

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO

INOCULANTE MICORRÍZICO A BASE DE *Rhizophagus intraradices*
E ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO E NO
CRESCIMENTO POPULACIONAL DE *Sitophilus zeamais*
Motschulsky

Damiana Amancio de Souza

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO – 2024

**INOCULANTE MICORRÍZICO A BASE DE *Rhizophagus intraradices* E
ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO E NO CRESCIMENTO
POPULACIONAL DE *Sitophilus zeamais* Motschulsky**

Damiana Amancio de Souza

Tecnóloga em Agroecologia, UFRB, 2017

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientadora: Profa. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega
Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Silva Barbosa
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ademar Avelar Ferreira

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO – 2024**

FICHA CATALOGRÁFICA

S729i

Souza, Damiana Amancio de.

Inoculante micorrízico a base de *Rhizophagus* intraradices e adubação fosfatada na cultura do milho e no crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* Motschulsky / Damiana Amancio de Souza._ Cruz das Almas, BA, 2024.

87f.; il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Mestrado em Ciências Agrárias.

Orientadora: Prof. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega.

Coorientadora: Prof. Dra. Flávia Silva Barbosa.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ademar Avelar Ferreira.

1.Milho – Cultivo. 2.Milho – Adubação. 3.Doenças e pragas – Controle. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 633.15

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB. Responsável pela Elaboração Antonio Marcos Sarmiento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**INOCULANTE MICORRÍZICO A BASE DE *Rhizophagus intraradices*
E ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO E NO
CRESCIMENTO POPULACIONAL DE *Sitophilus zeamais*
Motschulsky**

Comissão examinadora da defesa de dissertação de
Damiana Amancio de Souza

Profa. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Orientadora

Profa. Dra. Gisele Herbst Vazquez
Universidade Brasil / Campus Fernandópolis-UNIVBRASIL-SP- Brasil
Examinadora Externa

Prof. Dr. Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Examinador Externo

A Deus, aos meus filhos, que me inspiram a sempre buscar mais, ao meu marido, cujo apoio constante e esforço incansável são inestimáveis, aos meus pais, pela assistência e educação que me proporcionaram e aos meus irmãos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar tudo isso possível.

Aos meus pais, João Amancio (*in memoriam*), cujas memórias e ensinamentos guardarei eternamente, e a Maria da Conceição, por transmitir ensinamentos que servem como alicerces para a minha vida. Aos meus irmãos, pelo amor, carinho, atenção e preocupação.

Ao meu esposo, Silvio, pela paciência, amor, dedicação, amizade e apoio em todos os momentos. Aos meus filhos, Eduardo, Arthur e Sophia pela paciência, torcida e incentivo, especialmente a Eduardo, pelo apoio constante.

À orientadora, Professora Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega, pela disponibilidade, paciência, conversas e orientações na realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias (PPGCAG), pelo apoio institucional e pela oportunidade.

A CAPES, pela concessão da bolsa.

Ao Dr. Claudio Roberto Fonseca Sousa Soares, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – SC, pela parceria no projeto Aplicação de inoculante micorrízico na produção agrícola e recuperação ambiental e seus efeitos na microbiota rizosférica, no qual o meu subprojeto está inserido, e por toda a paciências, conversas e orientações.

Ao Dr. Paulo Ademar Avelar Ferreira, da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – RS, pela parceria e fornecimento do inoculante e instalação do experimento. (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento do projeto “Aplicação de inoculante micorrízico na produção agrícola de milho e espécies florestais” que possibilitou a execução desse trabalho.

A Clara e Gilberto e toda equipe da Fazenda Iguaçu, com apoio na montagem e execução de todo o experimento, bem como pela dedicação, apoio e disponibilidade para ajudar sempre que necessário.

À Andreza, Larissa e Claudemir pelo apoio e ajuda.

Aos colegas de curso Quênia, Sandra, Leone, Luiz, Saulo, Malena, Jamily Almeida, Raissa e Daniele pela companhia e amizade.

Aos professores Drs. Carlos Doria, Anacleto Ranulfo e à professora Dra. Ana Cristina Fermino, por permitirem a utilização dos equipamentos dos seus respectivos laboratórios.

As técnicas Verônica e Lene pela colaboração e parceria contínua.

Ao motorista do CCAAB, José Roberto Lima da Silva, pela compreensão e ajuda na segunda etapa da coleta do experimento.

À professora Dra. Elaine Martins da Costa da UFPI e a Prof. Dra. Gisele Herbst pelo fornecimento dos híbridos de milho para a execução do segundo capítulo.

À professora Dra. Flávia Barbosa, pelas conversas, orientações e colaborações com o experimento do inseto.

Ao Professor Dr. Carlos Alfredo, pela atenção e colaboração no segundo capítulo.

A todos os professores do mestrado em Ciências Agrárias, em especial aos professores Dra. Rafaela Nóbrega, Dr. Júlio César Nóbrega, Dr. Ossival Lolato, Dr. Phellippe Marbach, Dr. Liniker Silva e Dr. Carlos Ledo pelos ensinamentos, paciência e conselhos.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa experiência, participando direta ou indiretamente e que contribuíram para a realização destes experimentos.

Muito obrigada a todos!

EPÍGRAFE

“Portanto, não nos cansemos de fazer o bem. No momento certo, teremos uma colheita de bênçãos, se não desistirmos.” Gálatas 6:9

INOCULANTE MICORRÍZICO A BASE DE *Rhizophagus intraradices* E ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO MILHO E NO CRESCIMENTO POPULACIONAL DE *Sitophilus zeamais* Motschulsky

RESUMO GERAL

Avanços tecnológicos, como o uso de inoculantes microbianos, tais como fungos micorrízicos arbusculares, possibilitam a redução do uso de fertilizantes químicos na agricultura. O cultivo de híbrido de milho com inoculantes micorrízicos à base de *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo pode resultar em grãos com diferentes concentrações de metabólitos fosfatados, contribuindo para a defesa contra pragas no armazenamento. Este estudo investigou os efeitos do inoculante micorrízico *Rhizophagus intraradices* (Rootella® BR ULTRA), combinado com doses de fósforo, na produção do milho, nos atributos biológicos do solo e no crescimento populacional de *Sitophilus zeamais*. O primeiro experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com seis tratamentos, utilizando um esquema fatorial 3x2 [3 níveis de P = 0, 50 e 100% da dose recomendada; inoculação micorrízica (com e sem inoculante FMA)] e quatro repetições. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do inoculante micorrízico à base de *Rhizophagus intraradices* e de diferentes doses de P₂O₅ sobre a colonização, produtividade de milho, glomalina, respiração basal e disponibilidade de P. Foram avaliados a colonização micorrízica, a proteína do solo relacionada à glomalina, a respiração basal do solo, teor de P nas folhas, grãos e no solo, as características das espigas e produtividade do milho. O segundo experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 3x3, [3 níveis de P = 0, 50 e 100% da dose recomendada e 3 híbridos de milho (provenientes da Bahia, São Paulo e Piauí)]. O objetivo foi avaliar a resistência de sementes de três híbridos de milho cultivados com diferentes doses de fósforo frente ao ataque de *Sitophilus zeamais* em teste sem chance de escolha, em laboratório. O bioensaio envolveu frascos com 70 g de grãos de milho e vinte insetos adultos por tratamento. Após 60 dias, foram avaliados emergência, sobrevivência e mortalidade acumulada dos insetos, grãos danificados, taxa instantânea de crescimento e produção de excremento. O primeiro experimento mostrou que a inoculação de *Rhizophagus intraradices* na cultura do milho não aumentou a produtividade, mesmo com doses de fósforo. O teor foliar de fósforo foi influenciado pela interação entre adubação fosfatada e inoculação de FMA. O segundo estudo revelou variações significativas na resistência ao *Sitophilus zeamais* entre os híbridos de milho. A incidência do inseto não foi influenciada pela interação entre híbridos e doses de fósforo. Entre os híbridos avaliados, o MP-512 apresentou maior suscetibilidade ao ataque do *Sitophilus zeamais*. Dessa forma, conclui-se que o híbrido MP-512 é o mais suscetível ao ataque da praga, enquanto o híbrido MC-707 se mostra relativamente mais resistente. A PCA revelou que a suscetibilidade dos híbridos de milho ao *Sitophilus zeamais* está associada à produção de excrementos e taxas de crescimento, enquanto a mortalidade acumulada indica resistência, com o híbrido MP-512 sendo mais suscetível e o MS-898 mostrando maior resistência.

Palavras-chave: Atividade microbiana, Glomalina, Inoculante FMA, Pragas do Armazenamento, *Zea mays*, Gorgulho-do-milho

MYCORRHIZAL INOCULANT BASED ON *Rhizophagus intraradices* AND PHOSPHATE FERTILIZATION IN MAIZE CULTIVATION AND POPULATION GROWTH OF *Sitophilus zeamais* Motschulsky

GENERAL ABSTRACT

Technological advancements, such as the use of microbial inoculants, including arbuscular mycorrhizal fungi, enable the reduction of chemical fertilizers in agriculture. The cultivation of maize hybrids with mycorrhizal inoculants based on *Rhizophagus intraradices* and phosphorus doses can result in grains with different concentrations of phosphorylated metabolites, contributing to pest defense during storage. This study investigated the effects of the mycorrhizal inoculant *Rhizophagus intraradices* (Rootella® BR ULTRA), combined with phosphorus doses, on maize production, soil biological attributes, and the population growth of *Sitophilus zeamais*. The first experiment was conducted in a randomized block design with six treatments, using a 3x2 factorial scheme [3 levels of P = 0, 50, and 100% of the recommended dose; mycorrhizal inoculation (with and without FMA inoculant)] and four replications. The objective of this study was to evaluate the effects of the mycorrhizal inoculant based on *Rhizophagus intraradices* and different doses of P₂O₅ on colonization, maize productivity, glomalin, basal respiration, and P availability. Mycorrhizal colonization, soil protein related to glomalin, soil basal respiration, P content in leaves, grains, and soil, as well as ear characteristics and maize productivity, were evaluated. The second experiment was conducted in a randomized block design in a 3x3 factorial scheme, [3 levels of P = 0, 50, and 100% of the recommended dose and 3 maize hybrids (originating from Bahia, São Paulo, and Piauí)]. The objective was to evaluate the resistance of seeds from three maize hybrids grown with different phosphorus doses against the attack of *Sitophilus zeamais* in a no-choice test in the laboratory. The bioassay involved jars with 70 g of maize grains and twenty adult insects per treatment. After 60 days, emergence, survival, and accumulated mortality of insects, damaged grains, instantaneous growth rate, and excrement production were evaluated. The first experiment showed that inoculation with *Rhizophagus intraradices* in maize cultivation did not increase productivity, even with phosphorus doses. Leaf phosphorus content was influenced by the interaction between phosphate fertilization and FMA inoculation. The second study revealed significant variations in resistance to *Sitophilus zeamais* among maize hybrids. The incidence of the insect was not influenced by the interaction between hybrids and phosphorus doses. Among the evaluated hybrids, MP-512 showed greater susceptibility to *Sitophilus zeamais* attack. Thus, it is concluded that the MP-512 hybrid is the most susceptible to pest attack, while the MC-707 hybrid appears to be relatively more resistant. PCA revealed that the susceptibility of maize hybrids to *Sitophilus zeamais* is associated with excrement production and growth rates, while accumulated mortality indicates resistance, with the MP-512 hybrid being more susceptible and the MS-898 hybrid showing greater resistance.

Keywords: Microbial activity, Glomalin, AMF inoculant, Storage pests, *Zea mays*, Maize weevil

LISTA DE ABREVIATURAS

FMA - Fungos Micorrízicos Arbusculares
EP = Espiga por planta
CE = Comprimento de espiga
DE = Diâmetro da espiga
FE = Fileira por espiga
GF = Grão por fileira
GE = Grão por espiga
MG = Massa do grão
MSPA = Matéria seca parte aérea
APG = Acúmulo de fósforo nos grãos
PRODT = Produtividade
NI = Não inoculado
MAPA = Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
PSRG = Proteína do solo relacionada a glomalina
DNA = Ácido desoxirribonucleico
RNA = Ácido ribonucleico
ATP = Adenosina trifosfato
ADP = Adenosina difosfato
CONAB = Companhia Nacional de Abastecimento
RBS = Respiração basal do solo
C-BMS = Carbono da biomassa microbiana do solo
BMS = Biomassa microbiana do solo
P = Fósforo
Pi = Fósforo inorgânico
Po = Fósforo orgânico
EA = Emergência acumulada
SA = Sobrevivência acumulada
MA = Mortalidade acumulada
GD = Grão danificado
TIC = Taxa instantânea de crescimento
Exc = Excremento

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Análise química do solo camada 0 - 0,20m da área experimental.....48

Tabela 2 - Valores médios para colonização e intensidade de colonização de raízes de milho inoculadas com *Rhizophagus intraradices* com diferentes doses de fósforo e sem inoculadas micorrízicos.....54

Tabela 3 - Efeito do milho inoculado com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo na produção do milho na Chapada Diamantina, BA.....54

Tabela 4 - Valores médios para a produtividade do milho inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo.....55

Tabela 5 - Valores médios para o comprimento de espiga e grãos por espigas.....55

Tabela 6 - Valores médios da massa do grão e massa de cem grãos de plantas de milho em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e sem inoculante.....56

Tabela 7 - Teor foliar de fósforo em milho em função das doses de fósforo e da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* nas sementes.....56

Tabela 8 - Teor de fósforo no grão de milho e teor de fósforo no solo em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices*.....57

Tabela 9 - Valores médios da proteína do solo relacionado a glomalina facilmente extraível e da respiração basal do solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ solo}^{-1} \text{ h}^{-1}$).....57

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Características do solo dos experimento em campo.....71

Tabela 2 - Parâmetros biológicos de *Sitophilus zeamais*, avaliadas aos 60 dias em dieta com grãos de híbridos de milho, oriundos de plantas cultivadas com diferentes doses de fósforo.....77

