNASIERI FILHO, 2002).

Até recentemente, ao comparar-se as produtividades médias do milho primeira e segunda safra, observava-se que na região Centro-Sul, havia queda de quase 2 t ha⁻¹ na segunda safra em relação à primeira (CONAB, 2019). Entre os fatores que justificam essa queda, cita-

se o fato de esse período de semeadura da cultura coincidir com uma época de incertezas climáticas, geralmente caracterizada por baixos índices pluviométricos. Isso compromete a produtividade da cultura, principalmente se a deficiência hídrica coincidir com o florescimento da mesma, período dependente de água para a definição da quantidade de óvulos a serem fecundados e, conseqüentemente, para a produção de grãos (CRUZ *et al.*, 2013).

Desse modo, é evidente a necessidade de prosseguirem-se os estudos sobre essa cultura de destacada importância nacional e mundial, seus ambientes de cultivo e ainda a busca por possibilidades sustentáveis para impulsionar o crescimento da produtividade do milho, aumentando a produção de alimentos e a rentabilidade do produtor rural. Como a cultura do milho na segunda safra tem se mostrado de maior relevância para o cenário agrícola brasileiro, mas sua produtividade é inferior à da primeira safra, há maior necessidade de estudos para essa situação específica (FANCELLI, 2015).

1.2.2 Fósforo

O P é um nutriente que faz parte de diversos compostos nos vegetais, dentre eles o fosfato das moléculas de açúcares, intermediários dos processos de respiração e fotossíntese; os fosfolipídios que compõem as membranas das células vegetais; as coenzimas; os nucleotídeos dos ácidos nucleicos (que formam os genes e cromossomos); além do ATP do metabolismo energético (TAIZ *et al.*, 2017).

A exigência do milho (como também das outras plantas de interesse agrícola) em P é em quantidade bastante inferior à de nitrogênio e potássio, mas as doses normalmente recomendadas são altas, em função da baixa eficiência (20 a 30%) de aproveitamento desse nutriente pela cultura (BASTOS *et al.*, 2008). Isso é consequência da alta capacidade de adsorção do P quando é adicionado ao solo, o que reduz sua disponibilidade às plantas (CORRÊA *et al.*, 2008).

O baixo teor de P disponível no solo para a planta é uma condição comum ao redor do mundo, pois mesmo que o P total do solo ocorra em altas quantidades, grande parte dele é ligado firmemente a componentes orgânicos e inorgânicos do solo e está indisponível para a absorção por meio das raízes (BLEVINS, 1999). A principal razão que torna o P indisponível para as plantas é conhecida como fixação e seus mecanismos envolvem a adsorção nas superfícies de óxidos hidratados ou não de Fe e Al e/ou precipitação com os mesmos íons (NOVAIS *et al.*, 2007). Esse processo de fixação é intensificado em solos com maior acidez, maior teor de argila, maior presença de óxidos de Fe e Al na fração argila (SANTOS *et al.*, 2008; RESENDE;

FURTINI, 2007). Os depósitos de P para produção de fertilizantes são finitos, reduzindo-se gradualmente devido ao uso que se faz deles (TIESSSEN, 2008). Estima-se que com o atual consumo de fertilizantes fosfatados pela agricultura as reservas de matéria prima para fertilizantes fosfatados economicamente exploradas na atualidade serão exauridas dentro de 125 anos e as reservas totais dentro de 340 anos (SMIT *et al.*, 2009).

Dessa forma, é indispensável que o manejo da adubação favoreça a absorção do nutriente pelas plantas e minimize os processos de fixação pelo solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Melhorias no manejo da fertilidade do solo podem auxiliar no sentido de potencializar o aproveitamento do P pelas plantas, como a associação da adubação fosfatada com a calagem (ALBUQUERQUE *et al.*, 2003; ERNANI *et al.*, 2000).

Mas as plantas já desenvolveram estratégias para ganhar acesso ao P fixado, que podem ser aproveitadas pelo homem para o benefício da agricultura. Dentre elas destaca-se a sua associação com fungos micorrízicos, que colonizam as raízes das plantas e desenvolvem hifas que se difundem no solo, aumentando a absorção de P pela raiz (BLEVINS, 1999). A taxa de entrada de P nas micorrizas pode ser seis vezes superior à que ocorre nas raízes (SANDERS; TINKER, 1973). Além de que a concentração de P inorgânico no interior das hifas micorrízicas é aproximadamente 1000 vezes superior à que se encontra na solução do solo (PEARSON; GIANINAZZI, 1986).

1.2.3 Micorrizas

As relações entre organismos de espécies diferentes caracterizada por ser íntima e duradoura é denominada simbiose e podem ser tanto parasíticas como mutualísticas (RAVEN *et al.*, 2007). Na simbiose parasítica somente um dos dois organismos é beneficiado, enquanto na mutualística os dois organismos são beneficiados. Dentre as diversas simbioses mutualísticas existentes, a que ocorre entre micorrizas e plantas é uma das mais estudadas (SCHUBER *et al.*, 2001).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) representam a maior parte das espécies conhecidas de micorrizas e diferenciam-se das ectomicorrizas por apresentarem crescimento intercelular no córtex da raiz e formarem estruturas específicas denominadas de vesículas e arbúsculos em grande parte das famílias de plantas superiores, com destaque para as de interesse agrícola (SMITH; READ, 2010; WANG; QIU, 2006). Além disso, são organismos simbiontes obrigatórios, ou seja, as raízes de suas plantas hospedeiras são indispensáveis para sua multiplicação (KULKARNI *et al.*, 1997).

Os efeitos benéficos das associações micorrízicas para o desenvolvimento dos vegetais são evidenciados pela melhora na nutrição mineral das plantas (SMITH; READ, 2010). Nessas interações, o micélio do fungo colonizando a raiz se estende para o solo e absorve água e nutrientes, o que aumenta a extensão da superfície de absorção do sistema radicular. Além disso, promovem maior tolerância à condição de déficit hídrico, à metais pesados, em locais contaminados e maior resistência aos patógenos do solo (SILVEIRA, 1992). O maior benefício nutricional para as plantas se relaciona com o P (CHIU; PASZKOWSKI, 2019), mas a literatura demonstra que os FMA podem proporcionar incrementos positivos na absorção de N, S, Zn e Fe (GONZÁLEZ-GUERRERO *et al.*, 2005; GOVINDARAJULU *et al.*, 2005; LÓPEZ-PEDROSA *et al.*, 2006; ALLEN; SHACHAR-HILL, 2009).

Em troca, os fungos se beneficiam ao utilizar em seu metabolismo os carboidratos oriundos da fotossíntese vegetal (WANG; QIU, 2006) e nesse processo, a planta pode fornecer ao fungo até 20% do carbono fixado via fotossíntese (SMITH; READ, 2010). De maneira geral, o fotoassimilado enviado para as raízes é a sacarose e lá, ela é quebrada em glicose e frutose (GIAQUINTA, 1983; BAGO *et al.*, 2000). A micorrização das raízes das plantas aumenta significativamente a força do dreno de açúcares para que receba mais sacarose e isso se deve ao aumento da expressão de vários transportadores de sacarose nas folhas e nas raízes colonizadas (BOLDT *et al.*, 2011; DOIDY *et al.* 2012). A simbiose é bastante expressiva no que se refere à dinâmica do P, pois o fungo atua como uma espécie de ponte para o P existente no solo e as raízes do hospedeiro, absorvendo formas de fosfato solúveis, insolúveis ou orgânicos, que são formas não disponíveis para as plantas (COOKE, 1978). As hifas externas têm diâmetro reduzido e, com isso, há aumento da exploração física do solo, pois elas conseguem explorar o solo e acessar o P que está além da zona de esgotamento ao redor das raízes, onde os pêlos absorventes não têm acesso. Assim, verifica-se um aumento no volume de solo explorado pelas plantas devido à simbiose (GIANINAZZI-PEARSON; GIANINAZZI, 1983; BERBARA *et al.*, 2006; BALZERGUE *et al.*, 2011).

Nas raízes colonizadas por FMA, há duas vias de absorção de nutrientes: a via direta, onde são as próprias raízes que absorvem os nutrientes da solução do solo e a via indireta, com a transferência do que é absorvido pelas hifas micorrízicas externas para as células corticais radiculares, onde arbúsculos fornecem as interfaces simbióticas (SMITH *et al.*, 2003). Na via micorrízica, o P inorgânico é absorvido do solo pelas hifas por importadores de fosfato fúngico. Amônio e/ou nitrato, por sua vez, são absorvidos e assimilados em glutamina e depois em arginina para depois serem transferidos para as plantas. O fosfato é transportado principalmente na forma de grânulos de polifosfato (WANG *et al.*, 2017).

Além dessa capacidade dos FMA suprirem a planta colonizada com P, por meio da capacidade do micélio externo para absorvê-lo, a atividade das fosfatases ácidas, produzidas pelas raízes e hifas dos FMA, atuam na solubilização dos grupos fosfatos no solo e há mudança do pH na região da rizosfera, aumentando a disponibilidade do P inorgânico a ser absorvido (JAKOBSEN, 1995; MARSCHNER; DELL, 1994).

Apesar disso, as plantas possuem, de modo geral, a capacidade de regular o estabelecimento e a extensão da colonização por FMA, rejeitando-o em condições nutricionais elevadas (NOURI *et al.*, 2014). Kiers *et al.* (2011) afirmam que a troca bidirecional de nutrientes durante a simbiose entre plantas e FMA segue um modelo no qual ambos conseguem exercer controle sobre seus suprimentos. Essa troca bidirecional nutrientes-carboidratos, ao ser regulada pelos dois, garante uma relação simbiótica estável.

Atualmente, em diversos países do mundo, já é possível adquirir-se produtos biológicos com fungos micorrízicos, com produtos como o MycoApply® Liquid Endo, vendido nos EUA e o MycoForce® Endo and Ecto Transplanter, vendido na Inglaterra (RODRÍGUEZ-ROMERO; JAIZME-VEGA, 2007; CORKIDI *et al.*, 2009; FERNÁNDEZ *et al.*, 2011). Já no Brasil, o uso dessa tecnologia em grande escala ainda não é uma realidade. Somente em 2018 foi registrado no MAPA o primeiro inoculante micorrízico (Rootella BR®) para uso comercial em larga escala, sendo que sua disseminação de uso ainda está em fase inicial no mercado agrícola brasileiro (AGROLINK, 2018).

O benefício causado pelas micorrizas é de grande interesse agrônomo e, dessa forma, a produção de inoculante em larga escala e a inoculação do mesmo reduziria o uso de insumos agrícolas (BAGYARAJ; REDDY, 2005).

1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a importância da cultura do milho no Brasil e no mundo, como produto alimentar direto ou indireto e ainda com uso industrial diverso, são necessárias constantes pesquisas com a cultura que viabilizem novas e melhores técnicas de cultivo, visando maiores produtividades com menores custos e práticas cada vez mais sustentáveis. Nesse sentido, o contínuo estudo a respeito da adubação fosfatada se mostra essencial, tendo em vista sua importância como nutriente e sua limitação em solos intemperizados, se tornando pouco disponível para as plantas absorverem via raízes. Nesse contexto, o uso de fungos micorrízicos arbusculares surge como alternativa para proporcionar maiores produtividades, melhor

desenvolvimento das plantas e, principalmente, maior aproveitamento do P no solo, aumentando a eficiência da adubação fosfatada.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. **NovaTero é a primeira empresa do Brasil a obter registro do MAPA para comercialização de inoculante**. 2018. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/novatero-e-a-primeira-empresa-do-brasil-a-obter-registro-do-mapa-para-comercializacao-de-inoculante_407115.html. Acesso em: 10 jan. 2019.
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 799 - 806, 2003.
- ALLEN, J. W.; SHACHAR-HILL, Y. Sulfur transfer through an arbuscular mycorrhiza. **Plant Physiology**, Washington, v. 149, n. 1, p. 549-560, 2009.
- BAGO, B.; PFEFFER, P. E.; SHACHAR-HILL, Y. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. **Plant Physiology**, Washington, v. 124, n. 3, p. 949-958, 2000.
- BAGYARAJ, D. J.; REDDY, B. J. D. Application of arbuscular mycorrhizal fungi in horticulture. In: MEHROTRA, V. S. (ed.). **Mycorrhiza: role and applications**. New Delhi: Allied Publishers, 2005. p. 237-254.
- BALZERGUE C.; PUECH-PAGÈS V.; BÉCARD G.; ROCHANGE S.F. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 3, p. 1049-1060, 2011.
- BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 136-142, 2008.
- BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. III – Fungos micorrízicos arbusculares muito além da nutrição. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 53 – 85.
- BLEVINS, D. G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 4-5, 1999.
- BOLDT, K.; PÖRS, Y.; HAUPT, B.; BITTERLICH, M.; KÜHN, C.; GRIMM, B.; FRANKEN, P. Photochemical processes, carbon assimilation and RNA accumulation of sucrose transporter genes in tomato arbuscular mycorrhiza. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 168, n. 11, p. 1256-1263, 2011.
- CASAGRANDE, J. R. R.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 1, p. 33-40, 2002.
- CHIU, C. H.; PASZKOWSKI, U. Mechanisms and impact of symbiotic phosphate acquisition. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, Woodbury, v. 11, n. 6, p. a034603, 2019.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; HERNANI, L. C. **Cultivo do milho: nutrição e adubação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. Comunicado Técnico, 44.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2018/2019: quarto levantamento: janeiro/2018**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/23999_57b97f236e2bf03f1f87c796a16fab99. Acesso em: 28 jan. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2020/2021: quinto levantamento: fevereiro/2021**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/35818_f9638f460b06b8d623d8963949bb1aa0. Acesso em: 16 fev. 2021.

COOKE, R. *et al.* **The biology of symbiotic fungi**. New York: John Wiley and Sons., 1977.

CORKIDI, L.; BOHN, J.; EVANS, M. Effects of bifenthrin on mycorrhizal colonization and growth of corn. **HortTechnology**, Alexandria, v. 19, n. 4, p. 809-812, 2009.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 3, p. 218-224, 2008.

CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; SIMÃO, E. P. Safrinha deve superar a safra de verão. **Revista Campo & Negócio**, Uberlândia, n. 127, p. 24-29, 2013.

DOIDY, J.; VAN TUINEN, D.; LAMOTTE, O.; CORNEILLAT, M.; ALCARAZ, G.; WIPF, D. The *Medicago truncatula* sucrose transporter family: characterization and implication of key members in carbon partitioning towards arbuscular mycorrhizal fungi. **Molecular Plant**, Oxford, v. 5, n. 6, p. 1346-1358, 2012.

DUARTE, A. P. Milho safrinha se consagra e caracteriza um sistema peculiar de produção. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 9, n. 13, p.78-97, 2015.

DUARTE, J. O.; MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. **Milho: importância socioeconômica**. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_8_168200511157.html. Acesso em: 29 jan. 2019.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; CAMPOS, M. L.; CAMILLO, R. J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 537-544, 2000.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho: tecnologia e produtividade**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2001. 259 p.

FANCELLI, A. L. Cultivo racional e sustentável requer maior conhecimento sobre planta do milho. **Visão: Milho**, Piracicaba, v. 9, n. 13, p. 20-23, 2015.

FERNÁNDEZ, F.; DELL'AMICO, J. M.; ANGOA, M. V.; PROVIDENCIA, I. E. Use liquid inoculum of the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus hoi* in rice plants cultivated in a saline Gleysol: A new alternative to inoculate. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, Madison, v. 3, n. 2, p. 24-33, 2011.

FERREIRA, A. M. **Efeitos de adubos verdes nos componentes de produção de diferentes cultivares de milho**. 1996. 70 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1996.

GIANINAZZI-PEARSON, V.; GIANINAZZI, S. The physiology of vesicular-arbuscular mycorrhizal roots. **Plant Soil**, The Hague, v. 71, p. 197-209, 1983.

GIAQUINTA, R. T. Phloem loading of sucrose. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 34, n. 1, p. 347-387, 1983.

GONZÁLEZ-GUERRERO, M.; AZCÓN-AGUILAR, C.; MOONEY, M.; VALDERAS, A.; MACDIARMID, C. W.; EIDE, D. J.; FERROL, N. Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. **Fungal Genetics and Biology**, Orlando, v. 42, n. 2, p. 130-140, 2005.

GOVINDARAJULU, M.; PFEFFER, P. E.; JIN, H.; ABUBAKER, J.; DOUDS, D. D.; ALLEN, J. W.; BÜCKING, H.; LAMMERS, P. J.; SHACHAR-HILL, Y. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Nature**, Washington, v. 435, n. 7043, p. 819-823, 2005.

JAKOBSEN, I. Transport of phosphorus and carbon in VA mycorrhizas. In: VARMA, A.; HOCK, B. (ed.). **Mycorrhiza: structure, function, molecular biology and biotechnology**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. p. 297-324.

KAMPRATH, E.J. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils. In: FERRI, M.G. (coord.). **Simpósio sobre o cerrado: bases para utilização agropecuária**. 4 ed. Belo Horizonte: Itatiaia, 1977. p. 333-347.

KIERS, E. T.; DUHAMEL, M.; BEESETTY, Y.; MENSAH, J. A.; FRANKEN, O.; VERBRUGGEN, E.; FELLBAUM, C. R.; KOWALCHUK, G. A.; HART, M. M.; BAGO, A.; PALMER, T. M.; WEST, S. A.; VANDENKOORNHUYSE, P.; JANS, J.; BÜCKING, H. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. **Science**, Washington, v. 333, n. 6044, p. 880-882, 2011.

KULKARNI, S. S.; RAVIRAJA, N. S.; SRIDHAR, K. R. Arbuscular mycorrhizal fungi of tropical sand dunes of west coast of India. **Journal of Coastal Research**, Fort Lauderdale, New York, v. 13, n. 3, p. 931-936, 1997.

LÓPEZ-PEDROSA, A.; GONZÁLEZ-GUERRERO, M.; VALDERAS, A.; AZCÓN-AGUILAR, C.; FERROL, N. GintAMT1 encodes a functional high-affinity ammonium transporter that is expressed in the extraradical mycelium of *Glomus intraradices*. **Fungal Genetics and Biology**, New York, v. 43, n. 2, p. 102-110, 2006.

MARSCHNER, H.; DELL, B. Nutrient-uptake in mycorrhizal symbiosis. **Plant and Soil**, The Hague, v. 159, n.1, p. 89-102, 1994.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. da Universidade Federal de Lavras, 2006. 729 p.

NOURI, E.; BREUILLIN-SESSOMS, F.; FELLER, U.; REINHARDT, D. Phosphorus and nitrogen regulate arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Petunia hybrida*. **PloSone**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. e90841, 2014.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFFV/DPS, 1999. 399 p.

PEARSON, J. N.; SCHWEIGER, P. *Scutellospora calospora* (Nicol. & Gerd.) Walker e Sanders associated with subterranean clover: dynamics of colonization, sporulation and soluble carbohydrates. **New Phytologist**, Cambridge, v. 124, n. 2, p. 215-219, 1993.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. Documentos, 195.

RODRÍGUEZ-ROMERO, A. S.; JAIZME-VEGA, M. C. Assessment of the effect of commercial mycorrhizal fungi products on the growth of banana plants in the nursery. **InfoMusa**, Montpellier, v. 16, n. 1-2, p. 23-27, 2007.

SANDERS, F. E.; TINKER, P. Phosphate flow into mycorrhizal roots. **Pesticide Science**, Oxford, v. 4, p. 385-395, 1973.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SILVEIRA, A. P. D. Micorrizas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 257-319.

SMIT, A. L.; BINDRABAN, P. S.; SCHRÖDER, J. J.; CONJIN, J. G.; VAN DER MEER, H. G. Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. **Plant Research International**, Wageningen, n. 282, 2009. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/12571>. Acesso em: 24 fev. 2021.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. New York: Academic press, 2010.

SMITH, S. E.; SMITH, F. A.; JAKOBSEN, I. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. **Plant Physiology**, Washington, v. 133, n. 1, p. 16-20, 2003.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Visão Agrícola: Milho**, Piracicaba, v. 9, n. 13, p. 8-11, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TIESSEN, H. Phosphorus in the global environment. *In*: WHITE, P. J., HAMMOND, J. P. (ed). **The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions**. Plant Ecophysiology, vol 7. Springer, Dordrecht, 2008.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE- USDA. **Grain**: world markets and trades. United States: Usda, 2021. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2021.

WANG, B.; QIU, Y. L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. **Mycorrhiza**, Washington, v. 16, n. 5, p. 299-363, 2006.

WANG, W.; SHI, J.; XIE, Q.; JIANG, Y.; YU, N.; WANG, E. Nutrient exchange and regulation in arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Molecular Plant**, Oxford, v. 10, n. 9, p. 1147-1158, 2017.

CAPÍTULO 2: FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ADUBAÇÃO FOSFATADA BENEFICIAM O DESENVOLVIMENTO INICIAL E O ACÚMULO DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE MILHO

RESUMO

A simbiose de plantas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) resulta em maior exploração do solo e maior absorção de nutrientes. A absorção de fósforo (P), nutriente essencial para os vegetais, é dificultada devido à sua fixação nos solos, mas a simbiose com FMA é uma estratégia para superar essa limitação. Assim, o objetivo do trabalho foi verificar como a inoculação com FMA, a adubação fosfatada e a interação entre ambos afetam o desenvolvimento inicial de plantas de milho, o acúmulo de nutrientes na parte aérea e a colonização micorrízica das raízes. O experimento foi conduzido no município de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, em vasos, até as plantas atingirem o estágio fenológico V₈. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 5 x 4, com 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos pela combinação de 5 doses de P₂O₅ na semeadura (0; 25; 50; 75 e 100% do recomendado) com 4 doses de inoculante contendo *Rhizophagus intraradices* (0; 60; 120 e 180 g ha⁻¹). Foram avaliadas a altura de plantas, diâmetro de colmo, massa seca da parte aérea, massa seca de raiz, acúmulo de macro e micronutrientes na parte aérea e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares. A adubação fosfatada aumentou a massa seca da parte aérea e o acúmulo de todos os nutrientes (exceto zinco), mas reduziu a colonização radicular por FMA. A inoculação com *R. intraradices* incrementou a massa seca de parte aérea e houve interação com a adubação para altura de plantas, diâmetro do colmo e massa seca de raiz. A prática da inoculação de FMA demonstrou potencial para beneficiar o desenvolvimento de plantas de milho na fase inicial e melhorar o aproveitamento da adubação fosfatada, com resultados menos expressivos em solos com alta população nativa de FMA.

Palavras-chave: *Rhizophagus intraradices*. *Zea mays* L. Acúmulo de nutrientes. Fósforo. Inoculação.

2.1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial para o desenvolvimento dos vegetais, sendo componente estrutural e atuando em processos biológicos e metabólicos como transmissão de energia, síntese de membrana e nucleotídeos, fotossíntese e transdução de sinal (PLAXTON; LAMBERS, 2015). Porém, ele é fortemente fixado em minerais e matéria orgânica do solo, resultando em problemas de disponibilidade para as plantas, principalmente em solos ácidos altamente intemperizados de áreas tropicais (KOCHIAN *et al.*, 2004).

Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) ocorrem naturalmente nos solos e formam associações simbióticas com cerca de 90% das espécies vegetais (AHANGER *et al.*, 2014; RILLIG *et al.*, 2016; THIRKELL *et al.*, 2017). Suas hifas aumentam o volume de solo explorado pelas raízes das plantas, incrementando a absorção de nutrientes, levando à maior produção de fotoassimilados e acúmulo de biomassa (BOWLES *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2017; MITRA *et al.*, 2019).

A simbiose das plantas com FMA é uma estratégia adaptativa para a deficiência de P nos solos (SPATAFORA *et al.*, 2016), de modo que os fungos atuam como ponte entre o P e as raízes das plantas (COOKE, 1977). Os principais mecanismos de FMA que proporcionam maior absorção de P pelas plantas envolvem a maior exploração física do solo em função das suas hifas, que permitem a absorção para além da zona de depleção do nutriente (SMITH; READ, 2010), a absorção de P solúvel (WANG *et al.*, 2002), não lábil (MEDINA *et al.*, 2006; CARDOSO *et al.*, 2006) e orgânico (FENG *et al.*, 2003).

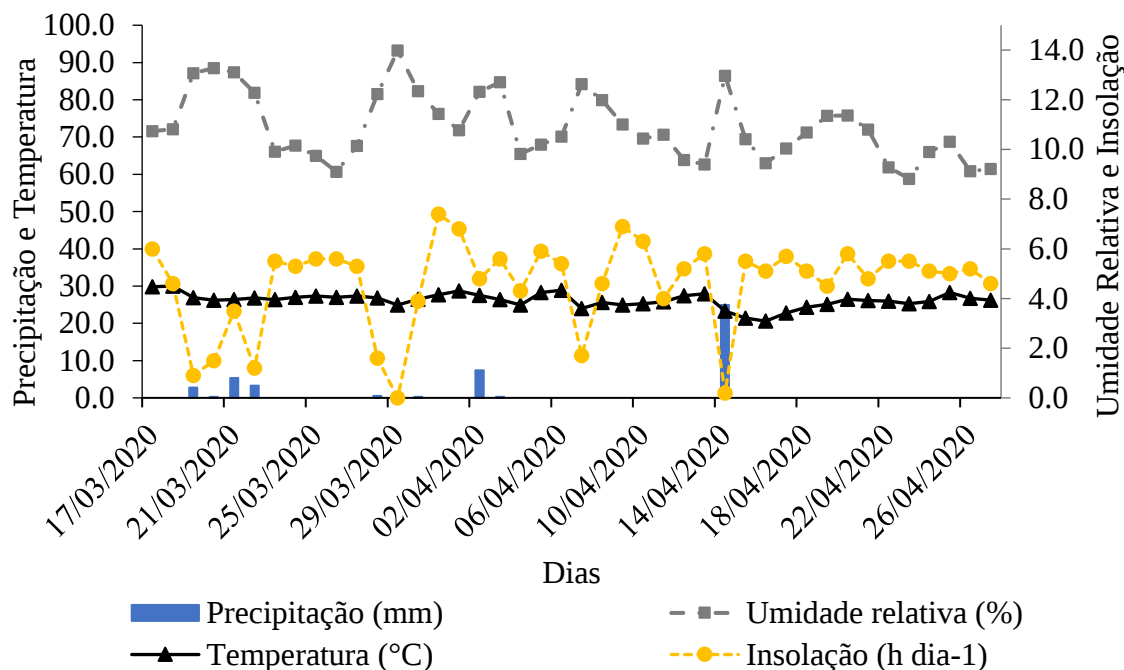
O milho (*Zea mays*) é uma das culturas de cereais mais importantes por ser usada na produção de etanol, ração para gado e outros produtos alimentares, incluindo amido e xarope (FOLEY, 2017). A cultura é bastante sensível à deficiência de P nas fases juvenis, após o esgotamento dos estoques internos (NADEEM *et al.*, 2011), sendo essencial seu fornecimento para atender à necessidade inicial das plantas. Até o estágio fenológico V₈, eventos significativos ocorrem, incluindo esgotamento das reservas da semente, desenvolvimento de raízes nodais (V₂), início do crescimento de todas as estruturas da planta e definição do número de fileiras por espiga que se estende até V₁₀ (CIAMPITTI; ELMORE; LAUER, 2016).

Desse modo, o trabalho teve como objetivo verificar como a inoculação com FMA, a adubação fosfatada e a interação entre ambos afetam o desenvolvimento vegetativo de plantas de milho, o acúmulo de nutrientes na parte aérea e a colonização micorrízica das raízes durante a fase inicial do desenvolvimento das plantas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em vasos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, localizada no município de Ilha Solteira - SP, Brasil. O local de desenvolvimento do experimento possuía monitoramento diário das condições climáticas de temperatura, umidade relativa do ar e insolação (Figura 1), além do controle da irrigação para as parcelas experimentais. O clima da região é do tipo Aw (classificação de Köppen), com precipitação média anual de 1322 mm e temperatura média anual de 23 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 1 - Dados climáticos de precipitação, temperatura média, insolação e umidade relativa do ar média referentes ao período de condução do experimento. Ilha Solteira/SP, 2020



Nota: dados obtidos no site clima.feis.unesp.br.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 4, com 4 repetições, sendo uma unidade experimental um vaso com 4 plantas. Os tratamentos foram constituídos pela combinação de 5 doses de P_2O_5 (0, 25, 50, 75 e 100% do recomendado para a cultura do milho de acordo com a fertilidade do solo, totalizando foram 0, 2, 4, 6 e 8 g vaso⁻¹ de P_2O_5) e 4 doses de inoculante contendo *R. intraradices* (0, 60, 120 e 180 g ha⁻¹). As sementes de milho (*Zea mays* L.) utilizadas foram de um híbrido simples experimental codificado (ainda não lançado no mercado) da empresa Bayer, que não foram tratadas quimicamente com fungicidas ou inseticidas. O fungo formador de micorrizas arbusculares utilizado foi *Rhizophagus intraradices* (SCHENCK; SMITH) Walker & Schüßler, em inoculante sólido para tratamento de sementes contendo 20.800 propágulos infectivos por grama.

Foram utilizados vasos de 8,5 L preenchidos com solo retirado de área agrícola em sistema plantio direto. O solo utilizado foi classificado como sendo do tipo Latossolo Vermelho Distrófico, de textura argilosa (SANTOS *et al.*, 2018a). Após a coleta e análise do solo na camada de 0,0-0,2 m, obteve-se os seguintes atributos químicos: 16 mg dm⁻³ de P (resina), 6 mg dm⁻³ de S-SO₄; 21 g dm⁻³ de matéria orgânica.; 5,2 de pH (CaCl₂); 1,8; 28,0; 18,0 e 31,0

mmol_c dm⁻³ de K, Ca, Mg e H+Al, respectivamente; 3,6; 21,0; 23,4 e 0,9 mg dm⁻³ de Cu, Fe, Mn e Zn (DTPA), respectivamente; 0,24 mg dm⁻³ de B (água quente) e 61% de saturação por bases. Para a determinação do número médio de esporos de FMA no solo, coletou-se uma amostra composta e realizou-se 5 mensurações seguindo a metodologia de Novais *et al.* (2017), obtendo-se a média de 630,80 esporos por 50 mL de solo.

Foram fornecidas 3,00 g vaso⁻¹ de N e 4,00 g vaso⁻¹ de K₂O, utilizando ureia e KCl como fontes, respectivamente. Para o cálculo da quantidade de fertilizantes a se adicionar, foi utilizado o número de plantas que seria deixado nos vasos (4 plantas por vaso) e as recomendações de 60.000 plantas ha⁻¹ para a cultura e de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, de acordo com a fertilidade do solo (RAIJ; CANTARELLA, 1997). Foram utilizados fertilizantes granulados que foram misturados ao solo dos vasos no dia da semeadura.

O tratamento das sementes com as doses do inoculante foi feito momentos antes da semeadura. As doses utilizadas do inoculante foram convertidas para a quantidade de inoculante por vaso considerando a população de plantas em campo e no vaso. Isso resultou em 0, 10, 20 e 30 mg vaso⁻¹. A inoculação foi feita utilizando-se solução de goma arábica 40% e aplicada na dose de 2 mL para cada 250 sementes (considerando a recomendação de 500 mL ha⁻¹ disponível em Mercante *et al.*, 1992). Os tratamentos com sementes sem inoculação também receberam a solução de goma arábica, mas sem a mistura de inoculante. Após a secagem das sementes, elas foram semeadas nos vasos previamente adubados no dia 17/03/2020. Foram adicionadas 10 sementes por vaso, em duas fileiras de 5 sementes. Na sequência, os vasos foram irrigados com 500 mL de água por vaso.

A emergência do milho se deu no dia 22/03/2020 e o desbaste das plantas foi realizado aos 10 dias após a emergência (DAE), sendo deixadas 4 plantas por vaso. Desse modo, as plantas foram conduzidas até atingirem o estágio V₈ (27/04/2020), aos 36 DAE, quando foram realizadas as coletas para análises e mensurações necessárias.

2.2.1 Avaliações realizadas

- a) **Altura média de plantas:** mensuração da distância do nível do solo à última folha totalmente expandida da planta em todas as 4 plantas de cada vaso com auxílio de régua graduada e posterior cálculo da altura média de cada parcela;

- b) **Diâmetro basal médio do colmo:** foi feita a mensuração com uso de paquímetro digital e tomando como base o segundo entrenó de cada uma das 4 plantas para cálculo do diâmetro médio de cada parcela;
- c) **Massa seca de raízes e parte aérea:** as plantas foram seccionadas rente ao solo e as raízes foram lavadas. A parte aérea e as raízes foram identificadas e secas a 65 °C em estufa com circulação de ar forçada até obtenção de peso constante. Após a secagem, determinou-se a massa seca de raízes e parte aérea;
- d) **Acúmulo de nutrientes na parte aérea:** após a pesagem da parte aérea, realizou-se a moagem da mesma em moinho tipo Wiley para determinação dos teores dos nutrientes. O teor de nitrogênio foi determinado pela digestão sulfúrica da amostra e posterior determinação pelo método de Kjeldahl. Em seguida, nova amostra foi dos tecidos vegetais foi submetida à digestão nitroperclórica e com isso foram determinados os teores de P e S em espectrofotômetro com comprimento de onda de 470 nm e de K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn em espectrofotometria de absorção atômica (metodologia de Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997). Após isso, calculou-se o acúmulo dos nutrientes multiplicando-se os teores pelos valores de massa seca da parte aérea (g planta^{-1}) e dividindo o resultado por 1.000;
- e) **Colonização de raízes por fungos micorrízicos arbusculares:** foram coletadas raízes finas das plantas de milho de cada parcela, que foram lavadas e armazenadas em recipientes contendo álcool 70%. Posteriormente, as amostras foram lavadas em água corrente, clarificadas em solução de KOH 10% ficando por 1 hora em banho maria (80°C). Em seguida, foram lavadas, acidificadas com HCl 0,2 M, colocadas em tubos de microcentrífuga com solução corante de azul de algodão em lactoglicerol e deixadas em banho maria por 5 minutos. Finalmente, com microscópio óptico (40x), foi determinada a porcentagem de segmentos colonizados (NOVAIS *et al.*, 2017).

2.2.2 Análise estatística

Os resultados foram submetidos ao Teste F da análise de variância (ANOVA) e, quando houve significância para o P ou a micorriza, isoladamente, foram realizados testes de regressão polinomial. Para isso, foi utilizado o software estatístico SISVAR[®] (FERREIRA, 2019). Quando houve significância na interação entre os fatores, foi realizado teste para ajuste de

superfície de resposta. Também foi realizada a análise de componentes principais e a correlação parcial de Pearson para complementar a interpretação dos resultados. As superfícies de resposta e a análise multivariada foram realizados no software estatístico RStudio®.

2.3 RESULTADOS

A altura de plantas foi influenciada pela interação entre os fatores adubação fosfatada e inoculação de FMA (Tabela 1), com ajuste de uma superfície de resposta (Figura 2 [A]), com $R^2=65\%$. A maior altura de plantas ocorreu na combinação da dose de 79,3% de P_2O_5 com a dose máxima de inoculante micorrízico, resultando em 45,7 cm de altura. Houve outra região de máximo encontrada, cujo ponto de maior altura resultou da combinação de 36,2% de P_2O_5 com 96,3 g ha⁻¹ de inoculante, resultando em 44,6 cm de altura.

Tabela 1 - Desenvolvimento vegetativo e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares em plantas de milho em V₈ em função da adubação fosfatada e inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	Altura planta (cm)	Diâmetro de Colmo (mm)	Massa seca parte aérea (g)	Massa seca de raiz ^a (g)	Colonização (%)
Fósforo (%)					
0,0	33,02	12,34	11,30 ¹	9,14	59,10 ³
25,0	40,57	15,81	21,36	11,19	56,03
50,0	42,46	16,35	22,48	10,99	43,96
75,0	42,34	16,98	22,99	10,43	42,20
100,0	37,98	17,62	21,93	10,10	36,22
Micorriza (g ha⁻¹)					
0,0	37,63	15,63	19,28 ²	10,97	48,56
60,0	39,27	15,77	19,25	9,74	48,52
120,0	40,87	15,95	20,88	10,79	44,43
180,0	39,34	15,92	20,65	9,99	48,51
ANOVA (p-valor)					
P	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,1226	<0,0001
M	0,3157	0,5390	0,0205	0,3398	0,5261
P x M	0,0004	0,0005	0,1346	0,0099	0,8734
Média Geral	39,28	15,82	20,01	10,37	47,50
CV (%)	13,72	4,92	10,35	10,10	22,25

Nota: ^adados transformados para ln (massasecaraiz), CV: coeficiente de variação (%).

¹y = -0,002612x²+0,352818x+12,168679 (R²=93,07%)

²y = 0,009545x+19,1542 (R²=72,27%)

³y = -0,238384x+59,42166 (R²=94,65%)

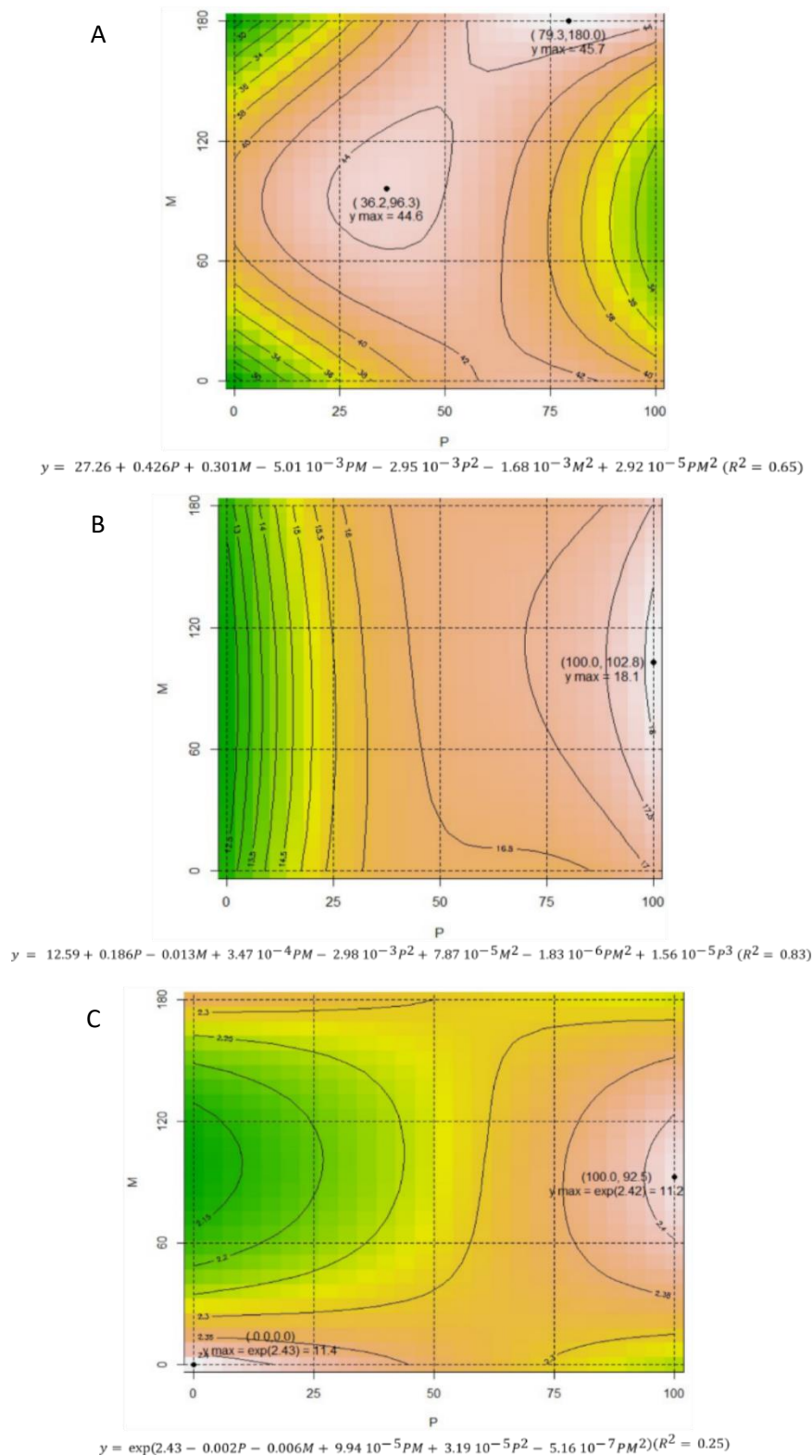
Fonte: Dados do próprio autor.

O diâmetro de colmo também apresentou efeito da interação entre os dois fatores, com ajuste de uma superfície de resposta (Figura 2 [B]) com R² = 83%, indicando que o maior diâmetro de colmo ocorreu na dose máxima de P₂O₅ combinada com 102,8 g ha⁻¹ do inoculante micorrízico. A massa seca de parte aérea foi influenciada pelos dois fatores isolados (Tabela 1), com ajuste de equação de regressão quadrática (R²=93,17%) para as doses de P₂O₅, com ponto de máximo na dose de 67,54% do recomendado. E ajuste de equação de regressão linear crescente (R²=72,27%) para as doses de FMA, indicando que a inoculação de FMA beneficia o desenvolvimento vegetativo inicial da cultura do milho, com incremento de 7,08% no presente trabalho.

Na massa seca de raiz também se verificou efeito da interação entre os dois fatores, com ajuste de uma superfície de resposta significativa (Figura 2 [C]) com R²=25%. Os maiores valores para essa variável ocorrem no ponto com ausência de P₂O₅ e de inoculação (massa seca

de 11,4 g). E também na combinação de 100% de P_2O_5 com 92,5 g ha^{-1} do inoculante (massa seca de 11,2 g). Na ausência de P_2O_5 , a inoculação tendeu a reduzir a massa seca de raiz. A colonização de raízes por FMA foi influenciada somente pela adubação fosfatada, com ajuste de uma equação de regressão linear decrescente ($R^2=94,65\%$) para as doses utilizadas, indicando que com aumento no fornecimento de P_2O_5 , há redução na colonização. Comparando a dose máxima (100% de P_2O_5) com a menor dose (0% de P_2O_5), houve queda de 38,71% na colonização das raízes.

Figura 2 - Altura de plantas [A], diâmetro do colmo [B] e massa seca de raiz [C] em função de doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho



Fonte: Dados do próprio autor.

A adubação fosfatada afetou o acúmulo da maior parte dos nutrientes, excetuando-se o Zn (Tabela 2 e Tabela 3). Exceto para o Mg, em que houve ajuste de uma equação de regressão quadrática, em todos os outros casos houve ajuste de equações de regressão lineares e crescentes, com R^2 variando entre 71,16% (Ca) e 99,10% (Mn). O incremento na adubação fosfatada proporcionou incrementos de 187%, 292%, 111%, 118% e 277% para os macronutrientes N, P, K, Ca e S, respectivamente. Para os micronutrientes Cu, Fe e Mn, o incremento no acúmulo foi de 174%, 124% e 243%, respectivamente. Para o acúmulo de Mg, houve ajuste de uma equação de regressão quadrática para as doses de P_2O_5 ($R^2=84,26\%$), com ponto de máximo na dose de 56,39% do recomendado.

Tabela 2 - Acúmulo de macronutrientes (nitrogênio – N, fósforo – P, potássio – K, cálcio – Ca, magnésio – Mg e enxofre – S) na parte aérea de plantas de milho em V_8 em função da adubação fosfatada e inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	N	P	K	Ca	Mg	S
Fósforo (%)	----- g planta ⁻¹ -----					
0,0	0,1903 ¹	0,0328 ²	0,2963 ³	0,0157 ⁴	0,0362 ⁶	0,0122 ⁷
25,0	0,3272	0,0647	0,4824	0,0268	0,0658	0,0277
50,0	0,3964	0,0897	0,5666	0,0288	0,0692	0,0346
75,0	0,4490	0,1090	0,5356	0,0258	0,0611	0,0403
100,0	0,5473	0,1286	0,6249	0,0343	0,0591	0,0460
Micorriza (g ha ⁻¹)						
0,0	0,3886	0,0809	0,5085	0,0242 ⁵	0,0557	0,0310
60,0	0,3621	0,0866	0,4619	0,0238	0,0554	0,0340
120,0	0,3830	0,0875	0,5453	0,0306	0,0654	0,0323
180,0	0,3945	0,0848	0,4888	0,0265	0,0565	0,0313
ANOVA (p-valor)						
P	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
M	0,0690	0,5692	0,1717	0,0122	0,0507	0,4435
P x M	0,3675	0,8719	0,4539	0,0833	0,2475	0,8621
Média Geral	0,3820	0,0850	0,5012	0,0263	0,0583	0,0322
CV (%)	8,93	16,21	20,46	22,35	18,92	16,63

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

¹ $y = 0,0033x + 0,2149$ ($R^2=97,34\%$)

² $y = 0,000943x + 0,03808$ ($R^2=98,75\%$)

³ $y = 0,002842x + 0,359048$ ($R^2=79,99\%$)

⁴ $y = 0,000144x + 0,019060$ ($R^2=71,16\%$)

⁵ Sem ajuste

⁶ $y = -0,000009x^2 + 0,001015x + 0,039440$ ($R^2=84,26\%$)

⁷ $y = 0,000321x + 0,016147$ ($R^2=94,24\%$)

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 3 - Acúmulo de micronutrientes (cobre – Cu, ferro – Fe; manganês – Mn e zinco – Zn) na parte aérea de plantas de milho em V₈ em função da adubação fosfatada e inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	Cu	Fe	Mn	Zn
Fósforo (%)	----- mg planta ⁻¹ -----			
0,0	0,0501 ⁸	2,0993 ¹⁰	0,8664 ¹²	0,4624
25,0	0,1039	3,5165	1,4486	0,4366
50,0	0,1209	3,5776	1,8032	0,4637
75,0	0,1225	4,0303	2,3116	0,4004
100,0	0,1375	4,6999	2,9724	0,5050
Micorriza (g ha ⁻¹)				
0,0	0,1474 ⁹	2,7064 ¹¹	1,8574	0,4187
60,0	0,0929	4,9555	1,8199	0,4599
120,0	0,0828	3,1218	1,8153	0,4228
180,0	0,1049	3,5551	2,0292	0,5131
ANOVA (p-valor)				
P	0,0004	0,0449	<0,0001	0,6227
M	0,0026	0,0237	0,1556	0,3751
P x M	0,9259	0,6789	0,8377	0,4457
Média Geral	0,1069	3,5847	1,8805	0,4536
CV (%)	43,18	56,2	15,31	36,18

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

⁸ $y = 0,000773x + 0,068317$ ($R^2=81,12\%$)

⁹ $y = 0,000005x^2 - 0,001187x + 0,146785$ ($R^2=99,69\%$)

¹⁰ $y = 0,022859x + 2,441757$ ($R^2=89,40\%$)

¹¹ Sem ajuste

¹² $y = 0,020299x + 0,865480$ ($R^2=99,10\%$)

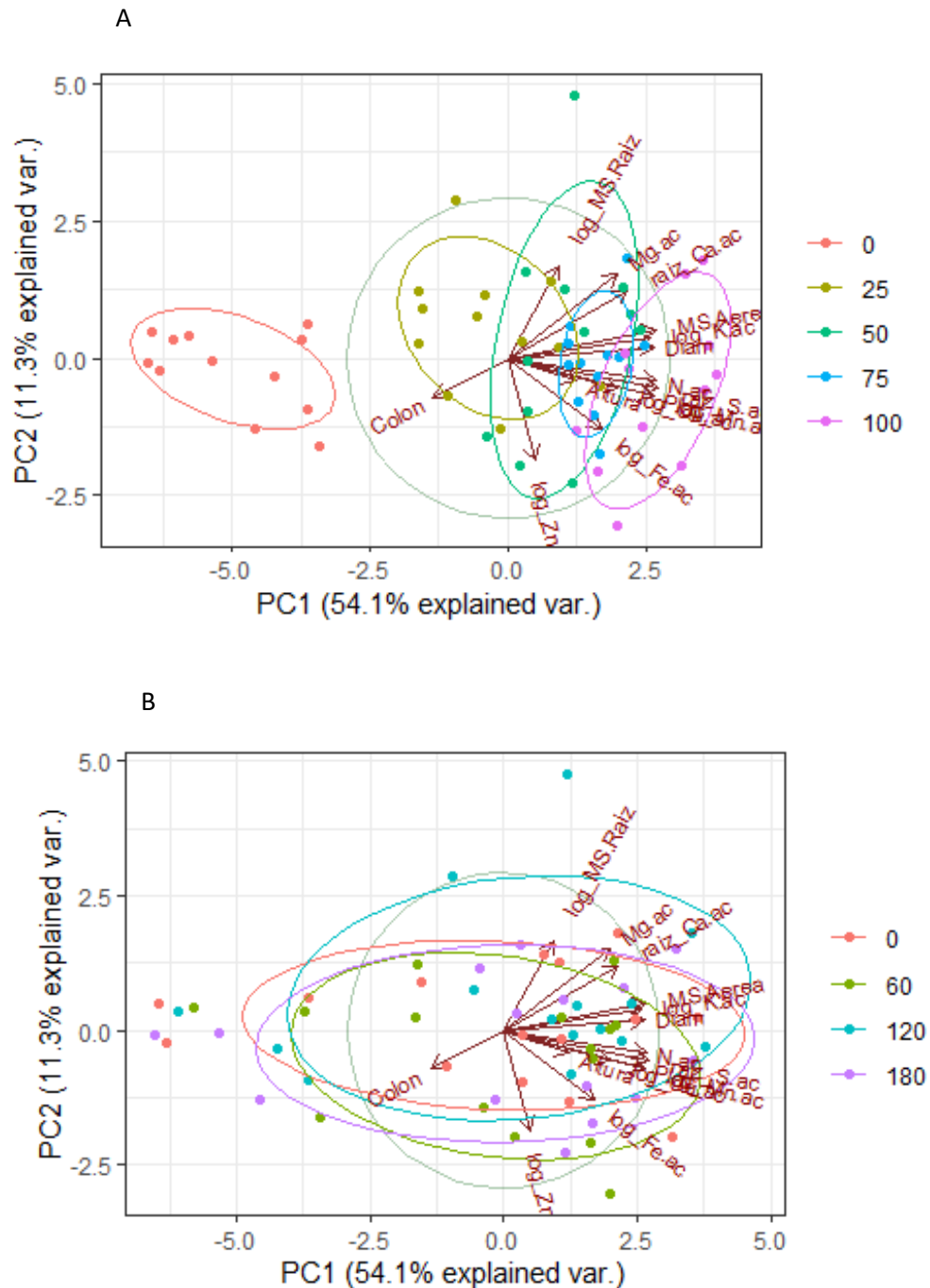
Fonte: Dados do próprio autor.