Tabela 3 - Médias da emergência acumulada, sobrevivência acumulada e mortalidade acumulada de *Sitophilus zeamais* avaliados em dieta com grãos de híbridos de milho em teste sem chance de escolha aos 60 dias.....78

Tabela 4 - Médias de grão danificado, produção de excremento e taxa de crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* avaliados em dieta com grãos de híbridos de milho em teste sem chance de escolha aos 60 dias.....78

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1 - Fungo micorrízico crescendo em raiz de milho. Os corpos redondos são esporos e os filamentos filiformes são hifas. A substância que os reveste é a glomalina, revelada por um corante verde.....27

Figura 2 - Ciclo de vida do gorgulho do milho (*Sitophilus zeamais*)30

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Colonização micorrízica de milho inoculadas com *Rhizophagus intraradices*. Figura a de tratamento apenas com o inoculante micorrízico e figura b apenas com dose 50 de fósforo e sem o inoculante - com suas estruturas (seta amarela hifas, seta preta vesículas e seta vermelha arbúsculos) observadas.....52

Figura 2 - Intensidade de colonização radicular, no aumento de 100x, em amostras de raízes de milho.....53

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Experimento em campo na Bahia.....71

Figura 2 - Experimento em campo no Piauí.....71

Figura 3 - Experimento em campo em São Paulo.....72

Figura 4 - Execução do experimento - A: Criação do *Sitophilus zeamais* com dieta de macarrão; B: milho debulhado; C: milho pesado; D: milho com os insetos; E: experimento montado; F e G: desmontando o experimento; H: grão danificados pelos *Sitophilus zeamais*.....74

Figura 5 - Contribuição percentual das variáveis (SA, EXC, EA, TIC, MA, GD) para as Dimensões 1 e 2 da análise de componentes principais (PCA).....79

Figura 6 - Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) mostrando a distribuição das variáveis e amostras nas Dimensões 1 e 2. Suscetibilidade de híbridos de milho cultivados com diferentes doses de fósforo sobre ataque do inseto praga *Sitophilus zeamais*.....80

Figura 7 - Correlação entre as variáveis e suas contribuições para Dim1 e Dim2 em relação aos componentes principais.....81

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 - Cultura do milho e o fósforo.....	19
2.2 - Fungos micorrízicos arbusculares na saúde do solo.....	21
2.3 - Indicadores da qualidade do solo.....	25
2.4 - Insetos praga em grãos de milho armazenados.....	29
3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
CAPÍTULO 1 - Aplicação do inoculante micorrízico <i>Rhizophagus intraradices</i> e adubação fosfatada na produtividade e absorção de P pelo milho e atributos biológicos na qualidade do solo	
1 - INTRODUÇÃO	46
2 - MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.1 - Localização do experimento.....	47
2.2 - Delineamento experimental e tratamentos.....	48
2.3 - Instalação e condução.....	49
2.4 - Primeira avaliação.....	49
2.5 - Segunda avaliação.....	51
2.6 - Análise estatística.....	52
3 - RESULTADOS.....	52
4 - DISCUSSÃO.....	57
5 - CONCLUSÃO.....	61
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
CAPÍTULO 2 - Crescimento populacional de <i>Sitophilus zeamais</i> Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) em grãos de milho cultivados com adubação fosfatada	
1 - INTRODUÇÃO.....	69
2 - MATERIAL E MÉTODOS.....	70
2.1 - Origem dos híbridos utilizados.....	70
2.2 - Criação de gorgulho do milho.....	73
2.3 - Condições experimentais.....	73
2.4 - Delineamento experimental.....	73
2.5 - Variáveis analisadas.....	75
2.6 - Análise estatística.....	76

3 - RESULTADOS	76
4 - DISCUSSÃO.....	81
5 - CONCLUSÃO.....	84
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura desempenha um importante papel na subsistência humana, ao fornecer alimentos essenciais, fibras, madeira, entre outros recursos. No entanto, à medida que as preocupações com a segurança alimentar e os impactos ambientais tornam-se cada vez mais relevantes, a busca por sistemas agrícolas que conciliem a conservação dos recursos naturais com a produção de alimentos tem aumentado (MAZAC et al., 2022; WHITE, GLEASON, 2022). Nesse contexto, os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) emergem como ferramentas importantes, não apenas no aumento da produtividade agrícola, mas também na promoção da sustentabilidade ambiental. Assim, a potencialização do seu uso nos sistemas de produção agrícola está diretamente alinhada com os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Os FMA compõem um grupo de microrganismos simbiotes que apresentam efeitos benéficos em mais de 80% das plantas. O mecanismo principal de atuação dos FMA consiste na ampliação da área de absorção de nutrientes e água por meio do micélio fúngico, o qual facilita o transporte e a troca desses elementos com a planta simbiote, beneficiando-se mutuamente por meio da troca de nutrientes (MITRA et al., 2021). Os FMA são biotróficos obrigatórios, ou seja, eles dependem da simbiose estabelecida com as raízes de plantas hospedeiras.

Um aspecto importante dos FMA é a capacidade de aumentar a absorção de nutrientes de baixa mobilidade no solo, com destaque para o fósforo (P) (ZHANG et al., 2021). O P tem funções vitais na fisiologia das plantas, sendo um componente essencial de fontes de energia (SHI et al., 2022). A baixa disponibilidade de fósforo nos solos agrícolas frequentemente limita o crescimento das plantas (PAZ-ARES et al., 2022; WANG et al., 2021). A transformação de P insolúvel em P solúvel é um dos processos-chave para a absorção de P pelas plantas (CASTAGNO et al., 2021). A maior absorção de P e outros nutrientes pode ser potencializada por microrganismos, dentre eles os FMA, pois podem solubilizar o P e influenciar o alongamento e a ramificação das raízes (SAIA et al., 2020).

Em um estudo realizado em cinco localidades no Brasil, a inoculação do milho com o inoculante micorrízico Rootella® BR ULTRA, que contém *Rhizophagus intraradices*, resultou em ganhos médios de produção de grãos da ordem de 54%, e as melhores respostas foram observadas em solos que originalmente foram

caracterizados com baixos ou médios níveis de fósforo disponível (STOFFEL et al., 2020). A inoculação de *Rhizophagus intraradices* na cultura do milho apresenta potencial para melhorar o desenvolvimento e a produtividade da cultura, dependendo dos fatores envolvidos na simbiose (BUZO et al., 2023). No Brasil, essa tecnologia ainda não é amplamente difundida. Somente em 2018, o primeiro inoculante micorrízico, com o nome comercial Rootella® BR ULTRA (167.000 propágulos g⁻¹), baseado nos propágulos da espécie do FMA *Rhizophagus intraradices*, foi registrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para uso comercial em larga escala. Entretanto, a falta do conhecimento da existência do produto é um dos principais entraves para disseminação desse recurso.

O mercado relacionado ao milho, abrangendo tanto a produção de grãos, quanto seus subprodutos, destaca-se como um dos pilares essenciais do agronegócio. A produção de grãos no Brasil assume uma posição de essencialidade para a economia do país, com o milho figurando como a segunda cultura mais significativa na produção agrícola brasileira, sendo superado apenas pela soja. Segundo a Conab, está previsto que o volume da produção de grãos no Brasil alcance 316,7 milhões de toneladas na safra 2023/2024, representando uma queda de 1,5% ou 4,7 milhões de toneladas em comparação com a safra anterior de 2022/2023. A busca por soluções sustentáveis na colheita de milho, aliada a práticas agrícolas responsáveis, é essencial para garantir a segurança alimentar e a preservação dos recursos naturais.

O *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera, Curculionidae), popularmente conhecido como gorgulho-do-milho, é uma das principais pragas de produtos armazenados, especialmente no milho (SILVA et al., 2013; KASOZI et al., 2021). O *Sitophilus zeamais* infesta diversas variedades de cereais, causando redução de peso, diminuição do valor nutricional, depreciação do valor comercial e gerando problemas secundários, como a proliferação de fungos, devido ao aumento da umidade na massa de grãos resultante da alta densidade de insetos (CORTESE et al., 2022). Essa praga promove um prejuízo tanto em campo, quanto no armazenamento, reduzindo os grãos a pó e cascas, enquanto as larvas se desenvolvem nos grãos e os danos geralmente não são visíveis.

Embora a inoculação com inoculantes micorrízicos comerciais seja uma tecnologia relativamente nova para o cultivo de milho, seus benefícios são reconhecidos. Contudo, ainda falta compreensão sobre os benefícios do inoculante

micorrízico *Rhizophagus intraradices* na produtividade do milho no Brasil. Este estudo visa contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis que promovam o uso de inoculante a base de FMAs, melhorando assim a absorção de nutrientes pelas plantas, minimizando os danos causados por pragas, de forma a aumentar a segurança alimentar e a produtividade dos sistemas agrícolas.

Hipotetizamos que: (1) o inoculante micorrízico comercial a base de *Rhizophagus intraradices* e diferentes doses de fósforo proporcionam o melhor crescimento vegetal, desenvolvimento das plantas de milho e aumentará sua produção, (2) a colonização micorrízica das raízes de milho difere entre as plantas que receberam doses de P_2O_5 e com a inoculação com os FMAs, (3) o inoculante micorrízico e das doses de fósforo influencia a resistência de híbridos de milho ao inseto praga *Sitophilus zeamais*.

Os FMAs, ao ampliar a área de absorção de nutrientes e água das plantas, beneficiam o desenvolvimento vegetal e contribuem para a conservação dos solos, reduzindo a necessidade de fertilizantes. Isso está alinhado com os ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável. Além disso, os FMAs ajudam a mitigar os impactos ambientais da agricultura, apoiando o ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis.

Portanto, esta pesquisa visa não apenas melhorar a produtividade do milho, mas também promove práticas agrícolas sustentáveis visando os objetivos globais de desenvolvimento estabelecido pela ONU. Ao investigar os efeitos da aplicação de inoculantes de FMAs, com foco na espécie *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo na produtividade do milho, esta pesquisa busca contribuir para a realização dos ODS, promovendo uma agricultura mais sustentável e resiliente. Este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos do inoculante à base do fungo micorrízico arbuscular Rootella® BR ULTRA, com a espécie *Rhizophagus intraradices* e diferentes doses de fósforo na colonização, seus impactos na absorção e disponibilidade de fósforo, nas características biológicas do solo, na produtividade do milho e avaliar os grãos produzidos quanto a susceptibilidade da infestação do inseto praga *Sitophilus zeamais*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cultura do milho e o fósforo

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea que cresce em diferentes climas ao redor do mundo. O milho é uma planta anual da família Poaceae, de grandes demandas mundial, sendo cultivada em todas as regiões do Brasil. Com metabolismo C4 e raízes fasciculadas, absorve em média 600 mm de água durante seu ciclo (COELHO et al., 2008). Uma das culturas de cereais mais importantes no comércio agrícola mundial, o milho é muito importante na segurança alimentar (EHISIANYA et al., 2019), sendo frequentemente armazenado para garantir o abastecimento de alimentos e a disponibilidade de sementes para futuros cultivos.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção total de milho para a safra 2022/23, considerando as três safras do cereal, deverá atingir 131,9 milhões de toneladas. Esse valor representa um aumento significativo de 18,7 milhões de toneladas em relação à produção obtida no ciclo anterior. Na primeira safra do grão, a produção totalizou 27,4 milhões de toneladas, enquanto a previsão para a segunda safra aponta para um volume de 102,2 milhões de toneladas. Conforme relatado no progresso de safra divulgado recentemente pela Companhia, aproximadamente 89% da área plantada já foi colhida. Quanto à terceira safra, a estimativa de produção é de 2,33 milhões de toneladas (CONAB, 2023).

A produtividade do milho é influenciada por vários fatores, como as condições climáticas, nutrientes, fertilidade do solo, práticas agrícolas e potencial genético do cultivar e o controle de pragas e doenças (AMADO et al. 2002; TANDZI e MUTENGWA, 2020; DEINES et al., 2021). A disponibilidade de fósforo no solo é um dos principais fatores que limita o crescimento e o desenvolvimento do milho.

As doses de P recomendadas para o milho e outras culturas são geralmente altas, embora sua exigência seja menor em comparação ao nitrogênio por exemplo, devido à baixa eficiência de absorção pelo milho (BASTOS et al., 2008). Isso ocorre devido à alta capacidade de adsorção do fósforo quando adicionado ao solo, o que diminui sua disponibilidade para as plantas (CORRÊA et al., 2008). A qualidade nutricional das plantas é afetada com a deficiência do P, as plantas melhoram sua

capacidade de absorção desse nutriente, estimulando o crescimento das raízes (NARANG e ALTAMANN, 2001). O fornecimento adequado do fósforo garantirá uma melhor produtividade do milho. Segundo Ryan et al. (2012), mais da metade da demanda desse elemento é destinada à produção de fertilizantes, e a sua deficiência está diretamente associada à segurança alimentar.

A disponibilidade desse elemento é importante para a manutenção da produção global de alimentos, uma vez que nenhum outro elemento químico pode substituir sua função nas plantas. O P desempenha funções essenciais no metabolismo vegetal, influenciando processos bioquímicos como a fotossíntese, a respiração celular e a transferência de energia (WANG et al., 2021). Além disso, é importante ponderar que o P, um dos nutrientes essenciais para as plantas, pode ser encontrado no solo em várias formas, incluindo fósforo orgânico (Po) e fósforo inorgânico (Pi). Entretanto, o Po precisa passar por uma conversão bioquímica para se tornar biodisponível como Pi para ser absorvido pelas plantas (WANG et al., 2021; CHENG et al., 2022).

A disponibilidade do Po ocorrerá somente após a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos presentes no solo, resultando na liberação de íons fosfato inorgânicos, com os íons livres de ortofosfato (PO_4^{3-} , H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), que são adsorvidos pelas raízes das plantas da solução do solo (SASABUCHI et al., 2023).