O fator inoculação proporcionou alterações significativas no acúmulo de Ca, Cu e Fe. Para o Ca e o Fe não houve ajuste de equações de regressão com significado biológico. Por outro lado, para o acúmulo de Cu, houve ajuste de uma equação de regressão quadrática ($R^2=94,69\%$), com ponto de máximo na dose de 118,7 g ha⁻¹.

A análise de componentes principais foi feita agrupando-se os tratamentos da adubação fosfatada (Figura 3 [A]) e da inoculação micorrízica (Figura 3 [B]). É possível observar que para o P, há uma progressão das doses utilizadas, de modo que somente a colonização radicular se mostra positivamente influenciada pela ausência de P ou pela dose de 25% do recomendado, as outras variáveis se mostram todas beneficiadas com o aumento das doses de P₂O₅ aplicadas, corroborando o comportamento observado pela ANAVA e pelas equações de regressão

ajustadas. Para o fator inoculação com FMA, observa-se que não houve comportamento definido das variáveis em função das doses de inoculante utilizadas.

Figura 3 - Análise de componentes principais (PCA) para as variáveis relacionadas à adubação fosfatada e inoculação micorrízica em milho e agrupamento em função das doses de P_2O_5 aplicadas no solo [A] e doses do inoculante micorrízico na semente de milho [B]

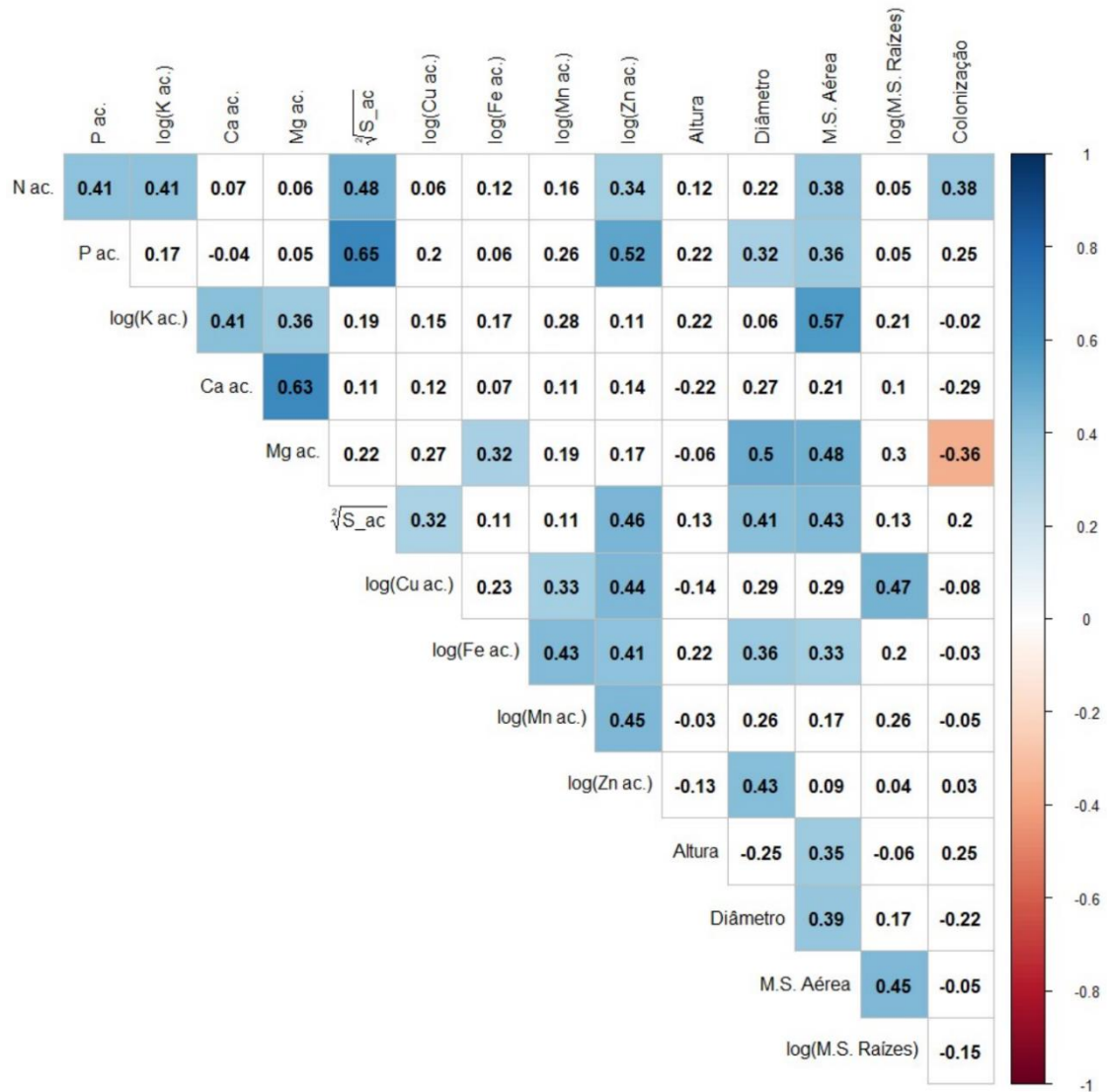


Nota: Log indica a transformação dos dados para o logaritmo neperiano dos valores originais.

Fonte: Dados do próprio autor.

A análise de correlação parcial de Pearson (Figura 4) indica que houve correlação significativa positiva entre o N e o P acumulados, além do N acumulado com a massa seca da parte aérea e a colonização das raízes, explicando a similaridade dos efeitos obtidos para N, P e massa seca da parte aérea em função da adubação fosfatada. O P acumulado se correlacionou positivamente com o diâmetro do colmo e a massa seca da parte aérea, indicando que uma boa nutrição com o P tem relação com um melhor desenvolvimento vegetativo das plantas. Houve correlação positiva entre a massa seca da parte aérea e a massa seca da raiz, indicando que o maior desenvolvimento vegetativo da parte aérea depende do desenvolvimento da raiz.

Figura 4 - Correlação Parcial de Pearson entre os acúmulos de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn), a altura de plantas, diâmetro de colmo, massa seca da parte aérea, massa seca de raiz e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares após doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho



Nota: As correlações significativas estão coloridas de acordo com o valor de R^2 encontrado. Log: dados transformados para logaritmo neperiano dos valores originais da variável.

Fonte: Dados do próprio autor.

2.4 DISCUSSÃO

O uso de FMA pode incrementar o crescimento vegetal, com potencial para reduzir a necessidade de P a ser aplicado ou maximizar o aproveitamento dos fertilizantes fosfatados, conforme demonstrado no presente trabalho e relatado pela literatura (BLEVINS, 1999; CHIU; PASZKOWSKI, 2019). Mas os efeitos dessa interação nem sempre são verificados, como

observado no diâmetro do colmo, que somente houve variações em função das doses de P_2O_5 , apesar da interação entre os fatores. Isso porque os efeitos da inoculação micorrízica dependem de diversos fatores, incluindo o genótipo da planta e do fungo e das condições externas, como fertilidade do solo, disponibilidade de água, população nativa de FMA, entre outros (SMITH; READ, 2010; LANFRANCO *et al.*, 2018).

Para massa seca de raiz, observou-se que o fornecimento de P_2O_5 é indispensável, afinal o P é essencial para o metabolismo energético (compõe a molécula de ATP, atua na fotossíntese e respiração), para o crescimento e divisão das células e compondo moléculas de açúcares, fosfolipídios de membranas e coenzimas (TAIZ *et al.*, 2017). Mas os FMA também contribuíram aumentando as raízes, o que se deve aos efeitos da simbiose nas plantas promovendo maior exploração do solo e absorção de água e nutrientes (SMITH; READ, 2010; PELLEGRINO *et al.*, 2015), bem como produzindo substâncias que estimulam o desenvolvimento das raízes (BERTA *et al.*, 2002; OLÁH *et al.*, 2005; ALLAH *et al.* 2015). A interação entre os dois fatores decorre do fato de que a inoculação com FMA pode promover maior desenvolvimento de plantas e auxiliar no aproveitamento do P_2O_5 aplicado (SMITH *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2018; CAMPOS *et al.*, 2018).

É importante ressaltar que promover o maior desenvolvimento das raízes é essencial para as culturas agrícolas, por garantir melhor nutrição e desenvolvimento das plantas, maior produtividade, maior tolerância a estresses hídricos, maior estabilidade de produção (COMAS *et al.*, 2013; BARNAWAL *et al.*, 2017; FUKAMI *et al.*, 2018). A literatura já demonstrou que a adubação fosfatada é essencial nesse sentido (HANSEL, 2013), mas a inoculação com FMA também demonstra potencial para contribuir nesse aspecto, tendo em vista os benefícios evidenciados no presente trabalho e relatados na literatura (SMITH; READ, 2010; BRITO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018b; RAMÍREZ-FLORES *et al.*, 2019).

A massa seca da parte aérea foi beneficiada com o aumento no fornecimento de P_2O_5 , mas é importante ressaltar que o momento de maior demanda por P na planta de milho se dá entre os estádios V_8 - R_2 (ROSA, 2017), a depender do híbrido considerado. A maior demanda desse nutriente pelo milho ocorre no fim de sua fase vegetativa e início da fase reprodutiva. O efeito positivo da inoculação na massa seca de planta decorre da simbiose que propicia melhor desenvolvimento vegetal ao possibilitar maior volume de solo explorado, maior absorção de água e nutrientes para as plantas e ainda a promoção do crescimento das raízes e da própria parte aérea com a produção de substâncias que estimulam o desenvolvimento vegetal (SMITH; READ, 2010; ALLAH *et al.*, 2015; CHIU; PASZKOWSKI, 2019; RAMÍREZ-FLORES *et al.*, 2019).

A colonização de raízes não foi afetada pela inoculação e isso pode ser devido à presença de grande quantidade de esporos de FMA nativos no solo utilizado, cuja média foi de 630,80 esporos por 50 mL de solo. Isso porque se trata de solo oriundo de área agrícola com práticas de manejo que beneficiam a comunidade nativa de FMA, incluindo o manejo adequado da fertilidade, o sistema plantio direto e o cultivo de plantas de cobertura (CARRENHO *et al.*, 2010; CAMERON, 2016). A adubação fosfatada, por outro lado, prejudicou a colonização das raízes, pois a simbiose é regulada pelas condições ambientais, principalmente a disponibilidade de P (BRANSCHIED *et al.*, 2010; BALZERGUE *et al.*, 2011; KOBAE *et al.*, 2016). Em condições ambientais ótimas há redução na simbiose, pois as plantas conseguem obter os recursos do ambiente por conta própria, sem o custo energético que teriam para manter a simbiose (KIERS *et al.*, 2011; NOURI *et al.*, 2014).

O acúmulo de nutrientes foi beneficiado pela adubação fosfatada porque o P promove maior desenvolvimento radicular e, com isso, maior exploração do solo e maior absorção de nutrientes pelas plantas, além de ser essencial nos processos de assimilação que demandam energia, como no caso do N (LIMA *et al.*, 2011). A inoculação de *R. intradices* proporcionou incrementos no acúmulo de Ca, Fe e Cu e isso é resultado do maior desenvolvimento de raízes e absorção de nutrientes pelas hifas dos FMA que funcionam como extensão das raízes, resultando em maior exploração do solo. Os efeitos de maior absorção de nutrientes proporcionados pela adubação fosfatada e pela inoculação micorrízica estão correlacionados com os efeitos observados para o desenvolvimento vegetativo (massa seca de parte aérea e raiz, principalmente), pois uma planta com sistema radicular maior é capaz de absorver mais nutrientes (DOBBELAERE *et al.*, 2001; BASHAN *et al.*, 2004).

Apesar de geralmente a simbiose beneficiar a absorção de nutrientes pelas plantas e o aumento na absorção de P ser uma das características principais da simbiose planta-FMA, no presente estudo isso não foi observado. O resultado é justificado pela fertilidade do solo, pois com a disponibilidade de nutrientes sendo suficientes, não houve contribuição extra da simbiose para a maioria deles. Além disso, dada a elevada quantidade de esporos de FMA nativos no solo, houve alta colonização radicular independente da inoculação, o que não permitiu que os efeitos da inoculação se sobressaíssem em todos os nutrientes analisados.

De acordo com o verificado, os benefícios da adubação fosfatada e da inoculação micorrízica começam a ocorrer nas plantas de milho já no início do desenvolvimento das mesmas e devido aos eventos que ocorrem até o estágio fenológico V₈ (CIAMPITTI, ELMORE; LAUER, 2016), isso refletirá no desenvolvimento das plantas até o final do ciclo, podendo contribuir com maior produtividade, qualidade e estabilidade da produção.

2.5 CONCLUSÃO

A inoculação de *Rhizophagus intraradices* beneficiou o desenvolvimento inicial das plantas de milho e o acúmulo de alguns nutrientes na parte aérea, ao mesmo tempo que mostrou potencial para proporcionar melhor aproveitamento da adubação fosfatada. Desse modo, é uma prática promissora para incrementar o desenvolvimento e a produtividade do milho em áreas agrícolas. Mas em condições ambientais adequadas para as plantas e em sistemas agrícolas que beneficiam a comunidade de FMA nativos, a inoculação micorrízica resulta em benefícios menos expressivos.

REFERÊNCIAS

- AHANGER, M. A.; TYAGI, S. R.; WANI, M. R.; AHMAD, P. Drought tolerance: role of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. *In*: AHMAD, P.; WANI, M. R. (ed.). **Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment**. New York: Springer, 2014. V. 1. p. 25–55.
- ALLAH, M. M. S. A.; EL-BASSIOUNY, H. M. S.; BAKRY, B. A.; SADAK, M. S. Effect of arbuscular mycorrhiza and glutamic acid on growth, yield, some chemical composition and nutritional quality of wheat plant grown in newly reclaimed sandy soil. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical**, New York, v. 6, n. 3, p. 1038–1054, 2015.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; PAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, 711-728, 2013.
- BALZERGUE, C.; PUECH-PAGÈS, V.; BÉCARD, G.; ROCHANGE, S. F. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 3, p. 1049-1060, 2011.
- BARNAWAL, D.; BHARTI, N.; PANDEY, S. S.; PANDEY, A.; CHANOTIYA, C. S.; KALRA, A. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 161, p. 502–514, 2017.
- BASHAN, Y.; HOLGUIN, G.; DE-BASHAN, L. E. *Azospirillum*-plant relations physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 50, p. 521-577, 2004.
- BERTA, G.; FUSCONI, A.; HOOKER, J. E. Arbuscular mycorrhizal modifications to plant root systems: scale, mechanisms and consequences. *In*: BAREA, J. M.; HASELWANDTER, k.; SCHUEPP, H.; GIANINAZZI, S. (ed.). **Mycorrhizal technology in agriculture**. Basel: Birkhäuser, 2002. p. 71-85.
- BLEVINS, D. G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 4-5, 1999.
- BOWLES, T. M.; BARRIOS-MASIAS, F. H.; CARLISLE, E. A.; CAVAGNARO, T. R.; JACKSON, L. E. Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 566, p. 1223–1234, 2016.
- BRANSCHIED, A.; SIEH, D.; PANT, B. D.; MAY, P.; DEVERS, E. A.; ELKROG, A.; SCHAUER, L.; SCHEIBLE, W. R.; KRAJINSKI, F. Expression pattern suggests a role of MiR399 in the regulation of the cellular response to local Pi increase during arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, Saint Paul, v. 23, n. 7, p. 915-926, 2010.

BRITO, V. N.; TELLECHEA, F. R. F.; HEITOR, L. C.; FREITAS, M. S. M.; MARTINS, M. A. Fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada na produção de mudas de paricá. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 485-497, 2017.

CAMERON, J. **Effects of seed applied fungicide on arbuscular mycorrhizal colonization of south dakota cultivars of oat, soybean, and corn**. 2016. Thesis. (Master Science) – South Dakota University, Dakota, 2016. Disponível em: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/1059>. Acesso em: 27 abr. 2021.

CAMPOS, P.; BORIE, F.; CORNEJO, P.; LÓPEZ-RÁEZ, J. A.; LÓPEZ-GARCÍA, Á.; SEGUEL, A. Phosphorus acquisition efficiency related to root traits: is mycorrhizal symbiosis a key factor to wheat and barley cropping? **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 9, p. 752, 2018.

CARDOSO, I. M.; BODDINGTON, C.; JANSSEN, B. H.; OENEMA, O.; KUYPER, T. W. Differential access to phosphorus pools of an Oxisol by mycorrhizal and non-mycorrhizal maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 1–15, 2006.

CARRENHO, R.; GOMES-DA-COSTA, S. M.; BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A. Fungos micorrízicos arbusculares em agroecossistemas brasileiros. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (ed.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Ed. UFLA, 2010. p. 215 – 249.

CHEN, S.; ZHAO, H.; ZOU, C., LI, Y.; CHEN, Y.; WANG, Z. *et al.* Combined Inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 8, p. 25–16, 2017.

CHIU, C. H.; PASZKOWSKI, U. Mechanisms and impact of symbiotic phosphate acquisition. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, New York, v. 11, n. 6, p. a034603, 2019.

CIAMPITTI, I. A.; ELMORE, R.; LAUER, J. **Corn growth and development chart** (poster). 2016.

COMAS, L. H.; BECKER, S. R.; CRUZ, V. M.; BYRNE, P. F.; DIERIG, D. A. Root traits contributing to plant productivity under drought. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 442, 2013.

COOKE, R. **The biology of symbiotic fungi**. New York: John Wiley and Sons, 1977.

DOBBELAERE, S.; CROONRNBOGHES, A.; THYS, A.; PTACEK, D.; VANDERLEYDEN, J.; DUTTO, P.; LABANDERA-GONZALEZ, C.; CABALLERO-MELLADO, J.; AGUIRRE, J. F.; KAPULNIK, Y.; BRENER, S.; BURDMAN, S.; KADOURI, D.; SARIG, S.; OKON, Y. Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 28, p. 871-879, 2001.

FENG, G.; SONG, Y. C.; LI, X. L.; CHRISTIE, P. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to utilization of organic sources of phosphorus by red clover in a calcareous soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 22, p. 139–148, 2003.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FOLEY, J. **It's time to rethink America's corn system**. Scientific American, 2017. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/time-to-rethink-corn/>. Acesso em: 27 abr. 2021.

FUKAMI, J.; CEREZIN, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, Heidelberg, v. 8, 73, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189968/1/Fukami-73.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2021.

HANSEL, F. D. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KIERS, E. T.; DUHAMEL, M.; BEESETTY, Y.; MENSAH, J. A.; FRANKEN, O.; VERBRUGGEN, E.; FELLBAUM, C. R.; KOWALCHUK, G. A.; HART, M. M.; BAGO, A.; PALMER, T. M.; WEST, S. A.; VANDENKOORNHUYSE, P.; JANS, J.; BÜCKING, H. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. **Science**, Washington, v. 333, n. 6044, p. 880-882, 2011.

KOBAYASHI, Y.; OHMORI, Y.; SAITO, C.; YANO, K.; OHTOMO, R.; FUJIWARA, T. Phosphate treatment strongly inhibits new arbuscule development but not the maintenance of arbuscule in mycorrhizal rice roots. **Plant Physiology**, Washington, v. 171, n. 1, p. 566-579, 2016.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PINEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 459–493, 2004.

LANFRANCO, L.; FIORILLI, V.; GUTJAHR, C. Partner communication and role of nutrients in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **New Phytologist**, Cambridge, v. 220, n. 4, p. 1031-1046, 2018.

LIMA, R. D. L. S. D.; SEVERINO, L. S.; GHEYI, H. R.; SOFIATTI, V.; ARRIEL, N. H. C. Efeito da adubação fosfatada sobre o crescimento e teor de macronutrientes de mudas de pinhão manso. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 950-956, 2011.

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

MEDINA, A.; VASSILEV, N.; BAREA, J. M.; AZCON, R. The growth-enhancement of clover by *Aspergillus*-treated sugar beet waste and *Glomus mosseae* inoculation in Zn contaminated soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 33, p. 87–98, 2006.

MERCANTE, F. M.; STRALIOTTO, R.; DUQUE, F. F.; FRANCO, A. A. **A inoculação do feijoeiro comum com rizóbio**. Brasília, DF: Embrapa-CNPBS, 1992.

MITRA, D.; NAVENDRA, U.; PANNEERSELVAM, U. ANSUMAN, S.; GANESHAMURTHY, A. N.; DIVYA, J. Role of mycorrhiza and its associated bacteria on plant growth promotion and nutrient management in sustainable agriculture. **International Journal Life Science Applied Science**, Bihar, v. 1, p. 1–10, 2019.

NADEEM, M.; MOLLIER, A.; MOREL, C.; VIVES, A.; PRUD'HOMME, L.; PELLERIN, S. Relative contribution of seed phosphorus reserves and exogenous phosphorus uptake to maize (*Zea mays* L.) nutrition during early growth stages. **Plant Soil**, The Hague, v. 346, p. 231–244, 2011.

NOURI, E.; BREUILLIN-SESSOMS, F.; FELLER, U.; REINHARDT, D. Phosphorus and nitrogen regulate arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Petunia hybrida*. **PloS One**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. e90841, 2014.

NOVAIS, C. B.; BORGES, W. L.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SBRANA, C.; GIOVANNETTI, M.; SIQUEIRA, J. O. **Técnicas básicas em micorrizas arbusculares**. Lavras: Ed. da UFLA, 2017.

OLÁH, B.; BRIÈRE, C.; BÉCARD, G.; DÉNARIÉ, J.; GOUGH, C. Nod factors and a diffusible factor from arbuscular mycorrhizal fungi stimulate lateral root formation in *Medicago truncatula* via the DMI1/DMI2 signalling pathway. **The Plant Journal**, West Sussex, v. 44, n. 2, p. 195-207, 2005.

PELLEGRINO, E.; ÖPIK, M.; BONARI, E.; ERCOLI, L. Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of field studies from 1975 to 2013. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 84, p. 210-217, 2015.

PLAXTON, W. C.; LAMBERS, H. Phosphorus metabolism in plants. **Annual Plant Review**, Palo Alto, v. 48, p. 3–15, 2015.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A., FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 43-73.

RAMÍREZ-FLORES, M. R.; BELLO, E. B.; RELLÁN-ÁLVAREZ, R.; SAWERS, R. J.; PORTUGAL, V. O. Inoculation with the mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* modulates the relationship between root growth and nutrient content in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.). **Plant Direct**, New York, v. 3, n. 12, p. e00192, 2019.

RILLIG, M. C.; SOSA-HERNÁNDEZ MA, ROY J, AGUILAR-TRIGUEROS CA, VÁLYI K, AND LEHMANN, A. Towards an integrated mycorrhizal technology: harnessing mycorrhiza for sustainable intensification in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, p. 1625, 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5081377/pdf/fpls-07-01625.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2021.

ROSA, P. A. L. **Acúmulo de matéria seca, extração e exportação de nutrientes por híbridos de milho inoculados com *Azospirillum brasilense***. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017. Disponível em:

https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/150131/rosa_pal_me_ilha.pdf;jsessionid=662820ADD70A19420F7064D19F37976D?sequence=3. Acesso em: 01 mar. 2021.

SANTOS H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C. F.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 356 p.

SANTOS, J. K. S.; SANTANA, M. D. F.; LARA, T. S. Responsividade de plantas de milho à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares da rizosfera de ipê amarelo. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 10, n. 1, p. 253-264, 2018b.

SILVA, G. A. E.; SIQUEIRA, J. O.; STÜRMER, S. L.; MOREIRA, F. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal isolates from the land uses of Amazon Region in symbiosis with cowpea. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p. 357-371, 2018.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. New York: Academic Press, 2010. 800 p.

SMITH, S. E.; JAKOBSEN, I.; GRØNLUND, M.; SMITH, F. A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. **Plant Physiology**, Washington, v. 156, n. 3, p. 1050-1057, 2011.

SPATAFORA, J. W.; CHANG, Y.; BENNY, G. L.; LAZARUS, K.; SMITH, M. E.; BERBEE, M. L.; JAMES, T. Y. A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. **Mycologia**, New York, v. 108, n. 5, p. 1028-1046, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THIRKELL, T. J.; CHARTERS, M. D.; ELLIOTT, A. J.; SAIT, S. M.; FIELD, K. J. Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 105, n. 4, p. 921-929, 2017.

WANG, B.; FUNAKOSHI, D. M.; DALPE, Y.; HAMEL, C. Phosphorus 32 absorption and translocation to host plants by arbuscular mycorrhizal fungi at low root-zone temperature. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v. 12, p. 93-96, 2002.

CAPÍTULO 3: MICORRIZAS PROMOVEM CRESCIMENTO E MAIOR EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO?

RESUMO

É essencial que tecnologias sustentáveis sejam estudadas e adotadas na agricultura para melhor aproveitamento dos recursos naturais. As plantas necessitam de fósforo (P) para se desenvolverem e atingirem altas produtividades, mas a baixa disponibilidade deste nutriente nos solos e a baixa eficiência da adubação fosfatada exige que doses altas de P_2O_5 sejam aplicadas. Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) se associam em simbiose com os vegetais, promovendo maior crescimento das culturas e absorção de P do solo antes indisponível às raízes. O objetivo do trabalho foi avaliar os benefícios da inoculação com *Rhizophagus intraradices* associadas às doses de fósforo no desenvolvimento das plantas e no aumento da eficiência da adubação fosfatada na cultura do milho segunda safra irrigado por aspersão. O experimento foi desenvolvido no município de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, na segunda safra de 2019 e de 2020 em Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, cujas parcelas foram constituídas pelas doses de P_2O_5 na semeadura da cultura (0; 25; 50; 75 e 100% do recomendado para a cultura na área) e as subparcelas compostas por doses do inoculante contendo *Rhizophagus intraradices* (0; 60; 120 e 180 g ha⁻¹), com inoculação das sementes. Foram realizadas avaliações dos componentes de produção e produtividade, índice de clorofila foliar, porcentagem de colonização micorrízica nas raízes, contagem de esporos de FMA no solo e atividade da fosfatase ácida. Em 2019 a adubação fosfatada beneficiou o desenvolvimento vegetativo das plantas e a inoculação incrementou o diâmetro de espigas e número de grãos por fileira, porém não houve efeito dos tratamentos para a colonização radicular e para a produtividade da cultura. Em 2020 não houve efeito dos fatores sobre as variáveis analisadas. A inoculação com FMA é promissora para a agricultura, mas as particularidades dessa simbiose precisam ser melhor entendidas.

Palavras chave: *Zea mays* L. *Rhizophagus intraradices*. Doses de fósforo. Inoculação. Fungo micorrízico arbuscular.

3.1 INTRODUÇÃO

Considera-se o milho como o cereal de interesse agrícola mais importante em todo o mundo, dada sua relevância para a alimentação animal e humana e para processamento industrial (DUARTE *et al.*, 2011). Em 2019, foram cultivados 197,20 milhões de hectares com a cultura, resultando na produção de 1,15 bilhões de toneladas do grão. Isso representa 27,23% da área mundial cultivada com cereais e 38,55% da quantidade de grãos de cereais produzidas no mundo no mesmo ano (FAOSTAT, 2019).

A exigência do milho em fósforo (P) é pequena quando comparada à de nitrogênio (N) e potássio (K), mas as doses aplicadas no Brasil são bastante altas, devido ao baixo aproveitamento do P pelas raízes (COELHO *et al.*, 2002). Isso é consequência da adsorção do P aos oxihidróxidos de ferro e alumínio do solo, tornando-o indisponível para a absorção pelas raízes (RAIJ, 1991; BLEVINS, 1999; CORRÊA *et al.*, 2008).

O reino vegetal desenvolveu diversas estratégias para acessar o P fixado no solo e a simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) é uma delas. Esses fungos colonizam as raízes das plantas e desenvolvem hifas que se difundem no solo, aumentando o volume de solo explorado pela planta e a absorção de água e nutrientes, principalmente de P (BLEVINS, 1999; SMITH; READ, 2010; CHIU; PASZKOWSKI, 2019).

No entanto, sabe-se que as concentrações excessivas de P no solo podem inibir o estabelecimento micorrízico e a colonização das raízes por FMA (SMITH; READ, 2010; BREUILLIN *et al.*, 2010; MERCY *et al.*, 2017), podendo levar a uma diminuição na resposta de crescimento micorrízico (SMITH; SMITH, 2011). Por esse motivo, para se obter o máximo ganho com a adubação fosfatada e inoculação de micorrizas, as doses de ambos os componentes precisam ser ajustadas para cada tipo de solo e cultura.

Assim, o objetivo do trabalho foi verificar se a inoculação com o fungo *Rhizophagus intraradices* na cultura do milho segunda safra promove melhor desenvolvimento e maior produtividade da cultura e se é capaz de aumentar a eficiência da adubação fosfatada realizada.

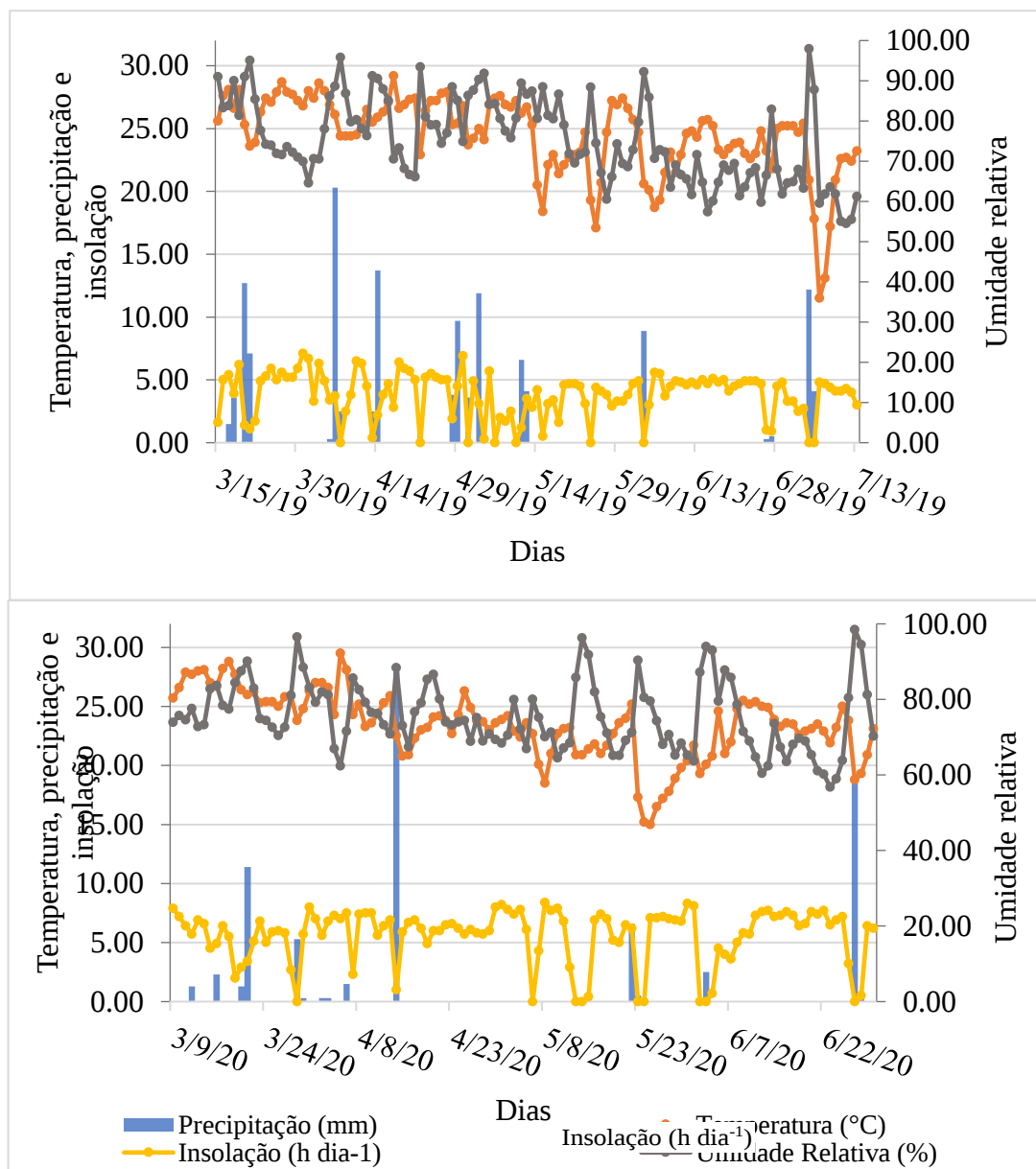
3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização do experimento

A pesquisa foi realizada nos anos de 2019 e 2020 em área experimental situada no município de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil (51° 24' 11,34" de longitude oeste e 20° 20' 35,32" de latitude sul), com altitude média de 358 m e anteriormente ocupada por vegetação de Cerrado. Foram utilizadas áreas diferentes nos dois anos de cultivo, mas com mesmas características e manejo, incluindo sistema plantio direto em fase de implantação. Ambas pertencentes à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da FEIS/UNESP, distantes cerca de 800 metros entre si. Nos dois anos, havia milheto (*Pennisetum glaucum*) na área cultivado como planta de cobertura anteriormente ao milho.

O clima da região é do tipo Aw (classificação de Köppen) e apresenta precipitação pluvial média anual de 1322 mm e temperatura média anual de 23°C (ALVARES *et al.*, 2013) e as informações de temperatura média, precipitação pluvial, umidade relativa do ar e insolação durante o experimento são descritas na Figura 5.

Figura 5 - Dados climáticos de precipitação (mm), temperatura média (°C), insolação (h dia⁻¹) e umidade relativa do ar média (%) referentes ao período de condução do experimento. Selvíria/MS, 2019 e 2020



Nota: Dados disponíveis em clima.feis.unesp.br

Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo das áreas é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, argiloso (SANTOS *et al.*, 2018a). Foi realizada coleta e análise da fertilidade do solo na camada de 0,00-0,20 m (RAIJ *et al.*, 2001) para as áreas dos dois anos de experimento (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise química do solo na camada de 0,00-0,20 m das áreas experimentais. Selvíria/MS, 2019 e 2020

Ano/Resultados	S-SO ₄	P ₂ O ₅	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	--mg/dm ³ --		g/dm ³	CaCl ₂				-----mmol _c dm ⁻³ -----									-----mg dm ⁻³ -----
2019	6	16	21	5,2	1,8	28	18	31	0	47,8	78,8	61%	0,24	3,6	21	23,4	0,9
2020	3	25	18	5	0,7	19	16	31	1	35,7	66,7	54%	0,27	1,6	25	11,1	0,6

Fonte: Laboratório de Fertilidade do Solo, FEIS/UNESP.

3.2.2 Material biológico

O híbrido simples de milho (*Zea mays* L.) AG 7098[®] foi utilizado no experimento em 2019 enquanto um híbrido simples experimental codificado (ainda não lançado no mercado) da empresa Bayer foi utilizado na safra de 2020. No primeiro ano, as sementes vieram tratadas industrialmente com metalaxil + tiabendazol + fludioxonil (2,0 + 15,0 + 2,5 g para 100 kg sementes); deltametrina (0,2 g para 100 kg sementes); pirimifós metílico (0,8 g para 100 kg sementes) e no segundo ano, as sementes vieram sem tratamento químico.

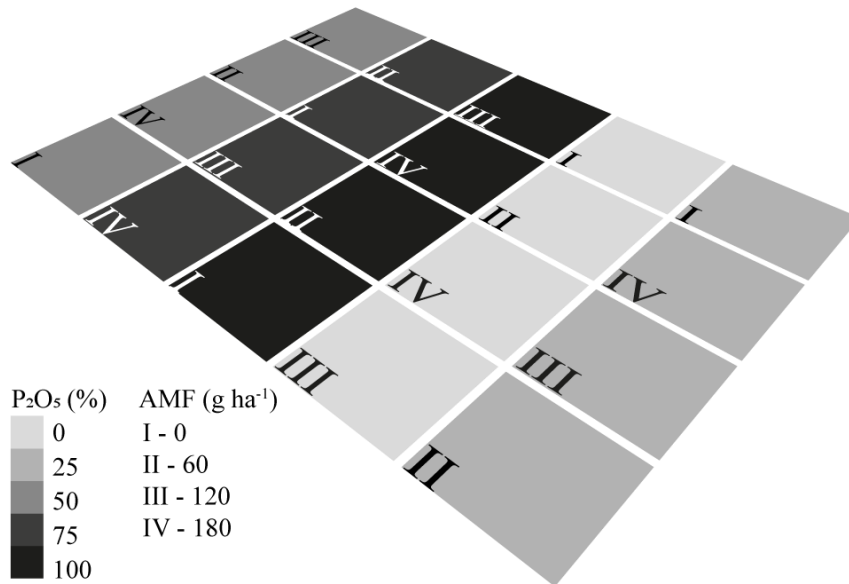
O fungo formador de micorrizas arbusculares utilizado foi *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Smith) Walker & Schüssler, em inoculante sólido para tratamento de sementes contendo 20.800 propágulos infectivos por grama.

3.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em parcelas subdivididas, com as doses de P₂O₅ para as parcelas e as doses de inoculante para as subparcelas. As doses de P utilizadas corresponderam à 0; 25; 50; 75 e 100% do recomendado para a cultura do milho na área, de acordo com Raij e Cantarella (1997). Isso resultou nas doses de 0; 30; 60; 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para o ano de 2019 e nas doses de 0; 15; 30; 45 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para o ano de 2020. As doses de inóculo de *R. intraradices* utilizadas foram de 0; 60; 120 e 180 g ha⁻¹. Cada parcela recebeu uma dose da adubação fosfatada correspondente e possuía 4 subparcelas com 4 linhas de 7 metros de comprimento cada e espaçamento entre

linhas de 0,85 m (Figura 6). Para as análises, considerou-se como área útil as duas linhas centrais, desconsiderando-se 0,5 m das extremidades.

Figura 6 - Representação de um dos quatro blocos do experimento com a distribuição dos tratamentos em parcelas e subparcelas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2.4 Instalação e condução do experimento

A semeadura ocorreu no dia 15/03/2019 no primeiro ano e em 10/03/2020 no segundo ano do experimento, após o manejo com rolo faca da cobertura vegetal. Para a adubação de semeadura, foram fornecidos 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 45 kg ha⁻¹ de N no primeiro ano e 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 33 kg ha⁻¹ de N no segundo ano (RAIJ e CANTARELLA, 1997).

O fornecimento de N e K₂O foi feito utilizando-se ureia e KCl e, após isso, foi realizada a adubação fosfatada, sempre de forma mecanizada. Como fonte de P₂O₅, foi utilizado o fertilizante mineral fosfato monoamônico (MAP, 52% de P₂O₅ e 11% de N), regulando a vazão de fertilizante de acordo com a dose da parcela. Ressalta-se que a quantidade de N fornecida em cada ano foi balanceada com ureia considerando-se o que foi fornecido por meio do MAP em cada tratamento das doses de P₂O₅.

A quantidade de inoculante necessária para cada tratamento foi pesada em balança de precisão e a inoculação foi feita momentos antes da semeadura. Uma solução açucarada (10%) foi utilizada na proporção de 300 mL 50 kg⁻¹ de sementes para melhor aderência do inoculante

à semente (as sementes não inoculadas também receberam a solução açucarada, para garantir que as diferenças fossem devidas apenas ao inoculante e/ou adubação fosfatada).

A semeadura foi efetuada com auxílio de semeadora manual, depositando as sementes em covas a cada 0,20 m nas linhas de semeadura, visando obter a população recomendada de plantas (57 mil plantas ha^{-1}). Todos os blocos do experimento foram semeados simultaneamente e cada bloco foi semeado pela mesma pessoa. Após a semeadura, a área foi irrigada com lâmina de 15 mm de água.

Durante todo o ciclo da cultura, o fornecimento de água para atender a demanda hídrica do milho foi feito por um sistema fixo de irrigação por aspersão com precipitação média de 15 mm h^{-1} em 2019 e por pivô central com precipitação média de 13 mm h^{-1} em 2020.

A emergência da cultura se deu no dia 20/03/2019 no primeiro ano e 15/03/2020 no segundo ano. A adubação em cobertura foi parcelada em duas vezes: a primeira foi realizada com as plantas em estágio V₄, aplicando-se 60 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} de N na forma de ureia em 2019 e 2020, respectivamente. A segunda aplicação de N foi realizada no estágio V₈, sendo fornecido mais 60 kg ha^{-1} de N na forma de ureia nos dois anos.

O manejo fitossanitário e de plantas daninhas em 2019 foi realizado com uma pulverização de clorantraniliprole (25 g ha^{-1} do ingrediente ativo [i. a.] + imidacloprido (50 g ha^{-1} do i. a.) para controle de lagartas desfolhadoras e insetos sugadores aos 16 dias após a emergência (DAE). Posteriormente, aos 21 DAE, foi realizada a aplicação de tiametoxan + lambda cialotrina + metomil (35,25 + 26,5 + 129 g ha^{-1} dos i. a.) para controle de pragas. Nessa mesma operação, foram adicionados herbicidas para controle das plantas daninhas: atrazina + tembotriona (1000 + 84 g ha^{-1} dos i. a.). No ano de 2020 foi realizada uma pulverização em campo com clorantraniliprole + tiametoxan + lambda cialotrina (25 + 35,25 + 26,5 g ha^{-1} do i.a.) para controle de pragas e atrazina + tembotriona (1000 + 84 g ha^{-1} dos i. a.) para controle de plantas daninhas aos 11 DAE. Em seguida, aos 21 DAE, realizou-se a aplicação de imidacloprido + triflumuron (70 + 48 g ha^{-1} do i.a.) para controle de pragas e de glyphosate (792,5 g ha^{-1} do i.a.) para controle de plantas daninhas. Em todas as operações foi adicionado o adjuvante Aureo[®] (éster metílico de óleo de soja, 720 g L^{-1}) na proporção de 250 mL 100 L^{-1} de calda e o volume de calda utilizado foi de 200 L ha^{-1} .

O florescimento feminino da cultura ocorreu aos 50 DAE e aos 45 DAE em 2019 e 2020, respectivamente. A colheita foi realizada após a maturação dos grãos (115 DAE em 2019 e 107 DAE em 2020) de forma manual, com a coleta das espigas contidas em duas linhas de 5 m na área útil de cada parcela.

3.2.5 Avaliações realizadas

Por ocasião do florescimento feminino foram realizadas as seguintes avaliações:

- a) **Índice de clorofila foliar (ICF):** determinado por meio de leituras com clorofilômetro portátil (ClorofiLOG[®], modelo CFL 1030) no terço médio dos limbos de folhas situadas opostamente e abaixo da espiga principal de 5 plantas por parcela;
- b) **Matéria seca da parte aérea do milho:** foram cortadas, rente ao solo, 6 plantas consecutivas, que foram pesadas e estimou-se a umidade de cada amostra para cálculo da matéria seca correspondente a cada parcela. Os dados foram convertidos para g planta⁻¹;
- c) **Porcentagem de colonização radicular por fungos micorrízicos:** foram coletadas raízes finas de 3 plantas na profundidade de 0-0,20 m, que foram lavadas e armazenadas com álcool 70%. Posteriormente foram clarificadas e coradas com azul tripano em lactoglicerol à 0,05% (PHILLIPS; HAYMAN, 1970). Com auxílio de microscópio óptico (40x), foi realizada a observação de 100 pequenos fragmentos de raízes para verificar a presença ou ausência de estruturas de FMA e com isso foi determinada a porcentagem de colonização da raiz (GIOVANNETTI; MOSSE, 1980);
- d) **Contagem dos esporos de fungos micorrízicos:** foi coletada uma amostra composta de solo da camada de 0,00-0,20 cm de cada parcela, que foi seca ao ar e peneirada. Depois foi separada uma amostra de 50 mL de solo de cada parcela, da qual se fez a separação dos esporos por meio do método de decantação e peneiramento úmido. O material retido na peneira de 0,053 mm foi centrifugado a 3000 rpm por 3 minutos. Em seguida, o sobrenadante foi descartado e se adicionou uma solução de sacarose a 50% aos tubos, centrifugando novamente a 2000 rpm por 2 minutos. O sobrenadante foi vertido em uma placa com anéis concêntricos para realização da contagem dos esporos em microscópio ótico (4x) (NOVAIS *et al.*, 2017).