Grande parte desse fósforo está fortemente ligada a componentes orgânicos e inorgânicos do solo, tornando-se inacessível para absorção pelas raízes (BLEVINS, 1999). Em situações de baixas concentrações no solo, o fósforo pode limitar significativamente o crescimento das plantas, levando à redução da produtividade das culturas agrícolas (CONTE et al.; 2003; COELHO, 2006).

O P é um dos nutrientes mais limitantes nos solos agrícolas e para a produção da cultura do milho, principalmente devido à sua baixa mobilidade no solo (BATTINI et al., 2017), o que gera a dependência de fertilizantes minerais. Considerando que as reservas globais de rocha fosfática são limitadas e que o fertilizante à base de fósforo é essencial para garantir a produção de alimentos no futuro, é igualmente importante discutir, ainda que brevemente, a disponibilidade de recursos contendo fósforo. A eficiência no uso do fósforo continuará sendo a principal preocupação, seja ele escasso ou abundante (RYAN et al., 2012).

As doses de P recomendadas para o milho e outras culturas são geralmente altas, embora sua exigência seja menor em comparação ao nitrogênio por exemplo, devido à baixa eficiência de absorção pelo milho (BASTOS et al., 2008). Isso ocorre devido à alta capacidade de adsorção do fósforo quando adicionado ao solo, o que diminui sua disponibilidade para as plantas (CORRÊA et al., 2008). A qualidade nutricional das plantas é afetada com a deficiência do P, as plantas melhoram sua capacidade de absorção desse nutriente, estimulando o crescimento das raízes (NARANG e ALTAMANN, 2001). Evidências indicam que as plantas desenvolveram estratégias, além da absorção direta através das raízes, para adquirir recursos do solo (LAMBERS et al., 2008).

Uma das estratégias é a associação com fungos micorrízicos, os quais colonizam as raízes das plantas e lançam suas hifas que se ramificam no solo, resultando em um aumento da absorção de fósforo pelas raízes (BLEVINS, 1999). A entrada de fósforo nas micorrizas pode ser seis vezes maior do que nas raízes, e a concentração de Pi no interior das hifas micorrízicas é cerca de mil vezes maior do que aquela que se encontra na solução do solo (SANDERS e TINKER 1973; GIANINAZZI-PEARSON; GIANINAZZI, 1986; BOLAN, 1991).

2.2 Fungos micorrízicos arbusculares na saúde do solo

Micorrizas são associações entre as raízes de planta e determinados grupos de fungo do solo, os quais são denominados de fungos micorrízicos. Quanto à forma de colonização que varia em função de como o micélio do fungo se relaciona com as raízes e especificidade entre os simbiontes podem ser classificadas em ectomicorrizas, endomicorrizas, ectendomicorrizas, arbutoides, monotropoides, ericoides e orquidoide.

Os fungos micorrízico arbusculares (FMA - filo Glomeromycota, classe Glomeromycetes) se distinguem das ectomicorrizas, pois estabelecem crescimento intercelular no córtex da raiz formando estruturas específicas, como vesículas e arbúsculos. Essas características são notáveis em muitas famílias de plantas superiores, especialmente aquelas de interesse agrícola (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006; CARDOSO e ANDREOTE, 2016; TAIZ et al., 2017).

São organismos biotróficos obrigatórios capazes de colonizar plantas vasculares e aquáticas (SOUZA et al., 2010) e formarem uma rede de micélios na

rizosfera vegetal (MARRO et al., 2014). Os FMA, exercem papéis fundamentais no desenvolvimento das plantas, melhorando a nutrição mineral (BATTINI et al., 2017; JACOBY et al., 2017), absorção de água pelas plantas e resistência a patógenos e agregação do solo (DELAVALUX et al., 2017; BRUNDRETT e TEDERSOO, 2018).

A simbiose micorrízica começa com propágulos fúngicos no solo, que podem ser esporos células auxiliaadoras, raízes micorrizadas e hifas; eles desenvolvem hifas que, estimuladas por exsudatos e condições da rizosfera, crescem e entram em contato com as raízes; as hifas aderem à superfície radicular, formando um apressório para penetrar nas células da epiderme; após a penetração, as hifas se estendem pelo córtex intercelular e diferenciam-se em arbúsculos, vesículas e esporos (SOUZA et al., 2006).

As hifas têm uma função fundamental na organização das partículas do solo à medida que se desenvolvem ao longo do micélio fúngico extrarradicular. Esse processo começa com uma ação mecânica, em que as hifas exercem pressão nas partículas, resultando na formação de microagregados próximos ao micélio (RUBIN e STURMER; 2015; KINANY et al., 2018). Os esporos, produzidos pelos FMA são estruturas de resistência encontradas principalmente nas extremidades das hifas extrarradiculares, sendo capazes de perdurar no solo por longos períodos (SMITH e READ, 2008).

A espécie *Rhizophagus intraradices* é uma das que produz esporos dentro das raízes (WALKER et al., 2021). Esses esporos permanecem inativos até serem estimulados por substâncias químicas ou hormonais, como flavonoides, para iniciar a germinação e a colonização de novas raízes (SMITH e READ, 2008). A colonização das raízes e a formação de esporos de micorrizas são influenciadas por fatores físicos e químicos do solo, bem como por estímulos provenientes dos exsudatos das raízes (MOTA et al., 2023). Dentre esses fatores, a presença de matéria orgânica, os níveis de fósforo e potássio, e o pH do solo desempenham papéis determinantes (STURMER et al., 2018).

Os FMAs são normalmente encontrados em solos arejados, drenados e protegidos contra insolação direta. Os FMAs representam uma das alternativas mais promissoras para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis e econômicos em termos de recursos (BATTINI et al., 2017). Os FMAs são relevantes para a saúde do solo e nos ecossistemas terrestres, beneficiando o desenvolvimento das plantas ao aumentar a absorção de nutrientes, especialmente o fósforo, em troca

de carbono (JACOBY et al., 2017; ROTH e PASZKOWSSKI, 2017; LANFRANCO et al., 2018; KOBAE, 2019; DAS et al., 2022).

Esta relação simbiótica envolve as plantas fornecendo carboidratos para os FMA, sendo essa a única fonte de carbono deles, enquanto estendem suas hifas no solo, aumentando a área de exploração das raízes e melhorando a absorção de água e nutrientes para as plantas (AZCÓN-AGUILAR e BAREA, 2015; ROTH e PASZKOWSKI, 2017; KEYMER e GUJTAHR, 2018; LANFRANCO et al., 2018; NAFADY et al., 2019; BI et al., 2020; BUZO et al., 2022). Além disso, os FMAs promovem maior resistência a patógenos do solo e condição de deficiência hídrica (BEGUM et al., 2019; VALLEJOS-TORRES et al., 2021). Embora o principal benefício nutricional para as plantas esteja relacionado ao fósforo (P), a literatura indica que os FMAs também podem promover melhorias na absorção de nutrientes como nitrogênio, zinco e cobre (SMITH e READ, 2008; CARDOSO et al., 2017; JANSÁ et al., 2019).

A atuação dos FMAs nos ecossistemas depende da relação entre o solo e as plantas, sendo esse fator essencial para a presença e atividade dos FMAs (JACOBY et al., 2017) eles também aproximam as partículas do solo por meio da parede de suas hifas que possuem, entre seus elementos, uma glicoproteína denominada de glomalina (KÖHLER et al., 2017; BARBOSA et al., 2019; JI et al., 2019; XIN et al., 2022). Em solos com maior umidade, observou-se um favorecimento na colonização micorrízica das raízes de *Paepalanthus* e uma maior quantidade de glomalina, sugerindo que esse ambiente proporciona condições mais propícias para o estabelecimento da simbiose provavelmente devido ao aparecimento de raízes finas (PEREIRA et al., 2023).

Embora, os FMAs apresentem efeitos benéficos no crescimento vegetal, ainda se sabe pouco sobre os efeitos da sua inoculação nas comunidades de microrganismos rizosféricos. A inoculação com FMAs aumentou a densidade de bactérias e fungos, e a taxa de mineralização do carbono orgânico do solo em experimento conduzido na China em condições de casa de vegetação e ambiente controlado (XU et al., 2019).

Culturas de valores econômicos, como milho, a soja e o trigo são normalmente beneficiados pelas micorrizas e sua nutrição é influenciada pelos FMAs (KOBAE, 2019; KHAN et al., 2020; SAPAGNOLETTI et al., 2020; WATTS-WILLIAMS e GILBER, 2021; MA et al., 2022). Portanto, uma melhor compreensão dos sistemas de absorção de nutrientes minerais mediados pelos FMAs pode

contribuir para o planejamento e estabelecimento de sistema agrícola sustentável e com economia de recursos (FERROL et al., 2019).

O uso de produtos contendo fungos micorrízicos tornou-se uma prática cada vez mais comum em muitos países ao redor do mundo. Produtos como o MycoApply® Liquid Endo, disponível nos EUA, o MycoForce® Endo and Ecto Transplanter, na Inglaterra, o MycoZoom Mycorrhiza (formulação granulada, Aurea Systems GmbH, Alemanha) e MycoZoom Mycorrhiza Liquid (formulação líquida, Aurea Systems GmbH, Alemanha), estão prontamente disponíveis (RODRÍGUEZ-ROMERO e JAIZME-VEGA, 2007; CORKIDI et al., 2009; FERNÁNDEZ et al., 2011; LOIT et al., 2023).

Trabalhos demonstraram o benefício da inoculação dos FMA na cultura do milho. Ma et al. (2022) verificaram que a simbiose micorrízica apresentou melhoria no vigor da raiz e promoveu o acúmulo de nutrientes no milho. As plantas micorrizadas apresentaram maior altura e massa seca da parte aérea (DAMIN et al., 2020). A inoculação com FMA também aumentou a resistência dos tecidos foliares do milho, inibindo o avanço de *Spodoptera frugiperda* e com o aumento da resistência da cultura, houve a redução da capacidade reprodutiva dos insetos adultos, o que interferiu na densidade populacional das gerações futuras (MORAES et al., 2018). O milho inoculado com FMA e adubação fosfatada combinada apresentou maiores teores de P e Mg nos tecidos vegetais, quando comparado aos tratamentos que receberam adubação ou inoculação, separadamente (BUZO et al., 2022).

Em experimento realizado em campo no Egito com três níveis de irrigação e três doses de P, El-Fattah et al. (2023) concluíram que o FMA contribuiu para o aumento da produtividade do milho e melhorou a absorção de água, principalmente em condições inadequadas de água e nutrientes, mostrando o impacto positivo do solo inoculado com micorrizas no crescimento, rendimento e absorção de nutrientes ao qual sugeriram que o FMA pode ajudar as culturas a se adaptarem às mudanças climáticas e produzirem alimentos mais sustentáveis e saudáveis.

A simbiose micorrízica não apenas beneficia o desenvolvimento e a resistência do milho a condições adversas, mas também potencializa a eficiência da adubação fosfatada, resultando em maiores teores de fósforo nos tecidos vegetais (BUZO et al., 2022; EL-FATTAH et al., 2023). As descobertas científicas destacam a relevância dessa simbiose como uma estratégia sustentável para enfrentar desafios ambientais e climáticos. Além disso, a influência positiva dos

FMAAs na absorção de água ressalta seu papel na adaptação dos vegetais às mudanças climáticas.

O interesse agrônomo nos benefícios das micorrizas é substancial, e, como resultado, a produção em larga escala de inoculantes e sua aplicação podem reduzir a necessidade de insumos agrícolas. Portanto, a realização de estudos que avaliem os mecanismos de ação e a interação desses inoculantes em conjunto com fertilizantes fosfatados em plantas agrícolas são fundamentais para uma compreensão do potencial e alcance dessa interação.

2.3 Indicadores da qualidade do solo

A avaliação da qualidade do solo em sistemas produtivos, mediante o monitoramento dos indicadores físicos, químicos e biológicos, desempenham um papel fundamental na sustentabilidade da produção ambiental. Isso é decisivo para adquirir informações essenciais na tomada de decisões, especialmente aquelas relacionadas à escolha do manejo mais apropriado para uma determinada área, a fim de favorecer a conservação dos ecossistemas (CRITTENDEN et al., 2015).

A saúde do solo é definida como sendo a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, dentro dos limites do ecossistema e do uso do solo, para sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e promover a saúde vegetal e animal (KARLEN et al., 1997; KIBBLEWHITE et al., 2008; BUNEMANN et al., 2018; SILVA et al., 2020). Os termos qualidade e saúde do solo serão utilizados como sinônimos ao longo deste trabalho.

O conceito de "qualidade do solo" foi introduzido pela primeira vez na literatura por Mausel (1971), que o definiu como a habilidade do solo em sustentar altas produtividades de grãos mediante a implementação das melhores práticas de manejo.

Ao monitorar a qualidade do solo, diversos elementos químicos (matéria orgânica do solo, a acidez do solo, teor de fósforo), físicos (textura, densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados) e biológicos (respiração basal, biomassa microbiana) têm sido considerados como indicadores de qualidade e mudanças do solo (ARAÚJO et al., 2012; RAIESI e BEHESHTI, 2014; GUO, 2021).

Embora todos os indicadores da qualidade do solo sejam importantes, o foco deste estudo são os biológicos. A respiração basal do solo, a biomassa microbiana do solo, o quociente metabólico e a glomalina são alguns dos indicadores biológicos

do solo (SARAPATKA et al., 2019; SILVA et al., 2020; LIU et al., 2020; DAS et al., 2023; LULL et al., 2023). Esses indicadores possibilitam a caracterização, avaliação e monitoramento das mudanças que ocorrem em um ecossistema específico (KARLEN et al., 1997).