Na maturidade fisiológica do milho (R₆) foram realizadas as seguintes avaliações com 10 plantas consecutivas da área útil das parcelas:

- e) **Altura de plantas:** distância do nível do solo ao ápice do pendão do milho com auxílio de régua graduada;
- f) **Altura de inserção da espiga:** distância do nível do solo até a inserção da espiga principal, também com auxílio de régua graduada;

- g) **Diâmetro basal do colmo:** foi medido com uso de um paquímetro digital e tomando como base o segundo entrenó da planta.

Após a colheita, dez espigas por parcela foram separadas para realização das seguintes avaliações:

- h) **Comprimento e diâmetro médio de espiga:** determinou-se o comprimento das espigas despalhadas com uso de régua graduada e o diâmetro do terço central de cada espiga, sem a retirada dos grãos, com uso de um paquímetro;
- i) **Número médio de grãos por fileira e número de fileiras das espigas:** realizou-se a contagem do número de fileiras e do número de grãos de uma fileira representativa de cada uma das dez espigas para cálculo das médias;
- j) **Massa da espiga despalhada, do sabugo e de grãos por espiga:** as espigas despalhadas foram pesadas (massa de espiga despalhada) e depois retirou-se os grãos para determinação da massa de grãos e de sabugos.

Após a colheita e a análise das variáveis anteriores, realizou-se a trilha mecânica das espigas e a partir disso foram feitas as seguintes análises:

- k) **Massa de 1000 grãos:** contagem e pesagem de 250 grãos de cada parcela e, com a determinação do teor de umidade de cada parcela, foi estimada a massa de 1000 grãos com teor de umidade de 13% (base úmida – b.u.);
- l) **Produtividade de grãos:** determinou-se a massa total dos grãos colhidos por parcela e os dados foram convertidos para kg ha^{-1} a 13% (b. u.).

3.2.6 Análise estatística

Inicialmente realizou-se o diagnóstico para análise de variância, testando a normalidade dos resíduos e a homoscedasticidade utilizando-se o software R. Em seguida, os resultados foram submetidos ao Teste F da Análise de Variância (ANOVA) para os fatores estudados e sua interação. Quando a ANOVA indicou significância para os resultados ($p < 0,05$), foram realizados testes de regressão polinomial para as doses de P ou do inoculante, como fatores isolados. Para a ANOVA e os testes de regressão polinomial, foi utilizado o software estatístico SISVAR[®] (FERREIRA, 2019). Não houve análise estatística envolvendo os dois anos conjuntamente, pois o experimento foi realizado em áreas diferentes e com genótipos diferentes.

3.3 RESULTADOS

Não houve efeito das doses de P e da inoculação de FMA para a atividade da fosfatase ácida do solo (0,0-0,20 m), sendo observados valores médios de 113,22 e 37,19 mg p-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1} (Tabela 5), para os anos de 2019 e 2020, respectivamente. A quantidade de esporos de FMA no solo do experimento também não foram afetados pelos tratamentos utilizados nos dois anos do experimento, sendo que seus valores médios foram bastante próximos, com médias de 630,87 e 672,28 esporos por 50 mL de solo seco (0,00-0,20 m). Por fim, a colonização de raízes por FMA não foi alterada em função da adubação com P ou da inoculação com *R. intraradices*, com médias de 61,69% em 2019 e 40,85% em 2020 (Tabela 5).

Tabela 5 - Atividade da fosfatase ácida (FOSFATASE), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares no solo (ESPOROS) e porcentagem de colonização micorrízica das raízes de milho (COLONIZAÇÃO) em função de doses de P_2O_5 e doses de inoculante contendo *Rhizophagus intraradices*. Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020

TRATAMENTO	FOSFATASE		ESPOROS		COLONIZAÇÃO	
Fósforo (%)	mg p-nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹		esporos por 50 mL de solo seco		%	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	113,21	43,83	599,00	680,42	61,22	40,35
25,0	107,73	39,46	623,33	667,00	61,44	41,36
50,0	108,89	36,14	671,67	685,00	58,76	46,58
75,0	123,41	31,73	638,33	631,67	63,50	38,40
100,0	113,34	34,77	622,00	697,33	63,55	37,55
Micorriza (g ha⁻¹)						
0,0	111,68	35,67	639,47	667,47	59,90	44,63
60,0	112,84	39,46	667,20	683,00	62,07	42,76
120,0	117,40	37,43	552,00	646,67	62,17	40,95
180,0	111,35	36,19	664,80	692,00	62,64	35,05
ANOVA (p-valor)						
P	0,915	0,409	0,909	0,604	0,530	0,439
M	0,655	0,318	0,636	0,906	0,833	0,264
P x M	0,189	0,756	0,447	0,513	0,476	0,463
Média Geral	113,32	37,19	630,87	672,28	61,69	40,85
CV1 (%)	39,55	40,70	30,09	15,32	14,04	29,29
CV2 (%)	12,94	15,87	43,77	26,57	16,48	33,29

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

O ICF foi influenciado pelas doses de P aplicadas em 2019 ($p < 0,01$), com ajuste de uma equação de regressão linear decrescente ($R^2=80,55\%$) e queda de 8,22% na dose máxima em relação à dose 0 do nutriente (Tabela 6). A média dessa variável em 2019 foi de 56,82. Em 2020 não houve efeito dos tratamentos sobre essa variável e o valor médio encontrado foi superior ao ano anterior, de 64,12. A altura de planta teve efeito significativo da adubação fosfatada ($p < 0,05$), com ajuste de equação de regressão linear crescente para as doses de P ($R^2 = 88,34\%$) e aumento de 4,48% na dose máxima quando comparada com a dose 0 de P_2O_5 . Em 2020 não houve efeitos dos fatores analisados sobre a altura de plantas, que foram menores que no ano anterior, com altura média encontrada de 2,34 m. A altura de inserção de espigas em 2019 também foi influenciada pelo P ($p < 0,05$), com ajuste de uma equação de regressão linear e crescente ($R^2=74,48\%$) e aumento de 5,37% na dose máxima em relação a dose 0 de P_2O_5 . Em 2020, por outro lado, não houve efeito da adubação fosfatada e da inoculação micorrízica, com valor médio de 1,04 m.

Tabela 6 - Índice de Clorofila Foliar (ICF), altura de planta (Altplant), altura de inserção da espiga (Altins), diâmetro do colmo (diacolm) e matéria seca de planta (MSP) em função de doses de P_2O_5 e doses de inoculante contendo *Rhizophagus intraradices*. Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020

TRATAMENTO	ICF		Altplant		Altins		Diacolm		MSP	
Fósforo (%)	-----		metros		metros		milímetros		g planta ⁻¹	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	59,84 ¹	61,17	2,68 ²	2,37	1,49 ³	1,05	24,16	18,58	151,53	93,37
25,0	57,30	63,54	2,73	2,32	1,53	1,01	25,00	18,42	154,62	97,61
50,0	55,70	65,89	2,78	2,32	1,56	1,01	24,73	18,49	153,45	101,27
75,0	56,36	64,37	2,78	2,34	1,54	1,07	24,17	18,79	155,27	101,27
100,0	54,92	65,64	2,80	2,31	1,57	1,05	24,12	19,03	146,17	101,20
Micorriza (g ha⁻¹)										
0,0	56,42	63,39	2,74	2,33	1,52	1,04	24,59	18,74	155,32	94,31
60,0	56,41	64,20	2,76	2,31	1,55	1,03	24,20	18,55	151,62	100,57
120,0	57,46	63,99	2,75	2,36	1,53	1,03	24,89	18,61	153,31	97,78
180,0	57,00	64,91	2,75	2,33	1,54	1,04	24,05	18,74	148,59	103,12
ANOVA (p-valor)										
P	0,007	0,121	0,042	0,705	0,030	0,121	0,231	0,667	0,648	0,299
M	0,799	0,619	0,906	0,164	0,108	0,885	0,175	0,898	0,679	0,166
P x M	0,650	0,772	0,579	0,557	0,156	0,455	0,122	0,754	0,276	0,176
Média Geral	56,82	64,12	2,75	2,34	1,54	1,04	24,43	18,66	152,21	98,94
CV1 (%)	5,45	7,87	3,82	5,46	3,81	7,19	5,19	6,93	12,09	12,02
CV2 (%)	6,86	5,65	2,19	3,15	2,65	3,6	5,27	5,33	11,74	12,84

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

¹ $y = -0,0431x + 58,98$ ($R^2 = 0,8055$)

² $y = 0,0012x + 2,696$ ($R^2 = 0,8834$)

³ $y = 0,0007x + 1,504$ ($R^2 = 0,7448$)

Fonte: Dados do próprio autor.

Nos dois anos do experimento, não houve efeito dos tratamentos sobre o diâmetro de colmo, com as médias dessa variável em 2019 e 2020 sendo de 24,43 mm e 18,66 mm, respectivamente. A matéria seca de plantas (MSP) também não apresentou modificações significativas em função dos tratamentos com P e FMA utilizados e os valores médios encontrados nos dois anos do trabalho foram de 152,21 g planta⁻¹ em 2019 e 98,24 g planta⁻¹ em 2020.

O comprimento de espiga foi significativamente influenciado pela inoculação micorrízica em 2019 ($p < 0,05$), sem ajuste de uma equação de regressão com significado biológico (Tabela 7). Em 2020 não houve efeito dos tratamentos sobre essa variável. As médias para 2019 e 2020 foram, respectivamente, de 16,48 cm e 14,61 cm. No primeiro ano do experimento, houve efeito da inoculação com FMA para o diâmetro de espigas (DIAMESP)

em 2019 ($p < 0,05$), com ajuste de uma equação de regressão quadrática ($R^2 = 72,62\%$) e ponto de máximo na dose de 65 g ha^{-1} do inoculante, resultando em 5,03 cm de diâmetro (incremento de 1,6% em relação à dose 0). Já em 2020, essa variável não foi afetada pela adubação fosfatada ou inoculação com FMA, e a média geral foi de 4,04 cm, inferior à 2019.

Tabela 7 - Comprimento de espiga (COMPESP), diâmetro de espiga (DIAMESP), número de fileiras por espiga (NUMFIL) e número de grãos por fileira (GFIL) em função de doses de P_2O_5 e doses de inoculante contendo *Rhizophagus intraradices*. Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020

TRATAMENTO	COMPESP		DIAMESP		NUMFIL		GFIL	
Fósforo (%)	centímetros		centímetros		número		número	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	16,88	14,79	5,05	4,04	16,92	16,62	35,27	33,52
25,0	16,70	14,51	4,97	4,04	16,66	16,31	35,08	33,17
50,0	16,32	14,29	4,96	4,00	16,68	16,56	34,06	32,11
75,0	16,16	14,81	4,98	4,13	16,53	16,49	33,88	33,60
100,0	16,34	14,68	5,04	3,99	16,65	16,59	34,84	33,46
Micorriza (g ha^{-1})								
0,0	16,60	14,70	5,01 ¹	4,05	16,73	16,51	34,46 ²	33,15
60,0	16,35	14,43	5,01	4,02	16,74	16,45	34,88	33,59
120,0	16,76	14,56	5,04	3,99	16,59	16,43	35,32	32,82
180,0	16,22	14,75	4,95	4,09	16,71	16,67	33,86	33,14
ANOVA (p-valor)								
P	0,067	0,351	0,155	0,164	0,202	0,527	0,140	0,058
M	0,043	0,259	0,044	0,293	0,775	0,054	0,050	0,290
P x M	0,509	0,149	0,174	0,457	0,209	0,221	0,811	0,445
Média Geral	16,48	14,61	5,00	4,04	16,69	16,51	34,63	33,17
CV1 (%)	4,22	5,34	2,33	3,65	2,54	3,35	4,91	4,22
CV2 (%)	3,84	3,73	2,03	3,72	3,02	1,79	4,82	3,81

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

¹ $y = -0,000006x^2 + 0,000777x + 5,0062$ ($R^2 = 0,7262$)

² $y = -0,00013x^2 + 0,02123x + 34,36400$ ($R^2 = 0,8412$)

Fonte: Dados do próprio autor.

Os fatores adubação fosfatada e inoculação micorrízica também não afetaram o número de fileiras por espiga nos dois anos do experimento, cujas médias foram de 16,69 e 16,51 fileiras por espiga em 2019 e 2020, respectivamente. O número de grãos por fileira (GFIL) foi beneficiado pela inoculação com FMA ($p < 0,05$) em 2019, com ajuste de equação de regressão quadrática ($R^2 = 84,12\%$) e ponto de máximo na dose de $81,65 \text{ g ha}^{-1}$, resultando em 35,23 grãos por fileira, 2,23% a mais que a média da dose 0 (34,46 grãos por fileira). Em 2020 essa variável não foi influenciada pelos tratamentos e a média geral foi de 33,17 grãos por fileira.

A adubação fosfatada e a inoculação micorrízica não resultaram em efeitos significativos para massa de espiga despalhada (MESP), massa de grãos por espiga (MGRAO) e massa do sabugo (MSAB). As médias das três variáveis para 2019 foram 162,53 g, 141,47 g e 21,06 g, respectivamente. E em 2020, foram 111,25 g, 95,43 g e 15,75 g, respectivamente. Nota-se uma diferença expressiva nos valores médios obtidos nos dois anos do experimento (Tabela 8).

Tabela 8 - Massa da espiga despalhada (MESP), massa de grãos por espiga (MGRAO), massa do sabugo (MSAB), massa de mil grãos (M1000) e produtividade (PRODT) em função de doses de P_2O_5 e doses de inoculante contendo *Rhizophagus intraradices*. Selvíria/MS, Brasil, 2019 e 2020

TRATAMENTO	MESP		MGRAO		MSAB		M1000		PRODT	
Fósforo (%)	gramas		gramas		gramas		gramas		kg ha ⁻¹	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	168,16	113,66	146,29	97,32	21,87	16,28	310,95	181,82	8210	3662
25,0	157,13	110,37	136,24	94,93	20,89	15,39	295,13	172,63	8537	4169
50,0	160,35	107,31	139,85	92,01	20,50	15,26	304,14	177,94	8220	4006
75,0	161,64	118,26	140,97	101,84	20,67	16,35	302,38	177,39	8189	4095
100,0	165,36	106,68	143,99	91,08	21,37	15,50	305,67	168,92	8793	3397
Micorriza (g ha⁻¹)										
0,0	161,25	112,59	139,98	96,75	21,27	15,79	303,62	174,01	8207	4044
60,0	160,09	109,63	139,47	94,17	20,62	15,39	309,20	173,46	8192	3795
120,0	168,10	108,04	146,53	92,46	21,57	15,54	305,45	182,05	8684	3854
180,0	160,68	114,77	139,89	98,36	20,79	16,29	296,33	173,45	8476	3771
ANOVA (p-valor)										
P	0,490	0,374	0,492	0,365	0,426	0,412	0,482	0,491	0,500	0,103
M	0,353	0,296	0,328	0,291	0,501	0,456	0,263	0,515	0,235	0,364
P x M	0,442	0,275	0,414	0,209	0,729	0,841	0,734	0,210	0,834	0,436
Média Geral	162,53	111,25	141,47	95,43	21,06	15,75	303,65	175,74	8390	3865
CV1 (%)	11,15	15,97	11,50	16,71	10,38	12,62	6,71	11,99	11,55	21,55
CV2 (%)	9,76	10,73	9,85	10,87	10,32	11,92	5,83	12,18	8,88	13,71

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

Da mesma forma, as variáveis massa de mil grãos (M1000) e produtividade de grãos (PRODT) não foram influenciadas pela adubação fosfatada e pela inoculação micorrízica nos dois anos do experimento (Tabela 8). Em 2019, os valores médios para massa de mil grãos e produtividade foram de, respectivamente, 303,65 g e 8390 kg ha⁻¹. E em 2020, os valores obtidos foram de 175,74 g e 3865 kg ha⁻¹, respectivamente.

3.4 DISCUSSÃO

Nesse trabalho em que foram estudados os efeitos da adubação fosfatada e da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares na cultura do milho, a atividade da enzima fosfatase ácida no solo apresentou valores que estão dentro do comumente encontrado para a atividade desta enzima no solo. Conte *et al.* (2002) observaram valores da atividade dessa enzima em torno de 600 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹ para solos cultivados e um valor 2,5 vezes maior em solo nativo. Santos *et al.* (2015), analisando a atividade da fosfatase ácida em diferentes sistemas de produção, verificaram valores entre 30-40 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹ na entressafra e 60-75 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹ durante a safra.

Badalucco *et al.* (1992), Conte *et al.* (2002) e Zhang *et al.* (2014) não verificaram alterações para esta variável em função da aplicação de P mineral. Apesar de já ser demonstrado que a maior disponibilidade de P pode inibir a atividade de fosfatase ácida devido ao gasto metabólico envolvido com a produção da enzima (VENTERINK; GÜSEWELL, 2010), na cultura do milho o efeito da adição de P pode variar com o genótipo e sua suscetibilidade à deficiência de P no solo (GAUME *et al.*, 2001). Além disso, essa enzima atua na mineralização de P orgânico em P inorgânico no solo, com sua atividade dependendo mais do estoque de material orgânico do solo do que da adição de fertilizantes minerais (CRIQUET; BRAUD 2008). E em solos altamente intemperizados como os do cerrado brasileiro, há alta afinidade do P com colóides minerais do solo (como os óxi-hidróxidos de Fe e Al), que adsorvem o P, reduzindo o seu efeito inibidor sobre a atividade da fosfatase (RHEINHEIMER *et al.*, 2000).

Os FMA liberam ao redor das suas hifas, diversos compostos orgânicos, incluindo a fosfatase (SATO *et al.*, 2015), sendo possível observar incrementos na atividade dessa enzima quando se eleva a colonização de plantas por FMA (BINI *et al.*; 2018). Mas nem sempre isso ocorre, pois a maior contribuição desses fungos na nutrição fosfatada das plantas é por meio da absorção e transporte de fósforo entre o solo e a planta (ZHANG *et al.*, 2016).

Nos dois anos do experimento, a quantidade de esporos obtida no solo é elevada quando comparada com a literatura. No trabalho de Durazzini *et al.* (2016), os autores encontraram um valor máximo de 319 esporos por 50 mL de solo, correspondendo a um sistema agroflorestal. Reis *et al.* (1999), trabalhando com diferentes variedades de cana de açúcar em 3 localidades diferentes, encontraram valores de até 815 esporos por 50 mL de solo, mas com a maioria das observações sendo inferiores a 300 esporos por 50 mL. A população de FMA nativos no solo

pode ter se mantido em níveis altos devido ao sistema plantio direto (SPD) e o uso do milheto, pois o não revolvimento do solo e o uso de plantas de cobertura mantêm as populações de FMA nativas elevadas (LEHMAN *et al.*, 2012; CAMERON, 2016).

A grande quantidade de esporos detectados em parcelas inoculadas e não inoculadas pode ser devido à presença de FMA altamente esporulados comumente encontrados em solos agrícolas, incluindo isolados de *R. irregularis*. Vários isolados desta espécie são bem adaptados a alta fertilização e condições de perturbação do solo (ROSENDAHL *et al.*, 2009; OEHL *et al.*, 2010; SCHNOOR *et al.*, 2011) e são conhecidos por produzirem um grande número de esporos e micélio extra-radical (JANSA *et al.*, 2003; ÖPIK *et al.*, 2006). Assim, devido à grande quantidade de esporos de FMA nativos no solo, a inoculação não foi capaz de modificar a quantidade de esporos no solo, pois apesar de o *R. intraradices* inoculado ter estabelecido simbiose com as plantas, não foi capaz de se proliferar de maneira significativa no solo (VERBRUGGEN *et al.*, 2012).

Por proporcionar maior absorção de água e nutrientes, a simbiose com FMA promove maior desenvolvimento vegetativo das plantas (LIU *et al.*, 2000; CHIU; PASZKOWSKI, 2019; RAMÍREZ-FLORES *et al.*, 2019). Nos dois anos desse trabalho, não houve esse efeito para a inoculação devido à alta quantidade de esporos nativos no solo, resultando em elevada colonização de raízes (61,69% para 2019 e 40,85% para 2020) independentemente da inoculação. Trabalhos na literatura relataram valores menores para a colonização de raízes no milho, com valores mínimos de 39,3% no trabalho de Cameron (2016), 22,0% no trabalho de Ren *et al.* (2019) e inferior a 56% no trabalho de Mathur *et al.* (2018).

A redução do ICF com o aumento do fornecimento de P em 2019 se explica pela menor concentração de clorofila nas plantas que receberam maior adubação fosfatada (efeito de diluição), pois houve maior desenvolvimento vegetativo com o incremento no fornecimento desse nutriente. Quando há limitação de P, ocorrem folhas com coloração verde mais escura devido ao alto conteúdo de clorofila por unidade de área, em função do crescimento vegetativo da folha ser mais lento que a formação de clorofila nessas plantas. Porém no primeiro caso, a eficiência fotossintética é maior do que no segundo caso em decorrência do suprimento de P (MARSCHENER, 1995; TONELLO *et al.*, 2013).

O crescimento das plantas em altura devido ao aumento do P fornecido também foi verificado por Soares *et al.* (2016) e Andrade *et al.* (2018) ao trabalharem com soja. Incrementos na altura das plantas de milho em função da adubação fosfatada foram verificados por Fiorini *et al.* (2018). Isso ocorre porque o P é essencial para a fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia (componente das moléculas de ATP) e na divisão e

crescimento celular, fazendo parte de compostos vegetais como açúcares fosfatados, fosfolipídios das membranas celulares, coenzimas e nucleotídeos (HAWKESFORD *et al.*, 2012; TAIZ *et al.*, 2017).

No presente trabalho, a quantidade de P já disponível no solo (16 e 25 mg dm⁻³ para 2019 e 2020, respectivamente) somada ao que foi fornecido pela simbiose micorrízica foi suficiente para atender a demanda das plantas por esse nutriente, mesmo quando em doses reduzidas ou nula de P₂O₅. Há trabalhos na literatura que verificaram ausência de resultados no número de grãos por fileira para a adubação fosfatada, como é o caso de Zucareli *et al.* (2011) e Oliveira *et al.* (2015). Em 2019 foi observado efeito da adubação fosfatada sobre ICF, altura de planta, altura de inserção de espiga, mas em 2020 esse comportamento não se manteve. Isso se deve à diferença de P₂O₅ disponível nos solos dos dois anos de experimento, que é de 9 mg dm⁻³, ou seja, em 2020 o solo possuía mais P disponível do que o solo de 2019 e, por isso, os efeitos observados no primeiro ano não se repetiram no segundo ano.

Os resultados encontrados para DIAMESP e GFIL em 2019 indicam que a inoculação com FMA tem potencial para incrementar a produtividade do milho, pois resultou em maior desenvolvimento de espigas e, principalmente, em maior número de grãos por fileira. Mas isso não resultou em alterações para MESP, MGRAO e MSAB em 2019. Possivelmente porque a influência do FMA inoculado não foi suficiente para superar os efeitos da comunidade nativa do solo.

Em 2020 não foram observados os mesmos efeitos da inoculação sobre DIAMESP e GFIL, possivelmente porque o maior teor de P disponível no solo reduziu o estabelecimento da simbiose com FMA pelas plantas, visto que a simbiose tem um custo energético para as plantas que não é viável quando estão em condições ambientais ótimas (NOURI *et al.*, 2014).

A associação dos FMA com as plantas pode melhorar o desempenho produtivo da cultura, com trabalhos verificando incrementos na matéria seca de plantas e na produção de grãos em culturas agrícolas anuais e espécies arbóreas em decorrência das micorrizas (BRITO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018b; RAMÍREZ-FLORES *et al.*, 2019). Mas devido à alta presença de esporos nativos no solo e aos teores de P disponíveis serem médios, não houve efeito da inoculação para MSP, M1000 e PRODT nos dois anos do experimento.

A literatura indica que o aumento nas doses de P₂O₅ fornecidas para uma cultura agrícola pode incrementar sua produtividade (PRADO *et al.*, 2001; PEREIRA *et al.*, 2020). Mas, no presente trabalho, a ausência de resultados para as características produtivas se deve ao teor do nutriente disponível no solo (teor médio) e à alta ocorrência de simbiose com FMA, permitindo às plantas obterem quantidade suficiente de P.

Além disso, solos bem manejados, com cultivo de plantas de cobertura, em plantio direto e com fertilização racional, são ambientes favoráveis para FMA que estabelecem relações de simbiose eficientes com as plantas, não sendo necessário realizar a inoculação para garantir isso. Assim, é possível que a inoculação tenha efeitos expressivos somente quando os solos estão limitados no que se refere à propágulos de FMA (VERBRUGGEN *et al.*, 2013).

Observa-se que, de modo geral, no segundo ano do experimento, os valores médios encontrados para a maioria das variáveis foram inferiores aos valores médios de 2019, resultando em produtividade média de 2020 inferior em mais de 50% em relação à 2019. Isso foi devido à uma inadaptação não esperada do híbrido utilizado em 2020 às temperaturas altas da região. Porém isso não refletiu em problemas para a análise dos tratamentos sobre o desenvolvimento e produtividade da cultura.

3.5 CONCLUSÃO

1. A inoculação de *Rhizophagus intraradices* na cultura do milho tem potencial para melhorar o desenvolvimento e a produtividade da cultura, a depender dos fatores envolvidos na simbiose;
2. Em condições de alta colonização das plantas por espécies de FMA nativas e disponibilidade de fósforo no solo, não se verifica ação imediata da inoculação sobre a eficiência da adubação fosfatada;
3. A adubação fosfatada é essencial para o desenvolvimento e produtividade do milho, mas os efeitos imediatos podem não ser visualizados em solos com boa fertilidade.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, F. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; LUSTOSA FILHO, J. F.; ZUFFO, A. M.; MOREIRA, F. M. D. S. Mycorrhization stimulant in soybean associated with phosphate fertilization in oxisols. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 4, p. 823-831, 2018.
- BADALUCCO, L.; GREGO, S.; DELL'ORCO, S.; NANNIPIERI, P. Effect of liming on some chemical, biochemical, and microbiological properties of acid soils under spruce (*Picea abies* L.). **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 14, p. 76-83, 1992.
- BINI, D.; SANTOS, C. A. D.; SILVA, M. C. P. D.; BONFIM, J. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Intercropping *Acacia mangium* stimulates AMF colonization and soil phosphatase activity in *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 75, n. 2, 102-110, 2018.
- BLEVINS, D. G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 4-5, 1999.
- BREUILLIN, F.; SCHRAMM, J.; HAJIREZAEI, M.; AHKAMI, A.; FAVRE, P.; DRUEGE, U.; REINHARDT, D. Phosphate systemically inhibits development of arbuscular mycorrhiza in *Petunia hybrida* and represses genes involved in mycorrhizal functioning. **The Plant Journal**, The Hague, v. 64, n. 6, 1002-1017, 2010.
- BRITO, V. N.; TELLECHEA, F. R. F.; HEITOR, L. C.; FREITAS, M. S. M.; MARTINS, M. A. Fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada na produção de mudas de paricá. **Ciência Florestal**, Piracicaba, v. 27, n. 2, p. 485-497, 2017.
- CAMERON, J. **Effects of seed applied fungicide on arbuscular mycorrhizal colonization of South Dakota cultivars of oat, soybean, and corn**. 2016. Thesis (Master Science) - South Dakota State University, Dakota, 2016. Disponível em: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/1059>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- CHIU, C. H.; PASZKOWSKI, U. Mechanisms and impact of symbiotic phosphate acquisition. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, New York, v. 11, n. 6, p. a034603, 2019.
- COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C., HERNANI, L. C. **Cultivo do milho: nutrição e adubação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. Comunicado Técnico, 44.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 925-930, 2002.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G.B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, p. 218-224, 2008.

CRIQUET, S.; BRAUD, A. Effects of organic and mineral amendments on available P and phosphatase activities in a degraded Mediterranean soil under short-term incubation experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, p. 164–174, 2008.

DUARTE, J. O.; MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. **Milho**: importância socioeconômica. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_8_168200511157.html. Acesso em: 10 jan. 2021.

DURAZZINI, A. M.; TEIXEIRA, M. A.; ADAMI, A. A. Quantificação de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) em solo sob diferentes cultivos de cafeeiros. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 8, n. 4, 83-91, 2016.

FAOSTAT 2018.- **Database of Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: fao.org/faostat/en/#data. Acesso em: 10 jan. 2021.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PEREIRA, H. D.; PEREIRA, C. S.; RESENDE, F. R.; RESENDE, E. L. Doses and sources of phosphorus in the maize with and without polymer coating in the mono-ammonium phosphate. **Scientific Electronic Archives**, Sinop, v. 11, n. 5, p. 89-93, 2018.

GAUME, A.; MÄCHLER, F.; DE LEÓN, C.; NARRO, L.; FROSSARD, E. Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. **Plant and Soil**, The Hague, v. 228, p. 253–264, 2001.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An Evaluation of Techniques for Measuring Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Infection in Roots. **New Phytologist**, Cambridge, v. 84, n. 3, p. 489-500, 1980.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H. SCHJOERRING, J.; MØLLER, I. S.; WHITE, P. Functions o macronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012. p. 135-189.

JANSA, J.; MOZAFAR, A.; KUHN, G., ANKEN, T.; RUH, R.; SANDERS, I. R.; FROSSARD, E. J. E. A. Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. **Ecological Applications**, Washington, v. 13, n. 4, p. 1164-1176, 2003.

LEHMAN, R.; TAHERI, W.; OSBORNE, S.; BUYER, J.; DOUDS, D. Fall cover cropping can increase arbuscular mycorrhizae in soils supporting intensive agricultural production. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 61, p. 300-304, 2012.

LIU, A.; HAMEL, C.; HAMILTON, R. I.; MA, B. L.; SMITH, D. L. Acquisition of Cu, Zn, Mn and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v. 9, n. 6, p. 331-336, 2000.

MARSCHENER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 275 p.

MATHUR, S.; SHARMA, M. P.; JAJOO, A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Lausanne, v. 180, p. 149-154, 2018.

MERCY, L.; LUCIC-MERCY, E.; NOGALES, A.; POGHOSYAN, A.; SCHNEIDER, C.; ARNHOLDT-SCHMITT, B. A functional approach towards understanding the role of the mitochondrial respiratory chain in an endomycorrhizal symbiosis. **Frontiers in Plant Science**, Melbourne, v. 8, p. 417, 2017.

NOURI, E.; BREUILLIN-SESSOMS, F.; FELLER, U.; REINHARDT, D. Phosphorus and nitrogen regulate arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Petunia hybrida*. **PloSone**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. e90841, 2014.

NOVAIS, C. B.; BORGES, W. L.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SBRANA, C.; GIOVANNETTI, M.; SIQUEIRA, J. O. **Técnicas básicas em micorrizas arbusculares**. Lavras: Ed. UFLA, 2017.

OEHL, F.; LACZKO, E.; BOGENRIEDER, A.; STAHR, K.; BÖSCH, R.; HEIJDEN, M.; SIEVERDING, E. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 5, p. 724-738, 2010.

OLIVEIRA, M. A. D.; ZUCARELI, C.; FERREIRA, A. S.; DOMINGUES, A. R.; SPOLAOR, L. T.; NEVES, C. S. Adubação fosfatada associada à inoculação com *Pseudomonas fluorescens* no desempenho agrônômico do milho. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 38, n. 1, p. 18-25, 2015.

ÖPIK, M.; MOORA, M.; LIIRA, J.; ZOBEL, M. Composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 94, n. 4, p. 778-790, 2006.

PEREIRA, F. F.; RATKE, R. F.; ZUFFO, A. M.; SOUSA, W. P.; ALMEIDA, F. A.; PETTER, F. A. Características agrônômicas do algodão submetido a épocas e doses de aplicação de fósforo no cerrado piauiense. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 29, n. 1, p. 11-21, 2020.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots for rapid assessment of infection. **Transaction of British Mycology Society**, Cambridge, v. 55, n. 1, p. 158- 161, 1970.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Effects of fertilizer placement and levels of phosphorus on foliar phosphorus content and corn yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 83-90, 2001.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química do solo para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van. CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas/Fundação IAC, 1997. p. 43-73.

RAMÍREZ-FLORES, M. R.; BELLO, E. B.; RELLÁN-ÁLVAREZ, R.; SAWERS, R. J.; PORTUGAL, V. O. Inoculation with the mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* modulates the relationship between root growth and nutrient content in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.). **Plant Direct**, Oxford, v. 3, n. 12, p. e00192, 2019.

REIS, V. M.; PAULA, M. A. D.; DÖBEREINER, J. Ocorrência de micorrizas arbusculares e da bactéria diazotrófica *Acetobacter diazotrophicus* em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 10, 1933-1941, 1999.

REN, A. T.; ZHU, Y.; CHEN, Y. L.; REN, H. X.; LI, J. Y.; ABBOTT, L. K.; XIONG, Y. C. Arbuscular mycorrhizal fungus alters root-sourced signal (abscisic acid) for better drought acclimation in *Zea mays* L. seedlings. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 167, p. 103824, 2019.

RHEINHEIMER, D. D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, n. 3, p. 589-597, 2000.

ROSENDAHL, S.; MCGEE, P.; MORTON, J. B. Lack of global population genetic differentiation in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* suggests a recent range expansion which may have coincided with the spread of agriculture. **Molecular Ecology**, Oxford, v. 18, n. 20, p. 4316-4329, 2009.

SANTOS H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C. F.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 356 p.

SANTOS, F. L.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O.; DE MELO BENITES, V.; SOUZA, E. D. Atributos bioquímicos do solo sob diferentes sistemas de produção no sudoeste goiano. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 8, n. 2, p. 74-86, 2015.

SANTOS, J. K. S.; SANTANA, M. D. F.; LARA, T. S. Responsividade de plantas de milho à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares da rizosfera de ipê amarelo. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 10, n. 1, p. 253-264, 2018b.

SATO, T.; EZAWA, T.; CHENG, W.; TAWARAYA, K. Release of acid phosphatase from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 61, n. 2, p. 269-274, 2015.

SCHNOOR, T. K.; LEKBERG, Y.; ROSENDAHL, S.; OLSSON, P. A. Mechanical soil disturbance as a determinant of arbuscular mycorrhizal fungal communities in semi-natural grassland. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v. 21, n. 3, p. 211-220, 2011.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. San Diego: Academic press, 2010.

SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 62, p. 227-250, 2011.

SOARES, M. M.; SEDIYAMA, T.; NEVES, J. C. L.; SANTOS JÚNIOR, H. C. D.; SILVA, L. J. D. Nodulation, growth and soybean yield in response to seed coating and split application of phosphorus. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 38, n. 1, p. 30-40, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Physiology and plant development**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TONELLO, L. P.; SOUSA, S. A.; GONÇALVES, G. D. M. O.; FERES, C. I. M. A. Comportamento de cultivares de arroz de terras altas sob níveis de fósforo e potássio. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 8, n. 2, p. 34, 2013.

VENTERINK, H. O.; GÜSEWELL, S. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation. **Functional Ecology**, Oxford, v. 24, p. 877-886, 2010.

VERBRUGGEN, E.; VAN DER HEIJDEN, M. G.; RILLIG, M. C.; KIERS, E. T. Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: factors determining inoculation success. **New Phytologist**, Cambridge, v. 197, n. 4, p. 1104-1109, 2013.

ZHANG, G.; CHEN, Z.; ZHANG, A.; CHEN, L.; WU, Z.; MA, X. Phosphorus composition and phosphatase activities in soils affected by long-term application of pig manure and inorganic fertilizers. **Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 45, n. 14, p. 1866-1876, 2014.

ZHANG, L.; XU, M.; LIU, Y.; ZHANG, F.; HODGE, A.; FENG, G. Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium. **New Phytologist**, Cambridge, v. 210, n. 3, p. 1022-1032, 2016.

ZUCARELI, C.; CIL, I. R.; PRETE, C. E. C.; PRANDO, A. M. Eficiência agronômica da inoculação à base de *Pseudomonas fluorescens* na cultura do milho. **Agrarian**, Dourados, v. 4, n. 13, p. 152-157, 2011.

CAPÍTULO 4: ADUBAÇÃO FOSFATADA E INOCULAÇÃO MICORRÍZICA AUMENTAM OS TEORES DE NUTRIENTES EM FOLHAS E GRÃOS DE MILHO

RESUMO

A aplicação de fungos micorrízicos arbusculares na agricultura é uma prática que pode aumentar a eficiência da adubação fosfatada, beneficiando a nutrição das plantas e dos grãos produzidos. Desse modo, objetivou-se com esse trabalho verificar a influência de doses reduzidas de fósforo (P) associada com a inoculação de *Rizophagus intraradices* na nutrição da cultura do milho. O trabalho foi desenvolvido em campo, em área experimental situada no município de Selvíria/MS. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de cinco doses de P_2O_5 (0, 25, 50, 75 e 100% do recomendado) com quatro doses de inoculante contendo o fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus intraradices* (0, 60, 120 e 180 g ha⁻¹). Foram avaliados os teores de macro e micronutrientes nas folhas e grãos de milho. A inoculação com o fungo micorrízico influenciou a concentração de P e S nos grãos produzidos e o aumento das doses de P incrementou os teores de K e Mg foliares. A combinação da inoculação com FMA com a adubação fosfatada proporcionou melhor concentração de P foliar, Zn foliar e Mg nos grãos de milho. Concluiu-se que a adubação fosfatada em níveis elevados potencializa a absorção de nutrientes do solo e que a inoculação tem potencial para incrementar a absorção de nutrientes e aumentar a eficiência da adubação fosfatada. Os efeitos da inoculação são menos expressivos em solos com alta comunidade de FMA nativos.

Palavras-chave: Fósforo. Fungos micorrízicos arbusculares. Nutrição de plantas.

Rhizophagus intraradices. *Zea mays*.

4.1 INTRODUÇÃO

A importância do fósforo (P) como macronutriente de plantas se deve ao fato de esse elemento compor moléculas de açúcares, intermediários dos processos de respiração e fotossíntese, fosfolipídios de membranas celulares, nucleotídeos e o ATP do metabolismo energético (TAIZ *et al.*, 2017). Mas há um desafio para o suprimento de P na agricultura, visto que a eficiência da adubação fosfatada é baixa devido à sua alta adsorção nas partículas de solo, principalmente óxidos de Fe e Al da fração argila (CORRÊA *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2008; RESENDE; FURTINI, 2007). Além disso, há a limitação das reservas de P para fabricação de fertilizantes, visto que os depósitos são finitos. (TIESEN, 2008).

A adubação fosfatada está relacionada com a nutrição das plantas primeiramente porque um adequado suprimento de P permite maior desenvolvimento das raízes e isso leva à maior

absorção de nutrientes (HANSEL, 2013). Além disso, o P é essencial nos processos de absorção e assimilação ativa de certos nutrientes e ainda há relações de antagonismo (P – Zn, segundo LONERAGAN *et al.*, 1982; OLSEN, 1972) e sinergismo (P – Mg, segundo WILKINSON *et al.*, 1999) deste com outros nutrientes. Da mesma forma, a simbiose micorrízica beneficia nutricionalmente as plantas, havendo relatos de maior absorção de N, S, Zn, Fe e, principalmente, P em plantas com micorrizadas (CHIU; PASZKOWSKI, 2019; GONZÁLEZ-GUERRERO *et al.*, 2005; GOVINDARAJULU *et al.*, 2005; ALLEN; SHACHAR-HILL, 2009).

Nesse sentido, os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são seres simbiotes obrigatórios que dependem dos vegetais para completarem seu ciclo e se multiplicarem (KULKARNI *et al.*, 1997). Enquanto as plantas fornecem aos FMA carboidratos e possibilitam seu desenvolvimento (WANG; QIU, 2006), os fungos beneficiam as plantas colonizadas ao desenvolverem hifas que se difundem no solo, aumentam o volume de solo explorado e, com isso, aumentam a absorção de água e nutrientes, principalmente de P (BLEVINS, 1999; SMITH; READ, 2010; CHIU; PASZKOWSKI, 2019). Desse modo, a simbiose resulta em maior produção de fotoassimilados e acúmulo de biomassa pelas plantas (BOWLES *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2017).

A adequada nutrição de plantas é essencial para garantir bom desenvolvimento das mesmas e boa produtividade das culturas agrícolas, incluindo as mais cultivadas no mundo: soja, milho, trigo e arroz (FAOSTAT, 2019). Sabe-se que deficiências nutricionais podem levar a menor desenvolvimento das plantas e consequente menor produtividade, enquanto plantas bem nutridas se desenvolvem mais, o que leva a maior produtividade agrícola (TAIZ *et al.* 2017).

Desse modo, o objetivo desse trabalho foi verificar como a adubação fosfatada, a inoculação de um fungo micorrízico arbuscular e a interação entre ambos podem influenciar na nutrição das plantas de milho e dos grãos produzidos.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

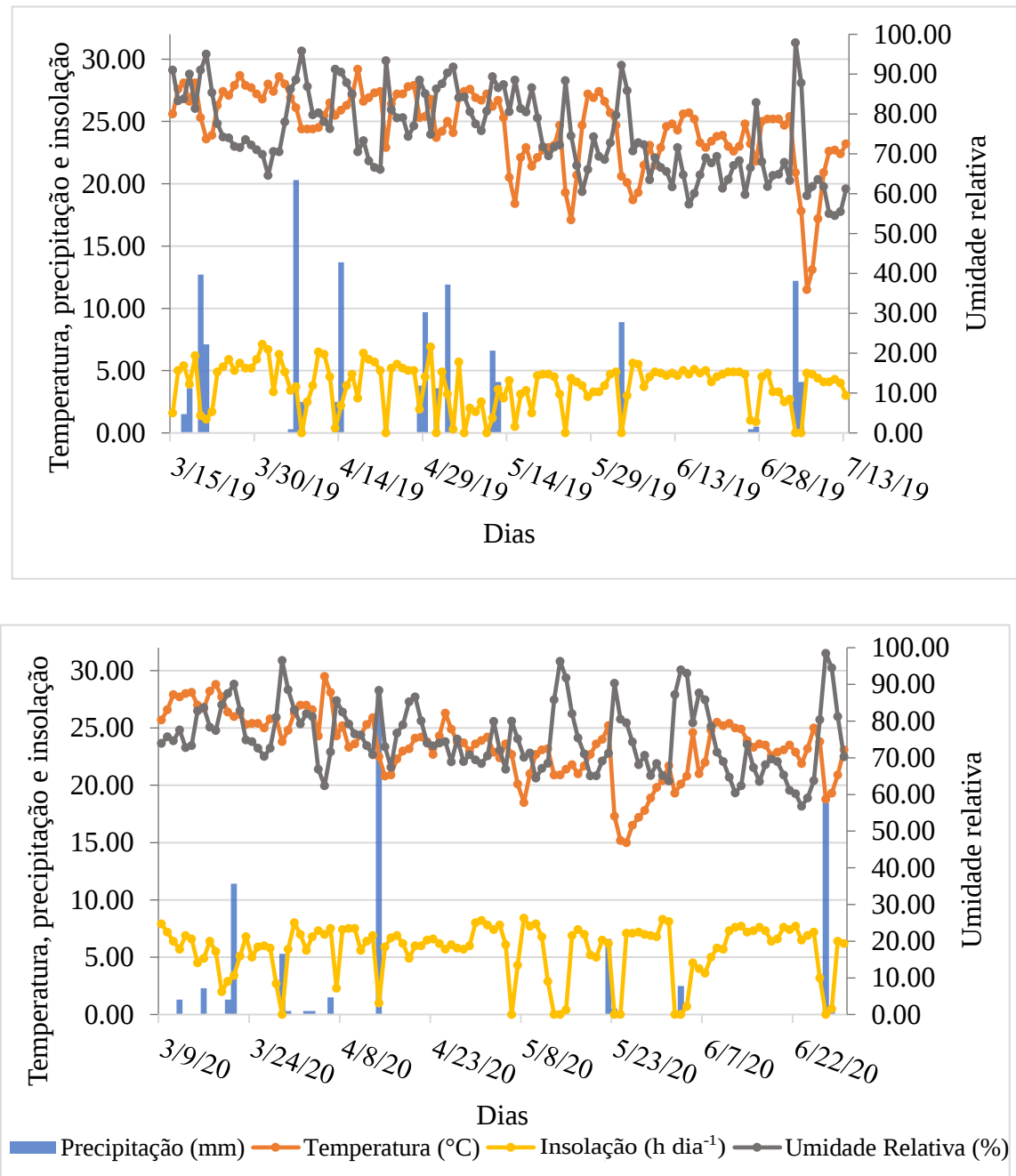
4.2.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido nas safras de 2019 e 2020 em duas áreas diferentes pertencentes à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da FEIS/UNESP, situada no município

de Selvíria/MS, Brasil. A área tem altitude média de 358 m e pertence a área do bioma Cerrado. As duas áreas utilizadas, distantes entre si cerca de 800m, se assemelhavam pela fertilidade do solo, manejo e histórico de cultivo, incluindo sistema plantio direto em fase de implantação e cultivo de *Pennisetum glaucum* (milheto) como planta de cobertura antes do milho.

Segundo Alvares *et al.* (2013), o clima da região é do tipo Aw na classificação de Köppen, com precipitação média de 1322 mm ao ano e temperatura média de 23°C ao ano. As informações de temperatura média, precipitação pluvial, umidade relativa do ar e insolação durante o experimento são descritas na Figura 7.

Figura 7 - Dados climáticos de precipitação (mm), temperatura média (°C), insolação (h dia⁻¹) e umidade relativa do ar média (%) referentes ao período de condução do experimento. Selvíria/MS, 2019 e 2020



Nota: Dados disponíveis em clima.feis.unesp.br.

Fonte: Elaborado com base nos

Em 2019, os atributos químicos do solo obtidos para a camada de 0,00-0,20 m foram: 16 mg dm⁻³ de P (resina), 6 mg dm⁻³ de S-SO₄; 21 g dm⁻³ de matéria orgânica.; 5,2 de pH (CaCl₂); 1,8; 28,0; 18,0 e 31,0 mmol_c dm⁻³ de K, Ca, Mg e H+Al, respectivamente; 3,6; 21,0; 23,4 e 0,9 mg dm⁻³ de Cu, Fe, Mn e Zn (DTPA), respectivamente; 0,24 mg dm⁻³ de B (água

quente) e 61% de saturação por bases. Em 2020, os dados de fertilidade do solo foram: 25 mg dm^{-3} de P (resina), 3 mg dm^{-3} de S- SO_4 ; 18 g dm^{-3} de matéria orgânica.; 5,0 de pH (CaCl_2); 0,7; 19,0; 16,0 e 31,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de K, Ca, Mg e H+Al, respectivamente; 1,6; 25,0; 11,1 e 0,6 mg dm^{-3} de Cu, Fe, Mn e Zn (DTPA), respectivamente; 0,27 mg dm^{-3} de B (água quente) e 54% de saturação por bases. Nas duas áreas a classificação dos solos corresponde à Latossolo Vermelho Distrófico típico, argiloso (SANTOS *et al.*, 2018).