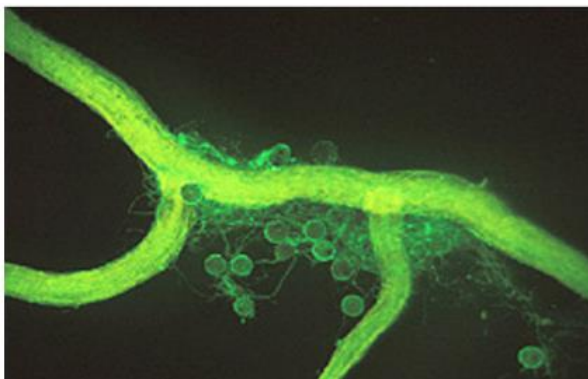
A escolha do método de avaliação dos indicadores da qualidade do solo depende dos objetivos, recursos disponíveis e condições do contexto local e da pesquisa, além das características do solo analisado. Na comunidade microbiana do solo os FMAs produzem uma glicoproteína conhecida como glomalina (IRVING et al., 2021), algumas espécies, da família Glomeromycotina, por exemplo produzem mais glomalina por unidade de biomassa ou comprimento de hifas do que outras (HOLATKO et al., 2021). A glomalina é uma glicoproteína hidrofóbica, termoestável e recalcitrante produzida pelos FMAs (SOUSA et al., 2012).

A glomalina é produzida na superfície das hifas e pela degradação das hifas e esporos dos FMAs, com seu efeito cimentante promove a junção das partículas do solo e contribuem para a estabilidade dos ecossistemas terrestres (LEHMANN et al., 2017; BARBOSA et al., 2019; JI et al., 2019; XIN et al., 2022), aumentando a estabilidade dos agregados (NÓBREGA et al., 2001). Os mecanismos que controlam a produção de glomalina (Figura 1) pelos FMAs e sua função ainda não estão completamente compreendidos. No entanto, diversos fatores que afetam a simbiose micorrízica provavelmente também influenciam a produção dessa proteína pelos FMA (SOUSA et al., 2012).

O processo de extração da glomalina do solo não é totalmente específico, podendo incluir outras proteínas, o que compromete a precisão da análise. Além disso, o solo possui uma grande diversidade de proteínas de diferentes organismos, o que dificulta atribuir aquele resultado como sendo só a glomalina. Essas limitações destacam a necessidade de cautela ao interpretar resultados relacionados à glomalina e sua associação com os FMA.

A produção de glomalina pode ser afetada por uma série de variáveis, incluindo as características do solo, o clima, os sistemas de uso da terra, as práticas agrícolas, a presença e o tipo de vegetação, a exposição à sombra e a quantidade de matéria orgânica presente, entre outros fatores (LEHMANN et al., 2017; BARBOSA et al., 2019; JI et al., 2019; XIN et al., 2022).

Figura 1: Fungo micorrízico crescendo em raiz de milho. Os corpos redondos são esporos e os filamentos filiformes são hifas. A substância que os reveste é a glomalina, revelada por um corante verde.



Autora: Sara Wright - USDA, Domínio Público.

A principal contribuição dos FMAs na agregação do solo está associada principalmente às hifas extrarradiculares e à produção de proteínas do solo, aquelas relacionadas à glomalina (DRIVER et al., 2005; LEHMANN et al., 2017; RILLIG et al., 2017).

Esta glicoproteína, em conjunto com as hifas presente no solo, desempenha um papel significativo no aumento da agregação de partículas, na estabilidade dos agregados e no acúmulo de carbono e nitrogênio do solo (WRIGHT e UPADHYAYA 1998; RILLIG et al., 2001; NICHOLS e WRIGHT 2006; VILELA et al., 2014; WANG et al., 2017; PARIHAR et al., 2020; SEKARAN et al., 2021). Além disso, sua presença está correlacionada com a fertilidade do solo (NICHOLS e WRIGHT 2005). A glomalina possui de 28 a 42% de carbono em sua composição e 3 a 5% de nitrogênio (LOVELOCK et al., 2004) e contribui para a formação de agregados no solo (RILLIG et al., 2002) por meio da secreção liberada pelas hifas nas raízes colonizadas e no solo.

Essa substância também desempenha um papel na proteção dos agregados contra secagem e umedecimento excessivos, graças às suas propriedades hidrofóbicas (GONZÁLEZ-CHAVEZ et al., 2004). A glicoproteína é definida e extraída do solo como proteína do solo relacionada à glomalina.

Xu et al. (2018) demonstraram que os FMAs têm a capacidade de aumentar o teor de clorofila e melhorar a eficiência fotossintética das plantas de milho. A presença da glomalina favorece a estabilidade dos agregados do solo, influencia

positivamente a fertilidade do solo e contribui para o sequestro de carbono no solo, resultando em melhorias no crescimento das plantas em condições de estresse abiótico (IRVING et al., 2021).

Entre os atributos microbiológicos, a biomassa microbiana do solo (BMS) destaca-se como um parâmetro na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, uma vez que representa a fração da matéria orgânica do solo que se decompõe rapidamente (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2015). A BMS representa a fração viva e altamente ativa da matéria orgânica do solo, composta principalmente por fungos, bactérias e arqueias (KASCHUK et al., 2010; DAS et al., 2023).

O trabalho de Mercante (2001) enfatiza a importância da biomassa microbiana como elemento essencial no ciclo do carbono do solo. A atividade microbiana no solo pode ser quantificada por meio da respiração do solo, sendo esta uma ferramenta utilizada como indicador biológico para identificar mudanças na dinâmica do carbono em regiões afetadas por alterações na cobertura do solo, como o desmatamento (FEIGL et al., 1995). A RBS é frequentemente empregada como um indicador de qualidade do solo, pois espelha a atividade microbiana, desempenhando um papel importante no processo de decomposição da matéria orgânica do solo, no ciclo de nutrientes e na manutenção da estrutura do solo (PARKIN et al., 1996; HURSH et al., 2017).

A atividade respiratória está condicionada pelo estado fisiológico da célula microbiana, sendo influenciada por diversos fatores relacionados às condições do solo, tais como umidade do solo, temperatura, disponibilidade de nutrientes, textura, relação carbono/nitrogênio, sistemas integrados de produção, além da presença de resíduos orgânicos (SILVA et al., 2010; DADALTO et al., 2015; ESPÍNDOLA et al., 2018) e que são influenciados principalmente pelas raízes e pelos microrganismos do solo (BHANJA et al., 2019; HAGHIGHI et al., 2021).

A respiração do solo é um processo complexo que engloba atividades biológicas e físicas, isso inclui a produção de CO₂ pelas raízes, fungos micorrízicos e fauna do solo em toda a extensão do perfil do solo, seguida pela liberação subsequente de CO₂ na superfície do solo (ZHAO et al., 2013). Este processo é frequentemente influenciado pelas interações entre a temperatura do solo e o teor de água, e separar os efeitos individuais desses fatores na respiração do solo pode ser desafiador (SILVA et al., 2010).

A RBS é a taxa constante de liberação de dióxido de carbono (CO₂) proveniente da mineralização da matéria orgânica, estimada por meio da evolução do CO₂ ou da absorção de oxigênio (SILVA et al., 2007; DILLY et al., 2008). A principal fonte de liberação de CO₂ nesse processo é predominantemente atribuída à degradação da matéria orgânica, sobretudo conduzida por bactérias e fungos (SILVA et al., 2007).

2.4 Insetos-praga em grãos de milho armazenados

Insetos-praga são uma ocorrência comum em armazéns, e compreender as espécies que infestam os grãos é fundamental. Identificar essas espécies é essencial para avaliar os danos causados e implementar as medidas de controle adequadas, visando evitar prejuízos. As principais espécies de insetos-praga encontradas na massa de grãos compreendem: *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Sitophilus zeamais*, *Sitotroga cerealella*, *Cryptolestes ferrugineos*, *Oryzaephilus surinamensis*, *Plodia interpunctella*, *Laemophloeus minutus*, *Tribolium castaneum*, *Anagasta kuehniella* e *Ephesia elutella* (LORINI e SCHNEIDER 1994; DESHWAL et al., 2020).

Rhyzopertha dominica emerge como a principal praga associada a cultivos de trigo e arroz, enquanto espécies do gênero *Sitophilus* predominam em outros tipos de grãos, resultando em significativos prejuízos devido à capacidade de atacar grãos intactos e ao elevado potencial de destruição que apresentam (PERISIC et al., 2020; SERUMAGA et al., 2021; KASOZI et al., 2021; CORTESE et al., 2022; EMEASOR et al., 2022; SCHEFF et al., 2022). Essas pragas podem ser classificadas em primárias e secundárias, de acordo com os hábitos alimentares, sendo o foco deste estudo a primária *Sitophilus zeamais*. São consideradas pragas primárias aquelas que atacam grãos saudáveis e inteiros, sendo classificadas como primárias internas ou externas, dependendo da parte do grão afetada (PERISIC et al., 2020).

Ao perfurarem os grãos e penetrarem para concluir seu ciclo de desenvolvimento, as pragas primárias internas alimentam-se do interior do grão, propiciando a instalação de outras pragas. As pragas primárias externas danificam a parte externa do grão, alimentam-se da parte interna, embora não completem seu desenvolvimento no interior (LORINI e SCHNEIDER, 1994). O *Sitophilus zeamais*

Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae), conhecido como gorgulho do milho, é uma das principais pragas de grãos armazenados (SILVA et al., 2013).

É considerado uma praga primária interna onde os adultos medem 3 mm de comprimento, a coloração é castanho-escuro com quatro manchas claras nos élitros (asas anteriores), de fácil visualização após a emergência. Uma característica importante é a cabeça projetada para a frente com rostro curvado onde estão as peças bucais. Nas fêmeas, o rostro é mais longo e afilado e nos machos, mais curto e grosso. As larvas são de cor amarelo-claro com a cabeça marrom-escuro e as pupas caracterizam por uma coloração branca (LORINI e SCHNEIDER, 1994; LORINI et al., 2015).

O ciclo de vida do *Sitophilus zeamais* (Figura 2) é composto por quatro estágios: ovo, larva, pupa e adultos. As fêmeas depositam ovos no interior dos grãos. As larvas emergem dos ovos e se alimentam do conteúdo dos grãos, criando galerias internas. Os adultos emergem e continuam o ciclo. A duração de cada estágio varia de acordo com a temperatura e umidade, sendo afetada pelo ambiente de armazenamento. O período de incubação é de 3 a 6 dias, o ciclo de ovo a emergência de adultos é de 34 dias, a média da longevidade dos machos é de 142 dias e das fêmeas de 140 dias. O período de postura é de 104 dias, e o número médio de ovos por fêmea é de 282 (LORINI e SCHNEIDER, 1994; LORINI et al., 2015).

Figura 2 - Ciclo de vida do gorgulho do milho (*Sitophilus zeamais*).



Fonte: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/importancia-del-almacenaje-de-granos-basicos>

Com a habilidade de infestação cruzada, ou seja, podem infestar os grãos no campo e já armazenado, elevado potencial de reprodução e adaptabilidade para sobreviver dentro dos grãos, o milho se torna vulnerável a ataques, tanto no período

de cultivo quanto após a colheita (LORINI et al., 2015). Esses ataques resultam em perda nutricional, diminuição nas taxas de germinação e redução da massa seca do produto, culminando em depreciação do seu valor de mercado.

Os *Sitophilus zeamais* alimentam-se e desenvolvem-se no interior dos grãos. Destaca-se por ser um inseto que mais causa prejuízos aos grãos armazenados (NHAMUCHO et al., 2017; VÉLEZ et al., 2017) em função de provocar prejuízos consideráveis à indústria alimentícia e agrícola (QUELLHORST et al., 2021), tanto pelo dano direto, ou por facilitar a entrada de pragas secundárias. Sua capacidade de infestar e deteriorar grãos (GROOTE et al., 2017; HONG et al., 2018) resulta em perdas substanciais de alimentos e recursos econômicos (NHAMUCHO et al., 2017; ILEKE et al., 2020). Pequenos agricultores são beneficiados quando há uma utilização de práticas agrícolas e tecnologias no armazenamento dos grãos, ocorrendo uma redução considerada nas perdas (KUMAR e KALITA, 2017).

Frazão et al. (2018) ao avaliarem cinco híbridos de milho verificaram que a BR 160 demonstra resistência ao ataque de *Sitophilus zeamais* e também sugeriram que a presença de lectina nos grãos é um dos fatores contribuintes para essa resistência. Adotar genótipos resistentes a insetos-praga oferece uma solução sustentável para diminuir as perdas de sementes armazenadas após a colheita (ACHEAMPONG et al., 2019).

A presença recorrente de insetos-praga em armazéns destaca a seriedade de compreender as espécies que afetam os grãos. A identificação dessas pragas é essencial para estimar os danos e realizar medidas de controle adequadas, evitando prejuízos. A capacidade de infestação cruzada do *Sitophilus zeamais*, aliada ao seu elevado potencial de reprodução, torna o milho suscetível a ataques tanto no cultivo quanto após a colheita, resultando em perdas nutricionais, redução na germinação e depreciação do valor de mercado. O controle eficaz dessas pragas requer o entendimento dos fatores ambientais, genéticos e de manejo, sendo essencial para preservar a qualidade e quantidade dos grãos armazenados. O conhecimento desses fatores é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes no controle dessa praga no armazenamento de grãos.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHEAMPONG, A.; AYERTEY, J.N.; EZIAH, V. Y.; LFIE, B. E. Susceptibility of selected maize seed genotypes to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**. v. 81, p. 62-68, 2019.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 26, p. 241- 248, 2002.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**. v. 5, p. 187-206, 2012.
- AZCÓN-AGUILAR, C.; BAREA, J. M. Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. v. 25, p. 372-396, 2015.
- BARBOSA, M.V.; PEDROSO, D. F.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V.; CARNEIRO, M.A.C. Arbuscular mycorrhizal fungi and *Urochloa brizantha*: symbiosis and spore multiplication. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 49, p. 1-8, 2019.
- 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**. v. 12, p. 136-142, 2008.
- BATTINI, F.; GRONLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN, I. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. **Scientific Reports**. v. 7, 2017.
- BEGUM, N.; QIN, C.; AHANGER, M. A.; RAZA, S.; KHAN, M. I.; ASHRAF, M.; AHMED, N.; ZHANG, L. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1068, 2019.
- BHANJA, S. N.; WANG, J.; SHRESTHA, N.K.; ZHANG, X. Modeling microbial kinetics and thermodynamic processes for quantifying soil CO₂ emission. **Atmospheric Environment**. v. 209, p. 125–135, 2019.
- BI, W.; WENG, B.; YAN, D.; WANG, H.; WANG, M.; YAN, S.; JING, L.; LIU, T.; CHANG, W. Responses of phosphate-solubilizing microorganisms mediated phosphorus cycling to drought-flood abrupt alternation in summer maize field soil. **Frontiers in Microbiology**. v. 12, p. 1-15, 2020.
- BLEVINS, D. G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**. n. 87, p. 4-5, 1999.
- BOLAN, N.S. A critical review of the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**. v. 134, p. 189–207, 1991.