Além da fertilidade do solo, realizou-se a contagem do número de esporos de FMA no solo para determinar o número médio de esporos de FMA no solo. Para isso, foi coletada uma amostra composta da área em 2019 e outra em 2020 e realizou-se 5 mensurações seguindo a metodologia de Novais *et al.* (2017), obtendo-se a média de 630,80 esporos por 50 mL de solo em 2019 e de 669,76 esporos por 50 mL de solo em 2020.

4.2.2 Material biológico

No ano de 2019, foi utilizado o híbrido simples de milho (*Zea mays* L.) AG 7098® (produto comercial) cujas sementes receberam tratamento químico industrial com metalaxil + tiabendazol + fludioxonil (2,0 + 15,0 + 2,5 g para 100 kg sementes); deltametrina (0,2 g para 100 kg sementes); pirimifós metílico (0,8 g para 100 kg sementes). Em 2020, um híbrido simples experimental codificado (ainda não lançado no mercado) da empresa Bayer, cujas sementes não receberam tratamento químico.

Para a inoculação das sementes, foi utilizado um inoculante sólido (pó) comercial contendo 20.800 propágulos infectivos por grama do fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Smith) Walker & Schüssler.

4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi instalado utilizando-se delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com as parcelas recebendo as doses de P_2O_5 e as subparcelas, as doses do inoculante micorrízico. As doses de P_2O_5 utilizadas corresponderam à 0; 25; 50; 75 e 100% do recomendado por Raij e Cantarella (1997) para a cultura do milho, de acordo com a fertilidade do solo e a expectativa de produtividade. Assim, em 2019 isso correspondeu às doses de 0; 30; 60; 90 e 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 e em 2020, às doses de 0; 15; 30; 45 e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . As doses do inoculante de *R. intraradices* utilizadas foram de 0; 60; 120 e 180 g ha^{-1} .

Cada parcela recebeu uma dose da adubação fosfatada correspondente e possuía 4 subparcelas com 4 linhas de 7 metros de comprimento cada e espaçamento entre linhas de 0,85 m, onde foram casualizadas as doses do inoculante micorrízico. Foi considerada como área útil as duas linhas centrais de cada subparcela, desconsiderando-se 0,5 m das extremidades.

4.2.4 Instalação e condução do experimento

A semeadura do experimento ocorreu nos dias 15/03/2019 e 10/03/2020, no primeiro e segundo ano, respectivamente. Nos dois anos do experimento, antes da semeadura, foi realizado manejo da cobertura vegetal (*Pennisetum glaucum*) com rolo faca. Em 2019, a adubação de semeadura forneceu 45 kg ha⁻¹ de N e 60 kg ha⁻¹ de K₂O e, no ano seguinte, os valores foram de 33 kg ha⁻¹ de N e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, de acordo com as recomendações de Raij e Cantarella (1997), considerando-se a fertilidade do solo e expectativa de produção para o milho. As fontes de N e K₂O foram a ureia e o KCl, respectivamente.

Para as doses da adubação fosfatada, a fonte de P₂O₅ utilizada nos dois anos foi o fertilizante mineral fosfato monoamônico (MAP, 52% de P₂O₅ e 11% de N), regulando a vazão de fertilizante de acordo com a dose da parcela. As aplicações de todos os fertilizantes foram feitas de forma mecanizada, com uso de uma semeadora para plantio direto abastecida com adubo, mas não com sementes.

A inoculação das sementes foi realizada momentos antes da semeadura e uma solução açucarada (10%) foi usada na dose de 300 mL 50 kg⁻¹ de sementes para garantir a aderência do inoculante às sementes. As sementes não inoculadas receberam apenas o recobrimento com a solução açucarada.

A semeadura foi executada com semeadora manual que possibilitou a deposição das sementes em covas distantes entre si em 0,20 m nas linhas de semeadura, o que permitiu obter a população de plantas recomendada (entre 55-60 mil plantas ha⁻¹). Cada bloco do experimento foi semeado por uma única pessoa, garantindo a homogeneidade da semeadura dentro do bloco. Em seguida, a área foi irrigada com lâmina de 15 mm de água.

Para atender a demanda hídrica da cultura do milho durante todo seu ciclo, foi utilizado um sistema fixo de irrigação por aspersão em 2019, com precipitação média de 15 mm h⁻¹ e um pivô central em 2020, com precipitação média de 13 mm h⁻¹.

A emergência da cultura ocorreu nos dias 20/03/2019 e 15/03/2020 no primeiro e segundo anos, respectivamente. A realização da adubação nitrogenada em cobertura foi

realizada em duas etapas. A primeira quando as plantas se encontravam em estágio V₄, aplicando-se 60 kg ha⁻¹ de N em 2019 e 50 kg ha⁻¹ de N em 2020, em ambos os casos tendo como fonte a ureia. Posteriormente, quando as plantas estavam no estágio V₈, foi realizada a segunda aplicação de N, com fornecimento de mais 60 kg ha⁻¹ de N (ureia) nos dois anos.

O manejo fitossanitário e de plantas daninhas realizado nos dois anos foi feito de acordo com o recomendado para a cultura e com acompanhamento das pragas e plantas daninhas predominantes na área, sempre utilizando-se produtos recomendados para a cultura. Não foi necessária a aplicação de fungicidas ao longo do ciclo da cultura.

O florescimento feminino da cultura ocorreu aos 50 DAE e aos 45 DAE em 2019 e 2020, respectivamente e a colheita foi realizada aos 115 DAE em 2019 e 107 DAE em 2020 (após a maturação dos grãos) de forma manual, com a coleta das espigas contidas em duas linhas de 5 m na área útil de cada parcela.

4.2.5 Avaliações realizadas

- a) **Teor de nutrientes foliares (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn): seguindo a metodologia de** Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), por ocasião do florescimento pleno da cultura, foram coletados o terço médio dos limbos de 20 folhas situadas opostamente e abaixo da espiga principal na área útil de cada parcela. Esse material foi lavado em água e seco em estufa de circulação de ar forçado com temperatura à 65 °C até a obtenção de massa constante, sendo depois moídas em moinho tipo Wiley. Em seguida foi realizada a determinação do teor de nutrientes foliar;
- b) **Teor de nutrientes nos grãos (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn):** após a colheita das espigas, as mesmas foram debulhadas para separação de grãos e sabugos. Uma pequena quantidade de grãos (cerca de 20 g) foi separada, seca em estufa de circulação forçada de ar (65°C) até massa constante e moída em moinho tipo Wiley. Com isso as amostras foram analisadas quanto à sua composição nutricional em laboratório, seguindo a metodologia de Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

4.2.6 Análise estatística

Inicialmente realizou-se o diagnóstico para análise de variância, testando a normalidade dos resíduos e a homoscedasticidade utilizando-se o software R. Em seguida, os resultados foram submetidos ao Teste F da Análise de Variância (ANOVA) para os fatores estudados e sua interação. Quando a ANOVA indicou significância para os resultados ($p < 0,05$), foram realizados testes de regressão polinomial para as doses de P ou do inoculante, como fatores isolados. Quando houve significância na interação entre os fatores, foi realizado teste para ajuste de superfície de resposta. Para a ANOVA e os testes de regressão polinomial, foi utilizado o software estatístico SISVAR[®] (FERREIRA, 2019) e para o ajuste das superfícies de resposta, o software Minitab[®]. Não houve análise estatística envolvendo os dois anos conjuntamente, pois o experimento foi realizado em áreas diferentes e com genótipos diferentes.

4.3 RESULTADOS

O teor foliar de nitrogênio no milho não foi influenciado pelos tratamentos utilizados nos dois anos do experimento (Tabela 9). Por outro lado, o teor foliar de P mostrou diferenças significativas em função da interação entre a adubação fosfatada e da inoculação de FMA no ano de 2020 ($p < 0,05$). O maior teor de P foliar foi observado nas doses máximas da adubação fosfatada (região em torno de 100%) combinada com a inoculação de FMA em valores entre 120 e 140 g ha⁻¹ (Tabela 10 e Figura 8 [A]). Também foram observados teores elevados de P foliar, situada na combinação das doses de P entre 20-60% combinados com a inoculação de FMA em doses entre 20-80 g ha⁻¹ aproximadamente.

Tabela 9 - Teores foliares de macronutrientes em milho por ocasião do florescimento da cultura em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	N		P		K		Ca		Mg		S	
	g kg ⁻¹											
	Fósforo (%)	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019
0,0	34,39	34,14	3,79	3,03	17,33	16,77	3,90	1,98	3,64	2,25	3,08	2,30
25,0	34,31	35,15	4,18	3,21	18,30	16,55	3,45	2,11	3,23	2,31	3,26	2,42
50,0	34,07	34,14	3,88	3,30	20,34	17,22	3,27	2,22	3,28	2,66	2,85	2,40
75,0	34,32	34,37	3,54	3,16	21,81	16,47	3,43	2,17	3,36	2,64	3,02	2,35
100,0	33,79	34,32	3,72	3,31	19,89	16,50	3,88	2,18	3,67	2,63	3,04	2,48
Micorriza (g ha ⁻¹)												
0	34,41	34,34	3,74	3,19	20,39	16,39	3,70	2,10	3,58	2,53	2,97	2,38
60	33,53	34,08	3,77	3,17	19,12	17,04	3,73	2,17	3,50	2,47	3,13	2,41
120	35,01	34,73	4,02	3,15	18,70	16,68	3,49	1,99	3,32	2,39	3,12	2,37
180	33,75	34,54	3,76	3,30	19,93	16,70	3,43	2,25	3,34	2,61	2,98	2,42
ANOVA (p-valor)												
P	0,951	0,695	0,198	0,206	0,036	0,844	0,013	0,567	0,152	0,045	0,197	0,167
M	0,095	0,880	0,510	0,449	0,417	0,742	0,301	0,284	0,060	0,230	0,417	0,960
P x M	0,088	0,36	0,587	0,026	0,477	0,372	0,756	0,858	0,651	0,904	0,743	0,400
Média Geral	34,17	34,42	3,822	3,20	19,53	16,70	3,59	2,13	3,43	2,50	3,05	2,39
CV1 (%)	6,25	5,63	15,37	9,12	14,88	11,06	11,05	16,96	13,76	13,73	12,06	6,83
CV2 (%)	5,01	6,57	15,39	8,7	15,43	9,52	14,01	17,52	8,58	11,61	11,16	11,32

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

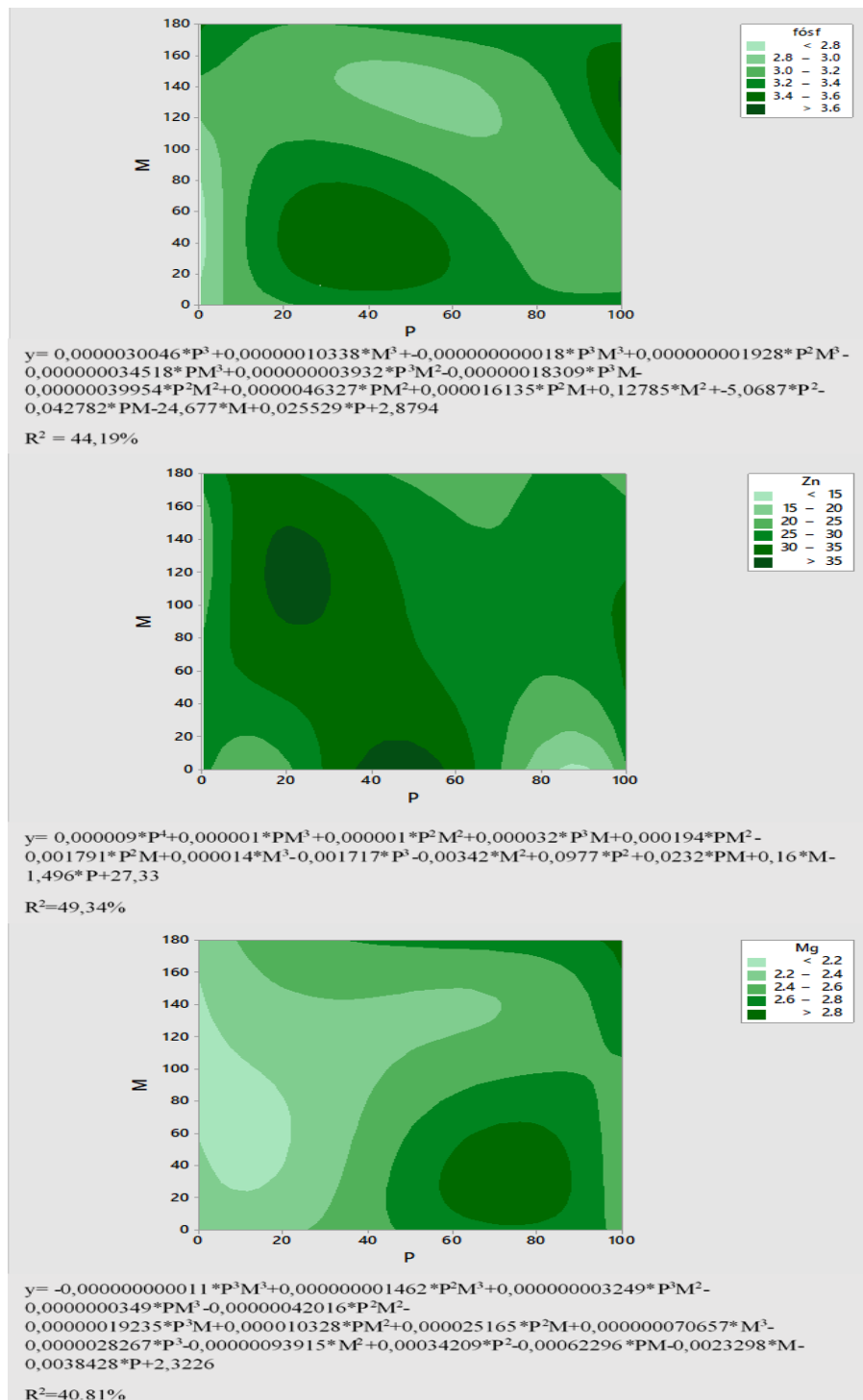
Tabela 10 - Teores de micronutrientes nos grãos de milho colhidos em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	Cu		Fe		Mn		Zn	
	mg kg ⁻¹							
Fósforo (%)	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	2.94	10.33	20.25	52.92	10.25	8.83	39.00	42.92
25,0	5.92	13.39	19.08	56.00	10.33	9.17	38.17	41.67
50,0	3.33	13.42	19.50	56.75	10.00	9.00	36.08	41.83
75,0	1.58	9.00	21.33	53.33	9.75	8.92	35.67	42.75
100,0	3.33	13.08	20.25	59.36	10.08	9.29	35.25	39.99
Micorriza (g ha ⁻¹)								
0,0	3.53	13.00	21.67	54.93	10.67	9.23	37.73	43.26
60,0	3.53	10.60	18.80	55.55	9.27	8.73	34.93	41.00
120,0	3.20	9.60	19.13	54.40	10.20	9.07	34.93	42.07
180,0	3.42	14.98	20.73	57.80	10.20	9.13	39.73	41.00
ANOVA (p-valor)								
P	0.257	0.536	0.994	0.580	0.998	0.933	0.973	0.795
M	0.967	0.339	0.861	0.337	0.669	0.614	0.402	0.145
P x M	0.530	0.250	0.724	0.062	0.141	0.174	0.145	0.250
Média Geral	3.42	12.04	20.08	55.67	10.08	9.04	36.83	41.83
CV1 (%)	124.34	71.20	64.33	18.88	49.52	15.92	45.68	15.01
CV2 (%)	60.25	72.13	52.19	9.61	31.13	11.83	24.48	7.17

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

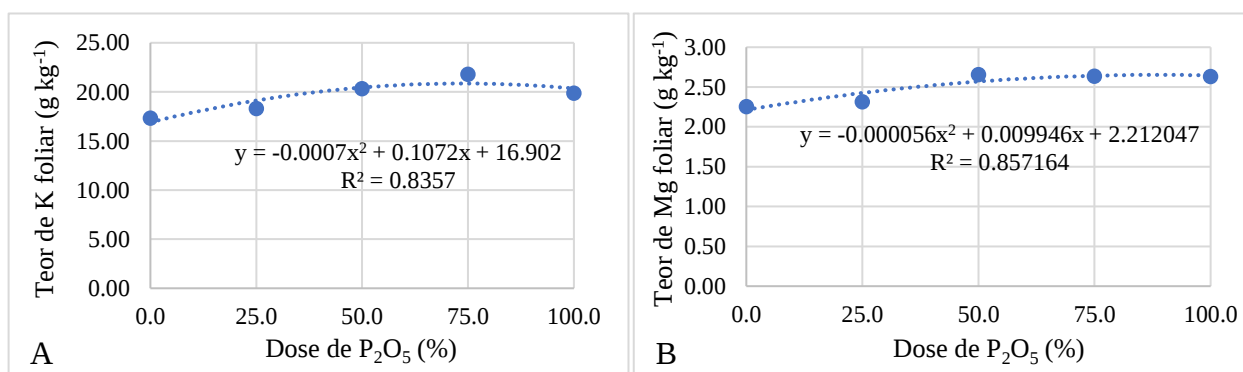
Figura 8 - Teor foliar de fósforo - P [A], Zinco - Zn [B] e teor nos grãos de Magnésio - Mg [C] em função de doses de P_2O_5 aplicadas no solo e doses do inoculante micorrízico na semente de milho na safra de 2020



Fonte: Dados do próprio autor.

Houve efeito da adubação fosfatada sobre o teor foliar de K no ano de 2019 ($p < 0,05$) com ajuste de equação de regressão quadrática ($R^2 = 83,57\%$) e ponto de máximo na dose de 76,57% de P_2O_5 (Figura 9 [A]). No mesmo ano, o teor foliar de Ca foi influenciado pela adubação fosfatada, mas sem ajuste de uma equação de regressão com significado biológico. Em 2020, os teores de K e Ca não foram influenciados pelos tratamentos.

Figura 9 - Teores foliares de K em 2019 [A] e Mg em 2020 [B] em milho em função da adubação fosfatada



Fonte: Dados do próprio autor.

Foi observado efeito da adubação fosfatada sobre o teor foliar de Mg em 2020 ($p < 0,05$), com ajuste de equação de regressão quadrática ($R^2 = 85,72\%$) e ponto de máximo na dose de 88,80% de P_2O_5 (Figura 9 [B]). Os teores foliares de S não foram influenciados pelos tratamentos com adubação fosfatada ou inoculação micorrízica e tampouco pela interação entre ambos nos dois anos do experimento.

Em relação aos teores de micronutrientes foliares, Cu e Mn não apresentaram diferenças em função dos tratamentos utilizados em 2019 e 2020 (Tabela 11). Por outro lado, em 2019 houve efeito da adubação fosfatada sobre o teor de Fe foliar ($p < 0,05$), mas não houve ajuste de uma equação de regressão para o comportamento encontrado. Finalmente, houve diferenças no teor de Zn foliar em função da interação entre a adubação fosfatada e inoculação micorrízica ($p < 0,05$). Os maiores teores foliares de Zn ocorrem quando não há inoculação, mas há adubação fosfatada em doses intermediárias (aproximadamente entre 35-55% de P_2O_5) e quando a adubação fosfatada é limitada entre 20-30% de P_2O_5 e há inoculação micorrízica com doses entre 90 e 150 $g\ ha^{-1}$ (Tabela 10 e Figura 8 [B]).

Tabela 11 - Teores foliares de micronutrientes no milho por ocasião do florescimento da cultura em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	Cu		Fe		Mn		Zn	
	mg kg ⁻¹							
Fósforo (%)	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
0,0	16,53	3,25	165,47	124,17	112,56	52,00	33,67	26,08
25,0	15,06	3,58	179,14	140,33	118,36	55,42	34,69	31,43
50,0	15,67	3,50	159,67	159,42	98,92	51,17	32,67	30,32
75,0	14,50	3,58	158,75	118,33	108,67	49,00	34,25	24,33
100,0	15,58	3,33	160,67	137,17	115,08	58,42	32,75	26,94
Micorriza (g ha ⁻¹)								
0,0	15,31	3,40	163,13	136,13	111,80	51,27	32,47	27,60
60,0	15,27	3,67	165,11	123,67	113,07	56,00	34,13	29,54
120,0	15,73	3,33	165,22	147,20	108,87	54,27	33,73	28,40
180,0	15,55	3,40	165,49	136,53	109,13	51,27	34,09	25,75
ANOVA (p-valor)								
P	0,179	0,90	0,025	0,5701	0,365	0,726	0,772	0,115
M	0,899	0,577	0,962	0,7493	0,762	0,244	0,521	0,102
P x M	0,446	0,740	0,558	0,5794	0,258	0,367	0,423	0,010
Média Geral	15,47	3,45	164,74	135,883	110,72	53,20	33,60	27,82
CV1 (%)	11,81	30,23	7,93	46,20	20,98	33,68	13,81	22,84
CV2 (%)	12,38	20,27	8,19	43,01	11,51	14,09	10,25	14,74

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

No que se refere ao conteúdo nutricional dos grãos produzidos (Tabela 12), não foram observadas diferenças nos teores de N e K em função dos tratamentos utilizados nos dois anos do trabalho. Por outro lado, o teor de P nos grãos foi influenciado pela inoculação micorrízica em 2020 ($p < 0,05$), com ajuste de uma equação de regressão quadrática (Figura 10 [A], $R^2 = 91,13\%$) com ponto de mínimo na dose de 96,42 g ha⁻¹ de inoculante. Apesar da significância e do ajuste de regressão, o resultado indicando ponto de mínimo na inoculação não tem significado biológico.

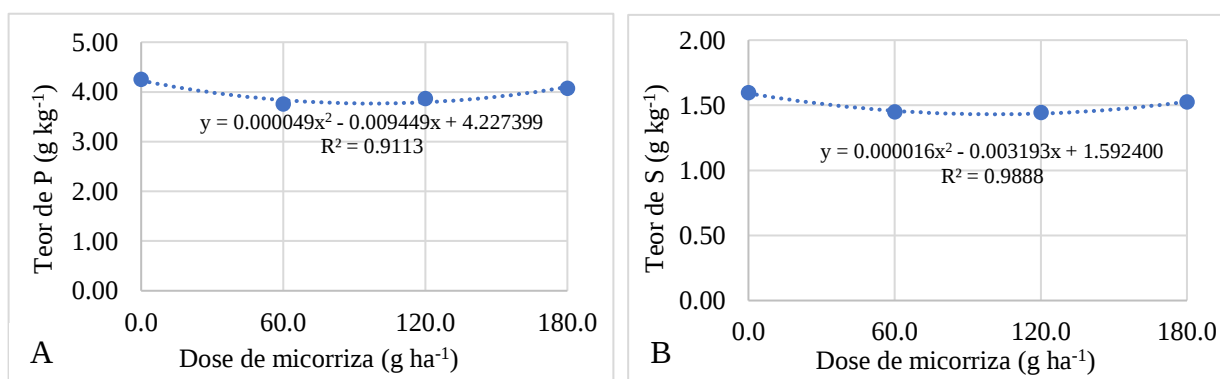
Tabela 12 - Teores de macronutrientes nos grãos de milho colhidos em função das doses de P_2O_5 e da inoculação com *Rhizophagus intraradices* nas sementes

TRATAMENTOS	N		P		K		Ca		Mg		S	
	g kg ⁻¹											
	Fósforo (%)	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019
0,0	17,23	16,62	3,53	4,03	4,32	4,68	0,015	0,428	1,51	4,56	1,53	1,10
25,0	16,72	17,77	3,63	4,06	4,37	4,95	0,025	0,425	1,55	4,55	1,56	1,05
50,0	16,37	18,04	3,84	4,21	4,28	4,93	0,023	0,453	1,56	4,66	1,51	1,07
75,0	16,43	17,31	3,63	4,01	4,18	4,79	0,026	0,413	1,49	4,63	1,46	1,17
100,0	16,58	16,99	3,81	3,64	4,32	5,02	0,017	0,492	1,55	4,90	1,45	1,19
Micorriza (g ha ⁻¹)												
0,0	16,87	16,81	3,78	4,25	4,47	5,09	0,020	0,454	1,62	4,85	1,59	1,13
60,0	16,32	16,58	3,45	3,76	4,10	4,80	0,018	0,457	1,42	4,55	1,45	1,06
120,0	16,77	18,27	3,68	3,87	4,26	4,70	0,023	0,441	1,49	4,59	1,44	1,14
180,0	16,71	17,73	3,84	4,07	4,35	4,92	0,023	0,418	1,59	4,64	1,52	1,13
ANOVA (p-valor)												
P	0,909	0,956	0,968	0,172	0,993	0,385	0,414	0,009	0,995	0,006	0,620	0,098
M	0,655	0,374	0,651	0,010	0,421	0,061	0,753	0,247	0,370	<0,001	0,029	0,120
P x M	0,298	0,247	0,203	0,068	0,192	0,519	0,340	0,206	0,188	<0,001	0,089	0,829
Média Geral	16,67	17,34	3,69	3,99	4,29	4,88	0,02	0,44	1,53	4,66	1,50	1,12
CV1 (%)	14,68	29,14	34,89	12,54	23,62	9,07	76,41	9,01	28,92	3,61	13,01	11,64
CV2 (%)	7,58	17,00	24,55	10,08	14,38	7,93	71,87	12,83	21,54	3,63	9,91	9,17

Nota: CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 10 - Teores de P em 2020 [A] e S em 2019 [B] nos grãos de milho em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares



Fonte: Dados do próprio autor.

Foi constatado efeito da adubação fosfatada sobre o teor de Ca dos grãos em 2020, porém sem ajuste de uma equação de regressão para o comportamento dessa variável em função das doses utilizadas. No caso do Mg, houve efeito da interação entre os dois fatores em 2020 ($p < 0,05$). Observa-se que a maior concentração de Mg ocorre com a combinação da maior dose de P_2O_5 com a maior dose de inoculação (Tabela 10 e Figura 8 [C]). Além dessa região, há

outra com alto teor de Mg nos grãos, definida por doses de P_2O_5 altas, mas não plenas (60-80%) e inoculação de FMA, mas em dose inferior a 60 g ha^{-1} .

O teor de S nos grãos também foi influenciado pela inoculação micorrízica em 2019 ($p < 0,05$), com ajuste de uma equação de regressão quadrática (Figura 10 [B]), com $R^2 = 98,88\%$ e ponto de mínimo na dose de $99,78 \text{ g ha}^{-1}$ de inoculante. Apesar da significância e do ajuste da regressão, não há significado biológico para a equação ajustada.

Não houve efeito da adubação fosfatada, da inoculação micorrízica ou da interação entre ambos sobre os teores de micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn) nos grãos de milho em 2019 e 2020.

4.4 DISCUSSÃO

O teor de N foliar não foi influenciado pela adubação fosfatada ou inoculação de FMA, assim como ocorreu para os teores de Cu e Mn foliares, apesar de ambos serem capazes de incrementar a absorção desses elementos (GOVINDARAJULU *et al.*, 2005; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; LIMA *et al.*, 2011, TRIGO *et al.*, 1997). Isso decorre da alta presença de FMA nativos no solo em função do manejo desse solo envolvendo sistema plantio direto, cultivo de plantas de cobertura e manejo racional da fertilidade do solo (LEHMAN *et al.*, 2012; CAMERON, 2016) que garantiram a ocorrência da simbiose micorrízica nas plantas de milho em níveis suficientes para permitirem uma absorção de N, Cu e Mn equivalentes à das plantas inoculadas. Além disso, o teor de P disponível no solo, considerado médio para os dois anos de cultivo (RAIJ *et al.*, 1997), pode ter sido suficiente para garantir desenvolvimento adequado das raízes e permitir absorção desses nutrientes nas parcelas com doses reduzidas de P_2O_5 a níveis semelhantes com as plantas que receberam 100% da recomendação para esse nutriente.

É importante ressaltar também que os teores de Cu e Mn nos solos das áreas dos dois anos de experimento são considerados altos e isso pode ter sido suficiente para a demanda das plantas de milho, não resultando em diferenças com as plantas com maior adubação fosfatada e inoculação de FMA (RAIJ *et al.*, 1997).

A interação entre adubação fosfatada e inoculação de FMA observada para os teores foliares de P indicam um comportamento já estabelecido pela literatura de que a adubação fosfatada, ao fornecer mais P disponível para as raízes, resulta em maior absorção e, portanto, maior concentração desse nutriente nos tecidos vegetais (LIMA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2002). Por outro lado, Bressan *et al.* (2001) demonstram que a inoculação com FMA também incrementa o teor desse nutriente nos tecidos vegetais, pois a simbiose micorrízica induz maior

crescimento de raízes e as hifas micorrízicas se estendem pelo solo para além da zona de depleção das raízes, absorvendo mais nutrientes e água para as plantas, principalmente o P. Assim, as micorrizas podem aumentar a eficiência de absorção de P pelas plantas e, com isso, melhorar a eficiência de aproveitamento de fertilizantes fosfatados (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SMITH; READ, 2010). E os resultados do presente trabalho demonstraram exatamente isso: a combinação da maior dose de P_2O_5 com a maior inoculação de FMA proporcionou a maior absorção de P e, conseqüentemente, resultou em maior teor do nutriente nas folhas.

O teor foliar de K e Mg tiveram comportamento semelhante em função da adubação fosfatada, com máximo teor nas doses de 76,57% e 88,80% da recomendação de P_2O_5 . Isso porque a maior disponibilidade de P permite às plantas desenvolverem maior sistema radicular e, com isso, explorarem maior volume de solo. Dessa forma, há maior absorção de nutrientes no solo, resultando em maior concentração foliar (Trigo *et al.*, 1997). No caso do Mg, há também sinergismo com o P, ou seja, a presença do P induz maior absorção de Mg (WILKINSON *et al.*, 1999). Os teores de K no solo são considerados médio e muito baixo em 2019 e 2020, respectivamente e os teores de Mg no solo são considerados altos nos dois anos (RAIJ *et al.*, 1997).

O teor foliar de Zn também foi influenciado pela interação entre a adubação fosfatada e inoculação de FMA, com o maior teor ocorrendo com 35-55% de P_2O_5 e com inoculação inferior à 20 g ha⁻¹ e com 20-30% de P_2O_5 e 90-150 g ha⁻¹ de FMA. A redução do Zn em doses maiores de P_2O_5 decorre do antagonismo desses dois nutrientes no processo de absorção pelas raízes, devido à formação de $Zn_3(PO_4)_2$ que é insolúvel (LINDSAY, 1972). No caso em que a presença de FMA inoculado resulta em alto teor de Zn, isso decorre dos benefícios da simbiose micorrízica ao desenvolvimento radicular e promovendo maior absorção de nutrientes, incluindo o Zn (SMITH; READ, 2010), GONZÁLEZ-GUERRERO *et al.*, 2005).

No caso dos teores nutricionais nos grãos colhidos, a ausência de efeitos dos tratamentos para os teores de N, K e micronutrientes se justifica pelos teores de P_2O_5 no solo, que foi suficiente para atender a demanda das plantas, permitir o desenvolvimento radicular adequado e a conseqüente absorção desses nutrientes para atender a demanda da formação dos grãos (LIMA *et al.*, 2011; RAIJ *et al.*, 1997). A alta ocorrência de FMA nativos no solo contribuiu para a ocorrência da simbiose, equiparando os resultados do tratamento sem inoculação com os tratamentos inoculados nesses nutrientes em questão (VERBRUGGEN *et al.*, 2013).

O teor elevado de Mg com a combinação da máxima dose de P_2O_5 e da inoculação de FMA se deve à função combinada de ambos promovendo maior desenvolvimento radicular,

maior exploração de solo e absorção de nutrientes, além do efeito sinérgico entre P e Mg para a absorção radicular (SMITH; READ, 2010; LIMA *et al.*, 2011; WILKINSON *et al.*, 1999).

4.5 CONCLUSÃO

A adubação fosfatada em níveis elevados proporciona melhor absorção dos nutrientes do solo, com benefícios expressivos para P, K e Mg. A inoculação com *R. intraradices* pode afetar a absorção de nutrientes pelas plantas, com destaque para P e S, mas essa prática nem sempre resulta em benefícios evidentes em função da comunidade de FMA nativa no solo. A inoculação também aumenta a eficiência da adubação fosfatada, de modo que sua combinação proporciona teores de P e Mg maiores do que com a adubação ou inoculação isoladamente.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. W.; SHACHAR-HILL, Y. Sulfur transfer through an arbuscular mycorrhiza. **Plant Physiology**, Washington, v. 149, n. 1, p. 549-560, 2009.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BLEVINS, D.G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 4-5, 1999.
- BOWLES, T. M.; BARRIOS-MASIAS, F. H.; CARLISLE, E. A.; CAVAGNARO, T. R.; JACKSON, L. E. Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 566, p. 1223–1234, 2016.
- BRESSAN, W.; SIQUEIRA, J. O.; VASCONCELLOS, C. A.; PURCINO, A. A. C. Fungos micorrízicos e fósforo, no crescimento, nos teores de nutrientes e na produção do sorgo e soja consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 2, p. 315-323, 2001.
- CAMERON, J. **Effects of seed applied fungicide on arbuscular mycorrhizal colonization of South Dakota cultivars of oat, soybean, and corn**. 2016. Thesis. (Master Science) - South Dakota State University, Dakota. Disponível em: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/1059>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- CHEN, S.; ZHAO, H.; ZOU, C.; LI, Y.; CHEN, Y.; WANG, Z. *et al.* Combined Inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. **Frontiers Microbiology**. Lausanne, v. 8, p. 25–16, 2017.
- CHIU, C. H.; PASZKOWSKI, U. Mechanisms and impact of symbiotic phosphate acquisition. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, New York, v. 11, n. 6, p. a034603, 2019.
- CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Viçosa, v. 3, p. 218-224, 2008.
- FAOSTAT 2018. **Database of Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- GONZÁLEZ-GUERRERO, M.; AZCÓN-AGUILAR, C.; MOONEY, M.; VALDERAS, A.; MACDIARMID, C. W.; EIDE, D. J.; FERROL, N. Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. **Fungal Genetics and Biology**, Orlando, v. 42, n. 2, p. 130-140, 2005.

GOVINDARAJULU, M.; PFEFFER, P. E.; JIN, H.; ABUBAKER, J.; DOUDS, D. D.; ALLEN, J. W.; BÜCKING, H.; LAMMERS, P. J.; SHACHAR-HILL, Y. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Nature**, Washington, v. 435, n. 7043, p. 819-823, 2005.

HANSEL, F. D. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KULKARNI, S. S.; RAVIRAJA, N. S.; SRIDHAR, K. R. Arbuscular mycorrhizal fungi of tropical sand dunes of west coast of India. **Journal of Coastal Research**, Fort Lauderdale, v. 13, n. 3, p. 931-936, 1997.

LEHMAN, R.; TAHERI, W.; OSBORNE, S.; BUYER, J.; DOUDS, D. Fall cover cropping can increase arbuscular mycorrhizae in soils supporting intensive agricultural production. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 61, p. 300-304, 2012.

LIMA, R. D. L. S. D.; SEVERINO, L. S.; GHEYI, H. R.; SOFIATTI, V.; ARRIEL, N. H. C. Efeito da adubação fosfatada sobre o crescimento e teor de macronutrientes de mudas de pinhão manso. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 950-956, 2011.

LINDSAY, W. L. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 41-57.

LONERAGAN, J. F.; GROVE, T. S.; ROBSON, A. D.; SNOWBALL, K. Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interactions in plants. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 43, p. 966-972, 1979.

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

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006.

NOVAIS, C. B.; BORGES, W. L.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SBRANA, C.; GIOVANNETTI, M.; SIQUEIRA, J. O. **Técnicas básicas em micorrizas arbusculares**. Lavras: Ed. UFLA, 2017.

OLSEN, S. R. Micronutrients Interactions. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 243-264.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 285 p. Boletim Técnico, 100.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas/Fundação IAC, 1997. p. 43-73.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2007.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C. F.; OLIVEIRA, J. B. CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 356 p.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SILVA, R. J. S.; VAHL, L. C. Resposta do feijoeiro à adubação fosfatada num Neossolo Litólico distrófico da região sul do Rio Grande do Sul. **Current Agricultural Science and Technology**, Pelotas, v. 8, n. 2, p. 129-132, 2002.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. New York: Academic press, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TIESSSEN, H. Phosphorus in the global environment. In: WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. (ed). **The ecophysiology of plant-phosphorus interactions**. Springer, Dordrecht: Springer, 2008. Plant ecophysiology, 7.

TRIGO, L. F. N.; PESKE, S. T.; GASTAL, M. F.; VAHL, L. C.; TRIGO, M. F. O. Efeito o conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 19, p. 111-115, 1997.

VERBRUGGEN, E.; VAN DER HEIJDEN, M. G.; RILLIG, M. C.; KIERS, E. T. Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: factors determining inoculation success. **New Phytologist**, Cambridge, v. 197, n. 4, p. 1104-1109, 2013.

WANG, B.; QIU, Y. L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v. 16, n. 5, p. 299-363, 2006.

WILKINSON, S. R.; MALCON, E. S.; SUMNER, M. E. Nutrient interactions in soil and plant nutrition. In: SUMNER, M. E. (ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. 112 p. FL D89 –D.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

A combinação das doses de P_2O_5 na semeadura e da inoculação de *Rhizophagus intraradices* nas sementes do milho, cultivado na segunda safra no Cerrado brasileiro, demonstraram que a inoculação de *R. intraradices* beneficia o desenvolvimento das plantas de milho desde as fases iniciais do desenvolvimento vegetativo, os teores foliares, acúmulo na parte aérea e teor nos grãos de alguns nutrientes. Além disso, a inoculação demonstrou potencial para proporcionar melhor aproveitamento da adubação fosfatada e incrementar a produtividade da cultura. Porém em condições ambientais ótimas, como em solos de boa fertilidade e em sistemas agrícolas que beneficiam a comunidade de FMA nativos, a inoculação micorrízica resulta em benefícios menos expressivos. Por fim, o trabalho reforçou as informações sobre a adubação fosfatada, demonstrando que o fornecimento adequado desse nutriente é essencial para o melhor desenvolvimento, nutrição e produtividade do milho, mas cujos efeitos imediatos podem não ser visualizados em solos com boa fertilidade.

Desse modo, os estudos envolvendo a inoculação com FMA devem ser continuados para maior entendimento das respostas da inoculação em solos de diferentes fertilidades, com diferentes níveis de populações nativas de FMA e em manejos diversos. Além disso, experimentos em campo com o tema ainda são escassos, devendo ser ampliados para se determinar como inserir essa tecnologia em sistemas agrícolas e se é possível de fato reduzir a adubação fosfatada quando se inocula FMA ou quando a população nativa do solo é elevada.

APÊNDICE A – Imagens dos experimentos

Figura A.1. Leitura do teste de germinação realizado com as sementes de milho utilizadas na semeadura do experimento. Ilha Solteira/SP, 25/02/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.2. Preparo da área para semeadura do experimento, manejo mecânico da palhada remanescente à esquerda e aplicação de fertilizante com a semeadora de plantio direto à direita. Selvíria/MS, 15/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.3. Aspecto da cultura por ocasião da primeira adubação nitrogenada em cobertura (V₄). Selvíria/MS, 03/04/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.4. Primeira e segunda pulverização de defensivos agrícolas na cultura de milho



(esquerda e direita, respectivamente). Selvíria/MS, 05/04/2019 e 10/04/2019.

Fonte: Próprio autor.

Figura A.5. Aspecto geral da cultura aos 33 DAE. Selvíria/MS, 22/04/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.6. Emissão de pendão e de espigas pelas plantas no experimento, poucos dias antes do pleno florescimento feminino, aos 47 DAE. Selvíria/MS, 06/05/2019.



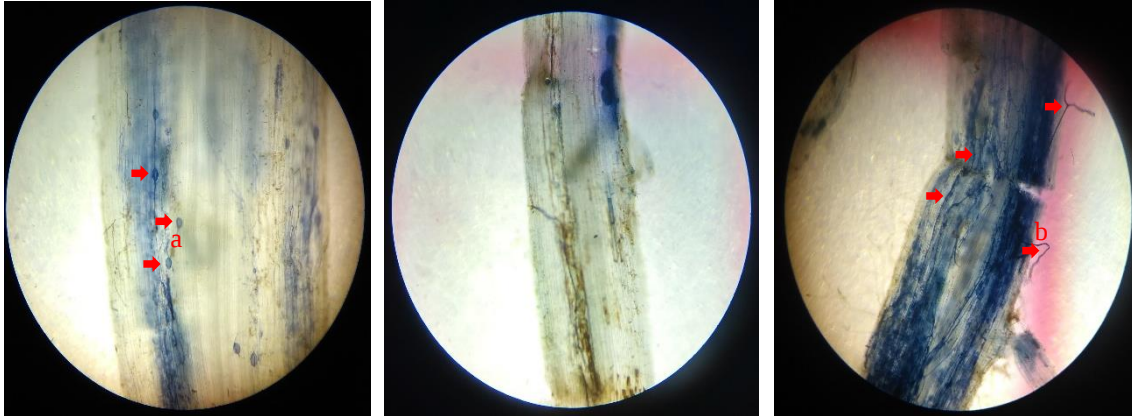
Fonte: Próprio autor.

Figura A.7. Aspecto geral da cultura e da espiga após a ocorrência do florescimento e fecundação. Selvíria/MS, 31/05/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.8. Fragmentos de raízes de milho colonizadas por fungos micorrízicos arbusculares. Em azul se verifica as estruturas do fungo como vesículas (a) e hifas (b). Jaboticabal/SP, 05/06/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.9. Aspecto da cultura e das espigas na fase final da maturação, poucos dias antes da colheita. Selvíria/MS, 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.10. Aplicação das doses de P_2O_5 no sulco de semeadura das parcelas do experimento com semeadora de plantio direto. Selvíria/MS, 09/03/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.11. Sementes colocadas à sombra para secagem após inoculação (à esquerda) e semeadura manual da cultura (à direita). Selvíria/MS, 10/03/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.12. Emergência da cultura. Selvíria/MS, 15/03/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.13. Pulverização para controle de pragas e plantas daninhas na cultura. Selvíria/MS, 26/03/2020 e 05/04/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.14. Aspectos gerais do desenvolvimento vegetativo da cultura aos 16 DAE (esquerda) e 29 (direita) DAE. Selvíria/MS, 31/03/2020 e 13/04/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.15. Aspectos gerais do desenvolvimento vegetativo da cultura aos 33 DAE. Selvíria/MS, 17/04/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.16. Florescimento pleno da cultura (detalhe para as estruturas de reprodução masculina à esquerda e feminina à direita). Selvíria/MS, 04/05/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.17. Aspectos gerais do desenvolvimento da cultura aos 61 DAE. Selvíria/MS, 15/05/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.18. Proteção das espigas com sacos de papel contra o ataque de maritacas. Selvíria/MS, 23/05/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.19. Aspectos gerais do desenvolvimento das espigas aos 75 DAE. Selvíria/MS, 29/05/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.20. Aspectos gerais do desenvolvimento das espigas aos 98 DAE. Selvíria/MS, 22/06/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.21. Aspectos gerais das espigas por ocasião da colheita. Selvíria/MS, 30/06/2020.



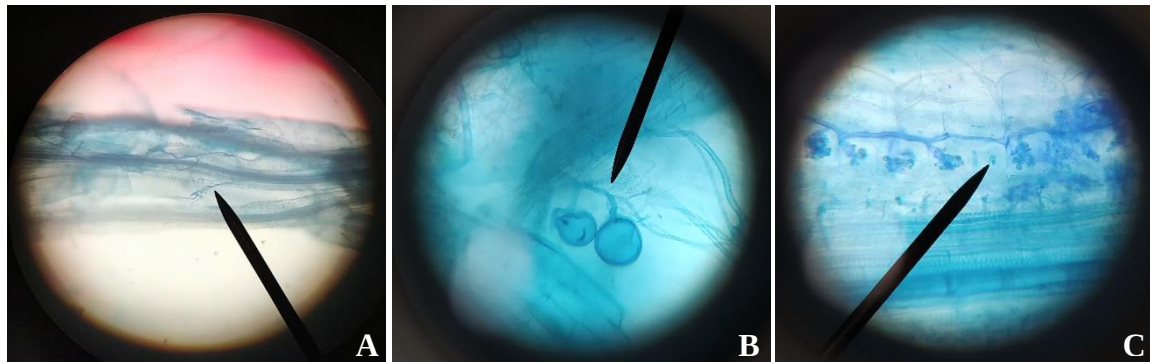
Fonte: Próprio autor.

Figura A.22. Avaliações dos componentes de produção das espigas, incluindo comprimento de espigas (à esquerda) e contagem de número de fileiras e de grãos por fileiras (à direita). Selvíria/MS, 13/07/2020.



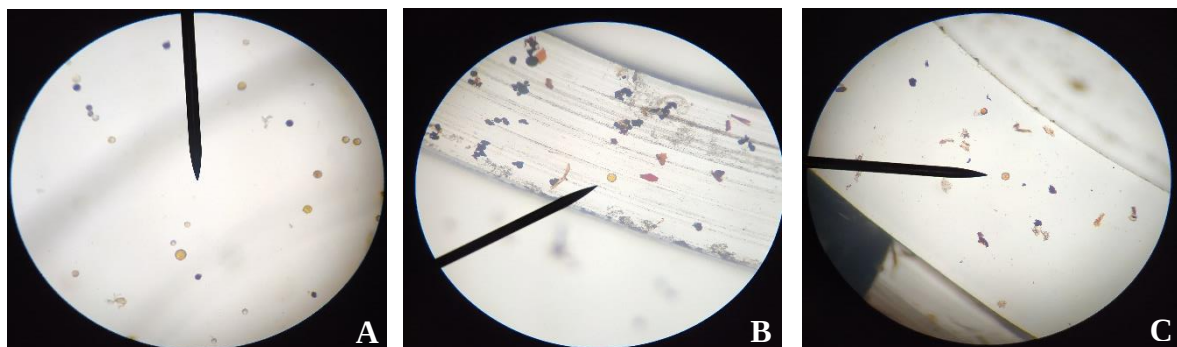
Fonte: Próprio autor.

Figura A.23. Avaliação da colonização radicular por FMA em raízes de milho. Detalhes das hifas (A), vesículas (B) e arbúsculos (C) de fungos micorrízicos arbusculares colonizando as raízes. Jaboticabal/SP, 10/12/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.24. Contagem de esporos de FMA no solo de cada subparcela do experimento. Detalhe para os esporos contidos no inoculante utilizado (A) e para os esporos separados do solo do experimento (B e C). Jaboticabal/SP, 22/09/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.25. Análise da atividade da fosfatase ácida do solo. Ilha Solteira/SP, 15/12/2020.

Fonte: Próprio autor.



Figura A.26. Emergência das plântulas de milho do ensaio em vasos. Ilha Solteira/SP, 22/03/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.27. Aspecto geral das plantas aos 4 e 8 DAE (à esquerda e direita, respectivamente). Ilha Solteira/SP, 26/03/2020 e 30/03/2020.



Fonte:

Próprio autor.

Figura A.28. Aspecto geral das plantas aos 16 e 24 DAE (à esquerda e direita, respectivamente). Ilha Solteira/SP, 07/04/2020 e 15/04/2020.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.29. Aspecto geral das plantas aos 35 DAE. Ilha Solteira/SP, 26/04/2020.



Fonte: Próprio autor.