BRUNDRETT, M. C.; TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. **New Phytologist Foundation**. v. 220, p.1108–1115, 2018.

BUNEMANN, E. K. BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E. DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MADER, P.; PULLEMAN, M. SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 120, p. 105-125, 2018.

BUZO, F. S.; GARCIA, N.F.S.; GARÉ, L. M.; GATO, I. M. B.; MARTINS, J. T.; MARTINS, J. O. M.; MORITA, P. R. S.; SILVA, M. S. R. A.; SALES, L. Z. S.; NOGALES, A.; RIGOBELLO, E. C.; ARF, O. Phosphate fertilization and mycorrhizal inoculation increase corn leaf and grain nutrient contents. **Agronomy**. v. 12, p. 1-14, 2022.

BUZO, F. S.; GARÉ, L. M.; GARCIA, N. F. S.; ANDRADE SILVA, M. S. R. DE; MARTINS, J. T.; SILVA, P. H. G. DA; MEIRELES, F. C.; SOUZA SALES, L. Z. DE; NOGALES, A.; RIGOBELLO, E. C.; ARF, O. Effect of mycorrhizae on phosphate fertilization efficiency and maize growth under field conditions. **Scientific reports**, v. 13, p. 3527, 2023.

CARDOSO, E. J. B. N.; NOGUEIRA M. A.; ZANGARO W. Importance of mycorrhizae in tropical soils. In: Azevedo, J., Quecine, M. (Eds.) Diversity and benefits of microorganisms from the tropics. **Research Gate**. p. 245-267, 2017.

CARDOSO, E. J. B. N; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2ª. edição. Piracicaba: ESALQ, p. 221, 2016.

CASTAGNO, L. N., SANNAZZARO, A. I., GONZALEZ, M. E., PIECKENSTAIN, F. L., E ESTRELLA, M. J. Fosfobactérias como atores-chave para superar a deficiência de fósforo em plantas. **Annals of Applied Biology**. v. 178, p. 256-267, 2021.

CHENG, J.; ZHANG, Y.; WANG, H.; CUI, Z.; CAO, C. Sand-fixation plantation type affects soil phosphorus transformation microbial community in a revegetation area of Horqin Sandy Land Northeast China. **Ecological Engineering**. v. 180, 2022.

COELHO, A. C.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; HERNANI, L. C. Cultivo do milho. **Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção**. 2008.

COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. Embrapa. **Circular técnica 78**. 2006.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **BOLETIM DA SAFRA DE GRÃOS - 6º Levantamento - Safra 2023/24**. Brasília: CONAB, 2024. 125 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 05 de abril de 2024.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumulada em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27, p. 893-900. 2003.

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**. v. 3, p. 218-224, 2008.

CORTESE, D.; SILVA, M. M. M.; OLIVEIRA, G. S.; MUSSURY, R. M.; FERNANDES, M. G. Repellency and reduction of offspring emergence potential of some botanical extracts against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) in stored maize. **Insects**. v.13, p.842. 2022.

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

CRITTENDEN, S. J.; POOT, N.; HEINEN, M.; VAN BALEM, D. J. M.; PULLEMAN, M. M. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. **Soil & Tillage Research**. v. 154, p. 136-144, 2015.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Revista Engenharia Agrícola**. v. 35, p. 506-513. 2015.

DAMIN, S.; CARRENHO, R.; MARTINS, S. The influence of mycorrhization on the growth of *Zea mays* L. and the scarification of foliar tissues susceptible to chewing insect attacks. **Brazilian Journal of Botany**. v.43, p. 493–502, 2020.

DAS, D.; PARIES, M.; HOBECKER, K.; GIGL, M.; DAWID, C.; LAM, H. M.; ZHANG, J.; CHEN, M.; GUTJAHR, C. Phosphate starvation response transcription factors enable arbuscular mycorrhiza symbiosis. **Nature Communications**. v. 13, p. 1-12, 2022.

DAS, S.; DEB, S.; SAHOO, S. S.; SAHOO, U. K. Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. **Acta Ecologica Sinica**. v. 43, p. 933-945, 2023.

DEINES, J. M.; PATEL, R.; LIANG, S. -Z.; DADO, W.; LOBELL, D. B. A million kernels of truth: Insights into scalable satellite maize yield mapping and yield gap analysis from an extensive ground dataset in the US corn belt. **Remote Sensing of Environment**. v. 253, p. 112-174, 2021.

DELAVAUX, C. S.; SMITH-RAMESH, L. M, KUEBBING, S. E. Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils. **Ecology**. v. 98, p. 2111–2119, 2017.

DESHWAL, R.; VAIBHAV, V.; KUMAR, N.; KUMAR, A.; SINGH, R. Stored grain insect pests and their management: An overview. **Journal of Entomology and Zoology Studies**. v. 8, p. 969-974, 2020.

DILLY, O.; FRANKE, G.; NII-ANNANG, S.; WEBER, K.; FREESE, D.; ZYAKUN, A.; HUTTL, R. F. Soil respiratory indicators including carbon isotope characteristics in response to copper. **Revista de Geomicrobiologia**. v. 25, p. 390-395, 2008.

DRIVER, J. D.; HOLBEN, W. E.; RILLIG, M. C. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 37, p. 101-106, 2005.

EHISIANYA, C. N.; IKPI, P. O.; OKORE, O. O.; OBEAGU, I. A. Assessment of plant powders as protectants of stored maize grains against maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motsch. [Coleoptera: Curculionidae]. **Nigerian Agricultural Journal**. v. 50, p. 37–45, 2019.

EL-FATTAH, D. A. A.; MAZE, M.; ALI, B. A. A.; AWED, N. M. Role of mycorrhizae in enhancing the economic revenue of water and phosphorus use efficiency in sweet corn (*Zea mays* L. var. *saccharata*) plants. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. v. 22, p. 174-186, 2023.

EMEASOR, K. C.; NWAKANMA, V. N.; & ENYIUKWU, D. N. Evaluation of Toxicity of Some Tropical Flora, Clay and Permethrin against *Sitophilus zeamais* Motsch. on Stored Maize Grains. **Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture**. v. 37, p. 185-196, 2022.

ESPÍNDOLA, S. P.; BOBULSKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Impact of nitrogen additions on soil microbial respiration and temperature sensitivity in native and agricultural ecosystems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Biology**. v. 75, 2018.

FEIGL, B.J., STEUDLER, P.A., CERRI, C.C. Effects of pasture introduction on soil CO₂ emissions during the dry season in the state of Rondônia, Brazil. **Biogeochemistry**. v. 31, p. 1-14, 1995.

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**. v. 3, p. 24-33, 2011.

FERROL, N.; AZCÓN-AGUILAR, C.; Pérez-Tienda, J. Review: Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved. **Plant Science**. v. 280, p. 441-447, 2019.

FRAZÃO, C. A. V.; SILVA, P. R. R.; ALMEIDA, W. A. DE; PONTUAL, E. V.; CRUZ, G. DOS S.; NAPOLEÃO, T. H.; FRANÇA, S. M. DE. Resistance of maize cultivars to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Arquivos do Instituto Biológico**. v. 85, p. 2018.

GIANINAZZI-PEARSON, V.; GIANINAZZI, S. The physiology of vesicular-arbuscular mycorrhizal roots. **Plant and Soil**. v. 71, p. 197-209, 1986.

GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C. A.; GUTIÉRREZ-CASTORENA, M. C.; WRIGHT, S. Hongos micorrízicos arbusculares em la agregación del suelo y su estabilidad. **Terra Latinoamericana**. v. 22, p. 507-514, 2004.

GROOTE, H.; GROOTE, B.; BRUCE, A. Y.; MARANGU, C.; TEFERA, T. Maize storage insects (*Sitophilus zeamais* and *Prostephanus truncatus*) prefer to feed on smaller maize grains and grains with color, especially green. **Journal of Stored Products Research**, v. 71, p. 72–80, 2017.

GUO, M. Soil health assessment and management: recent development in science and practices. **Soil Systems**. v. 5, p. 1-20, 2021.

HAGHIGHI, E.; DAMM, A.; JIMÉNEZ-MARTÍNNEZ, J. Root hydraulic redistribution underlies the insensitivity of soil respiration to combined heat and drought. **Applied Soil Ecology**, v. 167, 2021.

HOLATKO, J.; BRTNICKY, M.; KUCERIK, J.; KOTIANOVA, M.; ELBL, J.; KINTL, A.; KYNICKY, J.; BENADA, O.; DATTA, R.; JANSÁ, J. Glomalin – Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 153, 2021.

HONG, K.-J.; LEE, W.; PARK, Y.-J.; YANG, J.-O. First confirmation of the distribution of rice weevil, *Sitophilus oryzae*, in South Korea. **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, v. 11, p. 69–75, 2018.

HURSH, A.; BALLANTYNE, A.; COOPER, L.; MANETA, M.; KIMBALL, J.; WATTS, J. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. **Global Change Biology**, v. 23, p. 2090–2103, 2017.

ILEKE, K. D.; IDOKO, J. E.; OJO, D. O.; ADESINA, B. C. Evaluation of botanical powders and extracts from Nigerian plants as protectants of maize grains against maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) [Coleoptera: Curculionidae]. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. v. 27, 2020.

IRVING, T. B.; ALPTEKIN, B.; KLEVEN, B.; ANÉ, J. M. A critical review of 25 years of glomalin research: a better mechanical understanding and robust quantification techniques are required. **New Phytologist**, v. 232, p. 1572-1581, 2021.

JACOBY, R.; PEUKERT, M.; SUCCURRO, A.; KOPRIVOVA, A.; KOPRIVA, S. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition – current knowledge and future directions. **Frontiers in Plant Science**. v. 8, p. 1-19, 2017.

JANSÁ, J.; FORCZEK, S.; ROZMOŠ, M.; PÜSCHEL, D.; BUKOVSKÁ, P.; HRŠELOVÁ, H. Arbuscular mycorrhiza and soil organic nitrogen: network of players and interactions. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**. v.6, p. 1-10, 2019.

JI, L.; TAN, W.; CHEN, X. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil & Tillage Research**. v. 185, p. 1-8, 2019.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**. v.61, n.1, p.4-10, 1997.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 42, p. 1-13, 2010.

KASOZI, L. C.; DERERA, J.; TONGOONA, P.; GASURA, E. Seed generation effect on quality of genetic information from maize (*Zea mays* L.) diallel cross for maize weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky) resistance. **Euphytica**. v. 217, p.114-131, 2021.

KEYMER, A.; GUTJAHR, C. Cross-kingdom lipid transfer in arbuscular mycorrhiza symbiosis and beyond. **Current Opinion in Plant Biology**. v. 44, p.137-144, 2018.

KHAN, M. A.; RAHMAN, M. U.; RAMZANI, P. M. A.; ZUBAIR, M.; RASOOL, B.; KHAN, M. K.; AHMED, A.; KHAN, S. A. Associative effects of lignin-derived biochar and arbuscular mycorrhizal fungi applied to soil polluted from Pb-acid batteries effluents on barley grain Safety. **Science of the Total Environment**. v. 710, 2020.

KIBBLEWHITE, M.G., RITZ, K., SWIFT, M.J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society**. v. 363, p. 685–701, 2008.

KINANY, S. E. ACHBANI, E. FAGGROUD, M. OUAHMANE, L. HILALI, R. E.; HAGGOUD, A.; BOUAMRI, R. Effect of organic fertilizer and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated date palm cv. Feggouss. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. v. 18, p. 411-417, 2018.

KOBAE, Y. Dynamic phosphate uptake in arbuscular mycorrhizal roots under field conditions. **Frontiers in Environmental Science**. v. 6, p. 1-12, 2019.

KOHLER, J.; ROLDÁN, A.; CAMPOY, M.; CARAVACA, F. Unraveling the role of hyphal networks from arbuscular mycorrhizal fungi in aggregate stabilization of semiarid soils with different textures and carbonate contents. **Plant Soil**. v. 410, p. 273-281, 2017.

KUMAR, D.; KALITA, P. Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries. **Foods**. v.6, p. 2-22. 2017.

LAMBERS, H., RAVEN, J., SHAVER, G., SMITH, S. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. **Trends in Ecology & Evolution**. v. 23, p. 95–103, 2008.

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

LEHMANN, EF; LEIFHEIT, A.; RILLIG, MC Micorrizas e agregação do solo. In: JOHNSON, NC; GEHRING, C.; JANSÁ, J. Mediação Micorrízica do Solo: Fertilidade, Estrutura e Armazenamento de Carbono. **Elsevier**. p.241-262, 2017.

LIU, H. WANG, X. LIANG, C; AI, Z. WU, Y; GUOBIN LIU. Glomalin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient. **Geoderma**. v. 357, 113921, 2020.

LOIT, K.; SOONVALD, L.; ADAMSON, K.; RUNNO-PAURSON, E.; TEDERSOO, L.; ASTOVER, A. Assessing the effect of commercial arbuscular mycorrhizal fungal inoculum on potato plant disease incidence, yield and the indigenous root fungal community composition. **BioControl**. v. 68, p. 537-547, 2023.

LORINI, I.; SCHNEIDER, S. Pragas de grãos armazenados: resultados de pesquisa. **EMBRAPA-CNPT**. Documentos, 11. p.48, 1994

LOVELOCK, C. E.; WRIGHT, S. F.; CLARK, D. A.; RUESS, R. W. Soil stocks of glomalina produced by arbuscular mycorrhizal fungal across a tropical rain forest landscape. **Journal of Ecology**, v. 92, p. 278- 287, 2004.

LULL, C.; GIL-ORTIZ, R.; BAUTISTA, I.; LIDÓN, A. Seasonal variation and soil texture-related thinning effects on soil microbial and enzymatic properties in a semi-arid pine forest. **Forests**. v.14, p. 1674, 2023.

MA, J., WANG, W.; YANG, J.; QIN, S.; YANG, Y.; SUN, C.; PEI, G.; ZEESHAN, M.; LIAO, H.; LIU, L.; HUANG, J. Mycorrhizal symbiosis promotes the nutrient content accumulation and affects the root exudates in maize. **BMC Plant Biology**. v. 22, p. 64. 2022.

MARRO, N.; LAX, P.; CABELLO, M.; DOUCET, M. E.; BECERRA, A. G. Use of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* as biological control agent of the nematode *Nacobbus aberrans* parasitizing tomato. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. v. 57, p. 668-674, 2014.

MAUSEL, P. W.; Soil quality in Illinois – an example of a soils geography resource analysis. **The Professional Geographer**. v. 23, p. 127 -136, 1971.

MAZAC, R.; MEINILÄ, J.; KORKALO, L.; JÄRVIÖ, N.; JALAVA, M.; TUOMISTO, H. L. Incorporation of novel foods in European diets can reduce global warming potential, water use and land use by over 80%. **Nature Food**. v.3, p. 286-293, 2022.

MERCANTE, F.M. Biomassa e a atividade microbiana: indicadores da qualidade do solo. **Direto no Cerrado**. p. 910, 2001.

MITRA, D.; GUERRA, S.B.E.; KHOSHROU, B.; VILLALOBOS, S. De Los S.; BELZ, C.; CHAUDHARY, P.; SHAHRI, F.N.; DJEBAILI, R.; ADEYEMI, N.O.; EL-BALLAT, E. M.; EL-ESAWI, M.; MORADI, S.; MONDAL, R.; SENAPATI, A.; PANNEERSELVAM, O.; DAS MOHAPATRA, P. K. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on rice growth, development, and stress management with a particular emphasis on strigolactone effects on root development. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 52, p.1591-1621, 2021.

MOREIRA, F. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. da UFLA, 2006.

MORAES, R. F. O DE.; EDUARDO, W. I.; DUARDTE, A. P.; JUNIOR, A. L., B. Resistência de cultivares de milho convencional a lagarta do cartucho. **Revista**

Agrarian. v.11, p. 22-31, 2018.

MOTA, I. C.; GABRIEL, J. S.; MELLONI, R.; PONS, N. A. D. Caracterização ambiental e simbiótica entre plantas e fungos micorrízicos da região do Pico dos Marins, Serra da Mantiqueira, SP/MG. **Revista brasileira de Geografia Física.** v. 16, p. 1531-1551, 2023.

NAFADY, N. A.; HASHEM, M.; HASSAM, E. A.; AHMED, H. A. M.; ALAMRI, S. A. The combined effect of arbuscular mycorrhizae and plant-growth-promoting yeast improves sunflower defense against *Macrophomina phaseolina* diseases. **Biological Control.** v. 138, p. 1-9. 2019.

NARANG, R. A.; ALTMANN, T. Phosphate acquisition heterosis in *Arabidopsis thaliana*: a morphological and physiological analysis. *Plant and Soil.* v. 234, p. 91–97, 2021.

NHAMUCHO, E.; MUGO, S.; GOHOLE, L.; TEFERA, T.; KINYUA, M.; MULIMA, E. Resistance of selected Mozambican local and improved maize genotypes to maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky). **Journal of Stored Products Research.** v. 73, p. 115–124, 2017.

NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S. F. Comparison of glomalin and humic acid in eight native U.S. soils. **Soil Science.** v.170, p. 985–997, 2005.

NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S.F. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools. **Biology and Fertility of Soils.** v.43, p. 215–220, 2006.

NÓBREGA, J.C.A.; LIMA, J. M.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O.; MOTTA, P. E. F. Fosfato e micorriza na estabilidade de agregados em amostras de latossolos cultivados e não-cultivados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.36, n.11, p.1425-1435, 2001.

PARKIN, T.B., DORAN, J.W., FRANCO-VIZCAÍNO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W. et al. Methods for assessing soil quality. **Madison: Soil Science Society of America.** p.231-245, 1996.

PARIHAR, M.; RAKSHIT, A.; MEENA, V. S.; GUPTA, V.K.; RANA, K.; CHOUDHARY, M.; TIWWARI, G.; MISHRA, P. K.; PATTANAYAK, A.; BISHT, J. K.; JATAV, S. S.; KHATI, P.; JATAV, H. S. The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. **Archives of Microbiology.** v. 202, p. 1581-1596, 2020.

PAZ-ARES, J.; PUGA, M. I.; ROJAS-TRIANA, M.; MARTINEZ-HEVIA, I.; DIAZ, S.; POZA-CARRIÓN, C.; MINÁMBRES, M.; LEYVA, A. Plant adaptation to low phosphorus availability: Core signaling, crosstalks, and applied implications. **Molecular Plant.** v. 15, p. 104-124, 2022.

PEREIRA, S. M. S.; JUNIOR, O. J. S.; RAMOS, M. L. G.; KONRAD, M. L. F. A Esporulação e colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares em *Paepalanthus* sp. sob diferentes níveis de umidade em campo rupestre. **Uniciências.** v. 26, p. 93-99, 2023.

PERISIC, V.; PERISIC, V.; VUKAJLOVIC, F.; PREDOJEVIC, D.; RAJICIC, V.; ANDRIC, G.; KLJAJIC, P. Effects of abamectin on lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae), infestation on some stored grains. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**. v.30, 2020.

QUELLHORST, H.; ATHANASSIOU, C. G.; ZHU, K. Y.; MORRISON, W. R. The biology, ecology and management of the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae). **Journal of Stored Products Research**. v. 94, 2021.

RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Soil C turnover, microbial biomass and respiration, and enzymatic activities following rangeland conversion to wheat–alfalfa cropping in a semi-arid climate. **Environmental Earth Sciences**. v. 72, p. 5073- 5088, 2014.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; ZARIN, D. J.; OLIVEIRA, F. A.; VASCONCELOS, S. S.; CARVALHO, C. J. R.; SANTOS, M. M. L. S. Effect of water availability on soil microbial biomass in secondary forest in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 377-384, 2015.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing Vienna, **Austria**, 2023.

RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; NICHOLS, K.A.; SCHMIDT, W. F.; TORN, M. S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant and Soil**. v.233, p. 167-177, 2001.

RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; EVINER, V. T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalina in soil aggregation: comparing effects off five plant species. **Plant and Soil**, v. 238, p. 325-333, 2002.

RILLIG, M.C.; MULLER, L. A.; LEHMANN, A. Soil aggregates as massively simultaneous evolutionary incubators. **The ISME Jornal**. v.11, p.1943-1948, 2017.

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**. v. 16, p. 23-27, 2007.

ROTH, R.; PASZKOWSKI, U. Plant carbon nourishment of arbuscular mycorrhizal fungi. **Current Opinion in Plant Biology**. v. 39, p. 50-58, 2017.

RUBIN, J.G.K.R.; STÜRMER, S.L. Potencial de inóculo micorrízico e importância do comprimento do micélio para a agregação de solos de ambiente fluvial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 59-68, 2015.

RYAN, J.; IBRIKCI, H.; DELGADO, A.; TORRENT, J.; SOMMER, R.; RASHID, A. Significance of Phosphorus for Agriculture and the Environment in the West Asia and North Africa Region. **Advances in Agronomy**. v. 114, p. 91-153, 2012.

SAIA, S. et al. Growth-promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi differentially benefit tomato and corn depending upon the supplied form of phosphorus. **Mycorrhiza**. v. 30, p. 133-147, 2020.

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

SANTANA, L. R.; SILVA, L. N.; TAVARES, G. G. BATISTA, P. F. CABRAL, J. S. R. SOUCHIE, E. L. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with maize plants during hydric deficit. **Scientific Reports**. v. 13, p. 1519, 2023.

SAPAGNOLETTI, F. N.; CORNERO, M. CHIOCCHIO, V. LAVADO, R. S.; ROBERTS, I. N. Arbuscular mycorrhiza protects soybean plants against *Macrophomina phaseolina* even under nitrogen fertilization. **European Journal of Plant Pathology**. v. 156, p. 839-849, 2020.

SARAPATKA, B.; SOLANO, D. P. A.; CIŽMÁR, D. Can glomalin be used as an indicator for erosion to soil and related changes in organic matter and nutrients? **Catena**. v. 181, p. 104 - 178, 2019.

SASABUCHI, I. T. M.; KRIEGER, K. S.; NUNES, R. S.; FERREIRA, A. C.; XAVIER, G. T. M.; URZEDO, A. L.; CARVALHO, W. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. **Química Nova**. v. 46, p. 185-198, 2023.

SCHEFF, D. S.; CAMPBELL, J. F.; ARTHUR, F. H. Seasonal, landscape, and attractant effects on lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.), captures in Northeast Kansas. **Agronomy**, v. 12, 2022.

SEKARAN, U.; SAGAR, K. L; KUMAR, S. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. **Soil and Tillage Research**. v. 208, 2021.

SHI, J.; ZHAO, B.; JIN, R.; HOU, L.; ZHANG, X.; DAI, H.; YU, N.; WANG, E. A phosphate starvation response-regulated receptor-like kinase, OsADK1, is required for mycorrhizal symbiosis and phosphate starvation responses. **New Phytologist**. v. 236, p. 2282-2293, 2022.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). **Comunicado Técnico 99**. Embrapa. 2007.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; FONTES, M. A.; SILVA, E. M. R. Enzyme Activity, Glomalin, and Soil Organic Carbon in Agroforestry Systems. **Floresta e Ambiente**. v. 27, p. 2-9, 2020.

SILVA, L. B., SILVA, L. S., MANCIN, A. C., CARVALHO, G. S., SILVA, J. C., ANDRADE, L. H. Comportamento do gorgulho-do-milho frente às doses de permetrina. **Comunicata Scientiae**. v. 4, p. 26-34, 2013.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALIVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SMITH, S. E.; READ, D. Colonization of roots and anatomy of arbuscular mycorrhizas. In: **Mycorrhizal Symbiosis**. Academic Press. v. 1, p. 42-90, 2008.

SOUSA, C. S.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; LIMA, F. S. Glomalina: características, produção, limitações e contribuição nos solos. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 33, p. 3033-3044, 2012.

SOUZA, F. A.; STÜRMER, S. L.; CARRENHO, R.; TRUFEM, S. B. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In **Micorrizas: 30 anos de Pesquisas no Brasil**. v.1 p. 15-74, 2010.

SOUZA, V. C.; SILVA, R. A.; CARDOSO, G. D.; BARRETO, A. F. Estudos sobre fungos micorrízicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, p. 612-618, 2006.

SSERUMAGA, J. P.; MAKUMBI, D.; OIKEH, S. O.; OTIM, M.; MACHIDA, L.; ANANI, B. Y.; NHAMUCHO, E.; BEYENE, Y.; MUGO, S. Evaluation of early-generation tropical maize testcrosses for grain-yield potential and weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky) resistance. **Crop Protection**. v. 139, 2021.

STOFFEL, S. C. G., SOARES, C. R. F. S., MEYER, E., LOVATO, P. E.; GIACHINI, A. J. Yield increase of corn inoculated with a commercial arbuscular mycorrhizal inoculant in Brazil. **Ciência Rural**. v. 50, p. 1-10, 2020.

STURMER, S. L.; OLIVEIRA, L. Z.; MORTON, J. B. Gigasporaceae versus Glomeraceae (phylum Glomeromycota): a biogeographic tale of dominance in maritime sand dunes. **Fungal Ecology**. v. 32, p. 49- 56, 2018.

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

TANDZI, L. N. MUTENGWA, C. S. Estimation of maize (*Zea mays* L.) Yield per harvest area: Appropriate Methods. **Agronomy**. v.10, p. 1-18, 2020.

VALLEJOS-TORRES, G.; ESPINOZA, E.; MARÍNDÍAZ, J.; SOLIS, R.; ARÉVALO, L. The role of arbuscular mycorrhizal fungi against root-knot nematode infections in coffee plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. v. 21, p. 364-373, 2021.

VÉLEZ, M.; ROCA, K.; DÁVILA, K.; SANTOS, R. C. DOS; GUEDES, R. N. C. Diatomaceous earth against Ecuadorian populations of the maize weevil (*Sitophilus zeamais*). **Journal of Stored Products Research**. v. 103, 2023.

VÉLEZ, M. BARBOSA, W. F. QUINTERO, J. M. CHEDIAK, M. GUEDES, R. N. Deltamethrin- and spinosad-mediated survival, activity and avoidance of the grain

weevils *Sitophilus granarius* and *S. zeamais*. **Journal of Stored Products Research**. v. 74, p. 56-65, 2017.

VILELA, L.A.F.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; PAULINO, H. B.; SIQUEIRA, J. O.; SANTOS, V. L. DA S.; CARNEIRO, M. A. C. Arbuscular mycorrhizal fungus in microbial activity and aggregation of a Cerrado Oxisol in crop sequence. **Agricultural Sciences**. v. 38, p. 34-42, 2014.

WALKER, C.; SCHÜßLER, A.; VINCENT, B.; CRANENBROUCK, S.; DECLERCK, S. Anchoring the species *Rhizophagus intraradices* (formerly *Glomus intraradices*). **Fungal Systematics and Evolution**. v. 8, p. 179-201, 2021.

WANG, Y.; WANG, F.; LU, H.; LIU, Y.; MAO, C. Phosphate Uptake and Transport in Plants: An Elaborate Regulatory System. **Plant Cell Physiol**. v.62, p. 564-572, 2021.

WANG, W.; ZHONG, Z.; WANG, Q.; WANG, H.; FU, Y.; HE, X. Glomalin contributed more carbon and nutrients in deeper soils and associated differently with climates and soil properties in vertical profiles. **Scientific Reports**. v. 7, 2017.

WATTS-WILLIAMS, S.; GILBER, S. E. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the concentration and distribution of nutrients in the grain differently in barley compared with wheat. **Plants People Planet**. v. 3, p. 567–5577, 2021.

WHITE, R. R., GLEASON, C. B. Global human-edible nutrient supplies, their sources, and correlations with agricultural environmental impact. **Scientific Reports**. v.12, 2022.

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

XIN, Y.; FAN, Y.; BABALOLA, O. O.; ZHANG, X.; YANG, W. Legacy effects of biochar and compost addition on arbuscular mycorrhizal fungal community and co-occurrence network in black soil. **Microorganisms**. v. 10, p. 1-13, 2022.

XU, H., LU, Y., TONG, S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of maize seedlings under salt stress. **Emirates Journal of Food and Agriculture**. 30, p. 199-204, 2018.

XU, H.; SHAO, H.; LU, T. Arbuscular mycorrhiza fungi and related soil microbial activity drive carbon mineralization in the maize rhizosphere. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 182, 2019.

ZHANG, L.; CHU, Q.; ZHOU, J.; RENGEL, Z.; FENG, G. Soil phosphorus availability determines the preference for direct or mycorrhizal phosphorus uptake pathway in maize. **Geoderma**. v. 403, 2021.

ZHAO, Z. M.; ZHAO, C. Y.; YAN, Y.Y.; LI, J. Y. LI, J.; SHI, F. Z. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and moisture in an oasis cotton field, central Asia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 168, p. 46-52, 2013.

CAPÍTULO 1

Aplicação do inoculante micorrízico *Rhizophagus intraradices* e adubação fosfatada na produtividade e absorção de P pelo milho e atributos biológicos do solo

Resumo

As plantas desenvolveram estratégias para adquirir recursos do solo além da absorção direta pelas raízes, como a associação simbiótica com fungos micorrízicos arbusculares. Esses fungos colonizam as raízes, aumentando a superfície de absorção e facilitando a aquisição de nutrientes essenciais, como fósforo. Essa simbiose melhora o crescimento e a produtividade das plantas, além de contribuir para a ciclagem de nutrientes e a qualidade do solo. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos do inoculante micorrízico à base de *Rhizophagus intraradices* (Rootella® BR ULTRA) e de diferentes doses de P_2O_5 sobre a colonização, produtividade de milho, teor de glomalina, respiração basal do solo, disponibilidade de P no solo, planta e grão do milho. O experimento foi conduzido em uma área irrigada por pivô central na fazenda Santo Antônio, município de Itaetê, BA. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 3x2 com 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos pela combinação de 3 doses de P_2O_5 (0; 50 e 100% do recomendado) e inoculação micorrízica (com e sem inoculante FMA). Avaliou-se a colonização micorrízica, intensidade da colonização, proteína do solo relacionado a glomalina facilmente extraível, respiração basal do solo, teor de fósforo dos grãos, folhas e solo, pH do solo em água e características das espigas (comprimento, diâmetro, número de fileiras, grãos por fileira e por espiga), massa dos grãos e matéria seca da parte aérea. A inoculação com *Rhizophagus intraradices* resultou em uma maior colonização micorrízica das plantas de milho com média de 61,75% a 74,75 e média de 28% a 63,25 para os tratamentos sem inoculante micorrízico. Observou-se que a inoculação promoveu uma colonização mais intensa das plantas no campo em comparação com os tratamentos sem inoculação e sem adubação fosfatada, bem como em relação aos tratamentos submetidos a uma adubação equivalente a 100% da dose recomendada de fósforo. A produtividade do milho não aumentou com a inoculação e doses adicionais de fósforo, sugerindo que a influência do FMA inoculado não foi suficiente para superar os efeitos da comunidade nativa de FMA presente no solo.

Palavras-chave: Glomalina, fungos micorrízicos arbusculares, Respiração Basal, Sustentabilidade, *Zea mays*

Application of Mycorrhizal Inoculant *Rhizophagus intraradices* and Phosphate Fertilization on Corn Productivity and Soil Health

Abstract

Plants have developed strategies to acquire resources from the soil beyond direct absorption by roots, such as the symbiotic association with arbuscular mycorrhizal fungi. These fungi colonize the roots, increasing the absorption surface and facilitating the acquisition of essential nutrients like phosphorus. This symbiosis enhances plant growth and productivity while contributing to nutrient cycling and soil quality. This study aims to evaluate the effects of the mycorrhizal inoculant based on *Rhizophagus intraradices* (Rootella® BR ULTRA) and different doses of P₂O₅ on colonization, corn productivity, glomalin content, soil basal respiration, and the availability of P in the soil, plant, and corn grain. The experiment was conducted in an area irrigated by a central pivot at the Santo Antônio farm, Itaetê, BA. The experimental design used was a randomized block design in a 3x2 factorial scheme with four replicates. The treatments consisted of the combination of three P₂O₅ doses (0; 50, and 100% of the recommended) and mycorrhizal inoculation (with and without AMF inoculant). Mycorrhizal colonization, colonization intensity, easily extractable glomalin-related soil protein, soil basal respiration, phosphorus content in grains, leaves, and soil, soil pH in water, ear characteristics (length, diameter, number of rows, grains per row and per ear), grain mass, and aerial dry matter were evaluated. Inoculation with *Rhizophagus intraradices* resulted in greater mycorrhizal colonization of corn plants, with an average of 61.75% to 74.75% and an average of 28% to 63.25% for treatments without mycorrhizal inoculant. It was observed that inoculation promoted more intense colonization of plants in the field compared to treatments without inoculation and without phosphorus fertilization, as well as treatments subjected to fertilization equivalent to 100% of the recommended phosphorus dose. Corn productivity did not increase with inoculation and additional phosphorus doses, suggesting that the influence of the inoculated AMF was not sufficient to overcome the effects of the native AMF community present in the soil.

Keywords: Glomalin, Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Basal Respiration, Sustainability, *Zea mays*

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L) é uma planta anual da família Poaceae, de grande demanda mundial, sendo cultivada em todas as regiões do Brasil. Com metabolismo do tipo C4 e raízes fasciculadas, absorve, em média, 600 mm de água durante seu ciclo (COELHO et al., 2008). O milho é considerado uma das culturas de cereais mais importantes no comércio agrícola mundial e de relevância na segurança alimentar global (EHISIANYA et al., 2019).

Os principais fatores que mais afetam a produtividade do milho incluem o clima, o manejo de nutrientes, a fertilidade do solo, as práticas culturais, o potencial genético do genótipo e o controle de pragas e doenças (AMADO et al. 2002; TANDZI e MUTENGWA, 2020; DEINES et al., 2021). Evidências indicam que as plantas desenvolveram estratégias, além da absorção direta através das raízes, para adquirir recursos do solo (LAMBERS et al., 2008). Uma das estratégias é a simbiose com fungos micorrízicos, os quais colonizam as raízes das plantas e lançam suas hifas, elas se ramificam no solo, resultando em um aumento da absorção de fósforo pelas raízes (BLEVINS, 1999).

O processo de sucessão vegetal pode contar com os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que, por meio de diferentes fatores, como a produção da glomalina, contribuem para a estabilidade dos agregados, consequentemente, melhorando a qualidade do solo (HOSSAIN et al., 2021). A glomalina é uma glicoproteína produzida por FMAs que colabora para a formação de agregados no solo, melhorando a sua estrutura e aumentando a disponibilidade de carbono para os microrganismos (JI et al., 2019; XIN et al., 2022). Isso beneficia a respiração do solo e o aumento da biomassa microbiana.

A respiração basal do solo consiste na soma total de todas as funções metabólicas das quais o CO₂ é produzido, sendo considerada como a medida principal para avaliar a atividade microbiana do solo (ZHAO et al., 2013). A adubação fosfatada está relacionada à nutrição das plantas, assim, um suprimento adequado de P promove o desenvolvimento das raízes, levando a uma maior absorção de nutrientes (HANSEL, 2013). O P é um dos nutrientes mais limitantes nos solos agrícolas e para

a produção da cultura do milho, principalmente devido à sua baixa mobilidade no solo (BATTINI et al., 2017), o que gera a dependência de fertilizantes minerais.

Culturas de valor econômico, como o milho, soja e o trigo, podem ser micorrizadas e sua nutrição é influenciada pela biologia dos FMA (KOBAE, 2019; KHAN et al., 2020; SAPAGNOLETTI et al., 2020; WATTS-WILLIAMS e GILBER, 2021; MA et al., 2022). Com isso, uma melhor compreensão dos sistemas de absorção de nutrientes minerais realizados pelos FMAs pode ajudar no planejamento e estabelecimento de um sistema agrícola sustentável e com economia de recursos (FERROL et al., 2019).

A hipótese estabelecida é que, por meio da combinação do inoculante comercial à base de *Rhizophagus intraradices* com uma dose intermediária de fósforo, seja possível alcançar, na produção de milho, os mesmos resultados obtidos com a dose máxima de fósforo, mesmo na ausência da inoculação. Além disso, espera-se que essa combinação possa influenciar positivamente os atributos biológicos do solo, como a concentração de glomalina e a respiração basal do solo. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos do inoculante micorrízico à base de *Rhizophagus intraradices* e de diferentes doses de P_2O_5 sobre a colonização, produtividade de milho, teor de glomalina, respiração basal do solo, disponibilidade de P no solo, planta e grão do milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do Experimento

O estudo foi conduzido na Fazenda Santo Antônio - Itaitê-BA, localizada no município da Chapada Diamantina (latitude 12° 59' 9" S, 40° 58' 22" W e longitude - 12,985833, -40,972778, com altitude de 321 metros), no período de outubro de 2022 a fevereiro de 2023. A região possui um clima semiárido, caracterizado como subúmido a seco, com uma média anual de precipitação pluviométrica de 716 mm. A maior parte da chuva concentra-se entre os meses de novembro e março, com períodos mais secos entre maio e outubro (Muritiba, 2008).

A fim de criar uma amostra composta com a finalidade de realizar a caracterização física e química do solo, 30 amostras simples de solo foram coletadas na área experimental na camada de 0 a 0,20 m, antes da implantação do experimento.

As coletas foram realizadas de maneira uniforme, em volume e profundidade, utilizando uma furadeira elétrica com broca de 0,40m de comprimento. A área não possui histórico de uso de qualquer inoculante micorrízico.

A área foi cultivada por anos com a grama coast-cross (*Cynodon doctylon*) para pastejo direto e também para corte de feno. Em 2019, a área foi convertida para agricultura com cultivo de plantas anuais, como milho e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho, textura franca, com valores de granulometria de 415, 485 e 100 g kg⁻¹, de areia, silte e argila, respectivamente. Os atributos químicos avaliados na camada de 0 a 0,20m encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química do solo camada 0 - 0,20m da área experimental.

pH H ₂ O	P	S	MO	K	Al	Ca	Mg		
	----- mg dm ⁻³ -----		g dm ⁻³	----- cmolc dm ⁻³ -----					
5,75	29,18	4,27	22,15	0,44	0	4,96	1,41		
H+Al	CTCefetiva	SB	V	M	Cu	Fe	Mn	Zn	B
-----	cmolc dm ⁻³ ; -----		%	%	----- mg dm ⁻³ -----				
4,61	6,83	6,98	61	0	0,37	91,74	178,16	5,95	0,92

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições totalizando 24 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos em esquema fatorial 3x2 (três níveis de P=0, 50 e 100%, dose recomendada) e inoculação micorrízica (com e sem inoculante FMA). As sementes foram colocadas dentro de um saco plástico, para realizar o tratamento utilizando o método do saco e seguindo a recomendação do fabricante foi adicionado 150 g do produto em pó para a quantidade de sementes recomendada por hectare, foi adicionado também goma xantana para melhorar a adesão do inoculante na semente. Em seguida, todo o conteúdo do saco foi agitado repetidamente até que o produto aderisse de maneira uniforme às sementes. O inoculante utilizado é conhecido como Rootella® BR ULTRA, contendo 167.000 propágulos de *Rhizophagus intraradices* por grama de produto. As sementes do híbrido do milho foram adquiridas pelos proprietários da Fazenda Santo Antônio.

2.3 Instalação e condução

O solo foi submetido a um preparo mecanizado antes da semeadura, começando com uma aração a uma profundidade de 20 cm, seguida de gradagem.

A semeadura do milho foi realizada, mecanicamente no dia 10 de outubro de 2022, em área sob sistema de plantio convencional, utilizou-se o híbrido do milho Pioneer P3707 VYH, com uma plantadeira Jumil JM-2880 Pd EX, de 9 linhas.

Foram semeadas 60.000 sementes ha^{-1} , em um espaçamento de 50 cm entre linha e densidade de sementes de 3.3 sementes por metro. As parcelas experimentais possuíam 6 x 4 m com espaçamento de 1 m entre as parcelas. Para reduzir os efeitos da borda, as plantas da primeira linha de cada lado foram removidas durante a colheita, considerando apenas as plantas da segunda fileira de cada lado como área útil.

Para a adubação com micronutrientes, foram utilizados 1,5 kg ha^{-1} de ácido bórico, 2 kg ha^{-1} de sulfato de zinco e 150 g ha^{-1} de molibdato de sódio. Todos os ajustes de cobertura de macro e micronutrientes foram feitos usando uma bomba de irrigação central em um sistema de fertilização.

Como fonte de P foi utilizado o monoamônio fosfato (MAP - 54 % P_2O_5 e 12% de nitrogênio), as parcelas com 100% da dose de fósforo receberam 108 kg de P ha^{-1} , as parcelas que receberam 50% da dose, ficaram com 54 kg de P ha^{-1} , e as parcelas de 0%, não receberam fósforo. Também utilizou-se 247 kg ha^{-1} de N, sendo as fontes ureia, MAP e sulfato de amônia, 141 kg ha^{-1} de K, em que a fonte foi cloreto de potássio e 24,21 kg ha^{-1} de S na forma de sulfato de amônio e sulfato de zinco. A irrigação foi realizada por pivô central, onde o manejo da irrigação variou em função do estágio fenológico do milho, sua necessidade hídrica, clima e temperatura local no município de Itaetê. O manejo de plantas invasoras foi efetuado com a aplicação do herbicida Primestra Gold® atrazina com s- metaclo-ro.

A primeira avaliação ocorreu aos 60 dias após a semeadura (florescimento – estágio R2), foram feitas nas linhas centrais de cada subparcela, ou seja, na área útil, descartou uma linha de cada lado da parcela, concentrando a coleta no centro de cada bloco.

2.4 Primeira avaliação

a) Porcentagem de colonização: foram coletadas raízes finas de 10 plantas por parcela. Posteriormente lavadas em água corrente, clarificadas e coradas de acordo com método de Vierheilig et al. (1998). A porcentagem de colonização das raízes foi determinada pelo método da placa quadriculada, segundo Giovannetti e Mosse (1980).

b) Intensidade de colonização: foi determinada pela observação da densidade de hifas internas e presença de vesículas e arbúsculos em microscópio com aumento de 100x, atribuindo-se notas de 0 a 5, assim avaliadas: (1) 0 inexistência de colonização; (2) 1 a 25% do volume de raízes ocupado pelas estruturas fúngicas, colonização escassa e pouco arbúsculos, somente ponto de entrada; (3) 26 a 50% do volume de raízes ocupado por estrutura fúngicas; (4) 51 a 75% do volume de raízes ocupados por estruturas fúngicas; (5) mais de 75% do volume de raízes ocupadas por estruturas fúngicas, córtex densamente colonizado e com ampla produção de arbúsculos (RHEINHEIMER e KAMINSKI, 1995).

c) Proteína do solo relacionada a glomalina: foi realizada a partir de amostras de solo (terra fina seca ao ar), peneirada em malha de 2 mm. Os teores da proteína do solo relacionado a glomalina facilmente extraível foi determinado de acordo com a metodologia de Wright e Upadhyaya (1996) com extração em citrato de sódio 20 mM, pH 7,0 em autoclave e determinada pelo método de Bradford (1976).

d) Respiração basal do solo: Foi determinada seguindo a metodologia descrita por Mendonça e Matos (2005), cujo princípio do método consiste na captura de CO₂ liberado da respiração microbiana pela solução de NaOH. Inicialmente foram pesadas 50 g de cada amostra de solo em duplicata e colocada em béquer de 100 ml, previamente identificados. Essas amostras foram umedecidas à 60% da capacidade de campo e colocadas dentro de um pote plástico juntamente com um becker de 100 ml contendo 10 ml de NaOH 0,5 M, sendo tampados imediatamente. Após sete dias de incubação, com temperatura ambiente de 26 °C, os béqueres foram retirados do pote plástico, sendo adicionado 10 mL de uma solução de cloreto de bário a 0,5 mol L⁻¹ e três gotas de fenolftaleína 1%. Em seguida foi titulada com HCl 0,5 mol L⁻¹, imediatamente após a adição do indicador. O ponto de viragem ocorreu pela mudança da cor (branca para cor rosa), anotando-se o volume gasto. O mesmo procedimento foi realizado na prova em branco.

e) Teor de P nas folhas: foram coletadas folhas de 10 plantas e secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C. Na sequência, 0,25 g de biomassa foram submetidos à digestão sulfúrica para determinação dos teores de P por espectrofotometria (TEDESCO et al.,1995) expressos em mg kg⁻¹.

2.5 Segunda avaliação

No estágio de maturidade fisiológica do milho (R6), foram conduzidas as seguintes análises, utilizando 10 plantas coletadas, totalizando 240 plantas avaliadas:

a) Comprimento da espiga (CE): foi determinado o comprimento das espigas com o auxílio de uma régua graduada.

b) Diâmetro da espiga (DE): o diâmetro de cada espiga foi determinado, sem a retirada dos grãos, com auxílio de um paquímetro.

c) Fileira por espiga (FE) e grãos por fileira (GF): para calcular as médias dos grãos realizou-se a contagem do número de fileiras e do número de grãos de uma fileira representativa de cada uma das dez espigas.

d) Grãos por espiga (GE) e massa dos grãos (MG): as espigas foram despalhadas e contados para determinar a quantidade de grãos e posteriormente foram pesados para determinar a massa dos grãos.

e) Massa seca da parte aérea (MSPA): as dez plantas coletadas foram cortadas próximas ao solo, foram colocadas para secar em estufa de circulação de ar forçado, a 65 °C, até manter massa constante. Os valores obtidos foram então expressos em gramas por planta.

f) Produtividade de grãos (PRODT): foi estimada a partir da colheita de 10 espigas por parcela e da massa total dos grãos provenientes das espigas que atingiram a maturidade fisiológica, os dados foram convertidos para kg ha⁻¹ a 13% de umidade.

g) Massa de 100 grãos: 100 grãos de cada bloco foram contados em seguida submetidos a uma estufa de circulação forçada de ar a 105 °C, com correção da umidade para 13%. Posteriormente os grãos foram triturados para determinar o teor de fósforo nos grãos.

h) Teor de P no solo: amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 para realização das análises do pH e teor de P no solo no final do experimento seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017).

i) Teor de P no grão: após colheita, as espigas foram debulhadas e, após avaliação, cerca de 10 g de grãos foram separados, secados em estufa de circulação forçada a 65°C até massa constante e moídos para análise de fósforo, seguindo a metodologia de Carmo et al. (2000).

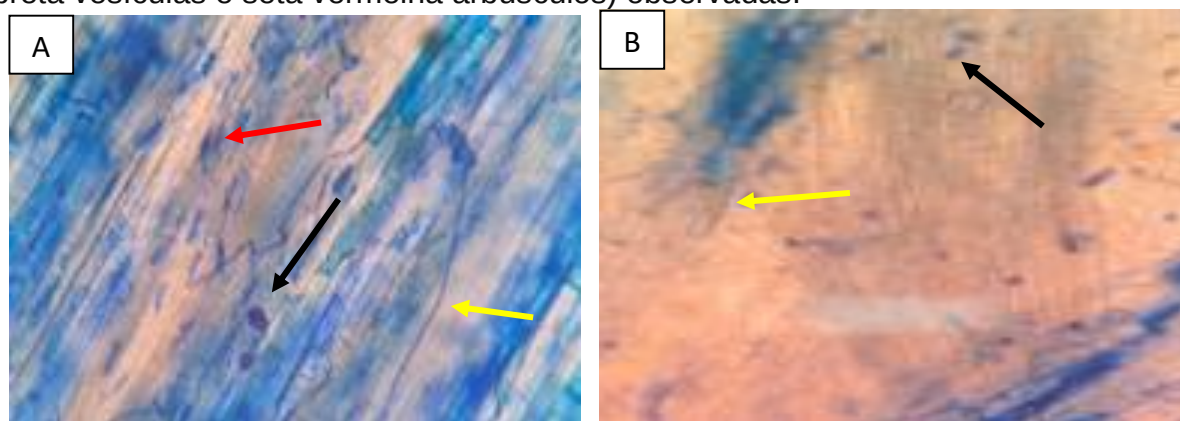
2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilke a 5% de significância e em seguida foram submetidos à análise de variância. As médias das doses foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade e as médias da inoculação foram comparadas pelo teste F a 5% de probabilidade para os efeitos simples. Quando houve interação significativa, desdobrou-se os efeitos das doses dentro de cada nível de inoculante e inoculante dentro de cada nível de dose. As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Utilizando-se o pacote ExpDes.pt no software estatístico “R” (R CORE TEAM, 2023).

3. RESULTADOS

O inoculante comercial à base de *Rhizophagus intraradices* colonizou as raízes do milho, sendo possível identificar estruturas típicas dos FMAs (Figuras 1 a e b). Todas as amostras de raízes de milho analisadas apresentaram colonização micorrízica.

Figura 1. Colonização micorrízica de milho inoculadas com *Rhizophagus intraradices*. Figura a de tratamento apenas com o inoculante micorrízico e figura b apenas com dose 50 de fósforo e sem o inoculante - com suas estruturas (seta amarela hifas, seta preta vesículas e seta vermelha arbúsculos) observadas.

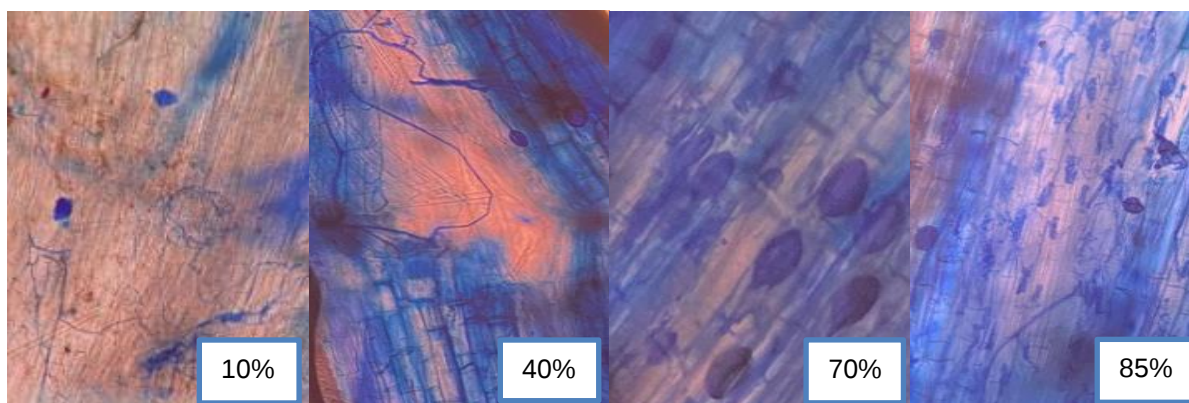


Fonte: Damiana Souza, 2023

As doses de P_2O_5 (0 e 100) dentro do nível com inoculante foram estatisticamente iguais para a porcentagem de colonização (Tabela 2). Comparando a dose 0, com a dose 100, houve uma queda de apenas 5,25% na colonização das raízes de milho. O percentual de colonização micorrízica das plantas inoculadas variou de 61,75% a 74,75%.

Estruturas como hifas, arbúsculos e vesículas foram observadas nas raízes das plantas inoculadas, enquanto as plantas não inoculadas apresentaram apenas hifas e vesículas. A intensidade de colonização radicular variou de 10% a 85% (Figura 2), para os tratamentos com inoculante a base de *Rhizophagus intraradices*.

Figura 2. Intensidade de colonização radicular, no aumento de 100x, em amostras de raízes de milho.



Fonte: Damiana Souza, 2023.

Houve efeito ($p < 0,05$) na dose 0 para os tratamentos com inoculante FMA na variável intensidade (Tabela 2), sendo superior as doses 50 e 100 com inoculante. Para os tratamentos doses de fósforo e sem inoculante, a taxa de intensidade de colonização variou de 21,25% a 57,5% (Tabela 2). A dose 0 com FMA promoveu maior intensidade de colonização nas raízes de milho, em relação aos demais tratamentos.

Tabela 2. Valores médios para colonização e intensidade de colonização de raízes de milho inoculadas com *Rhizophagus intraradices* com diferentes doses de fósforo e sem inoculante micorrízico.

Dose de P	Colonização (%)	
	SI	FMA
0	63,25Ab	74,75Aa
50	58,25Aa	61,75Ba
100	28Bb	69,5Aa
CV (%) = 5,61		
Dose de P	Intensidade de colonização (%)	
	SI	FMA
0	57,5Ab	85Aa
50	38,75Bb	47,5Ba
100	21,25Ca	12,5Cb
CV (%) = 5,65		

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente si pelo teste de F a 5% de probabilidade.

Para a interação entre dose e inoculante houve efeito significativo na variável produtividade (PRODT) (Tabela 3) e efeito isolado de doses de fósforo para comprimento da espiga (CE) e grãos por espiga (GE). Efeito isolado da inoculação foi verificado para as variáveis massa do grão (MG) e PRODT.

Tabela 3. Efeito do milho inoculação com fungos micorrizicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo na produção do milho.

FV	GL	QM				
		CE	DE	FE	GF	GE
Bloco	3	0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,26 ^{ns}	687,00 ^{ns}
Dose	2	1,38 ^{**}	0,69 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,50 ^{ns}	7406,50 [*]
Inoculante	1	0,06 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,04 ^{ns}	788,00 ^{ns}
Dose*inoculante	2	0,30 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,17 ^{ns}	2967,00 ^{ns}
Resíduo	15	0,11	0,01	0,33	0,23	1598,93
CV		1,67	2,64	3,47	1,36	6,53
FV	GL	QM				
		MG	M100	PRODT	MSPA	
Bloco	3	93,60 ^{ns}	2597,00 ^{ns}	439,40 ^{ns}	243,80 ^{ns}	
Dose	2	37,90 ^{ns}	2489,00 ^{ns}	6153,62 ^{ns}	118,70 ^{ns}	
Inoculante	1	1745,20 ^{**}	8249,00 [*]	203833,22 ^{**}	3,30 ^{ns}	
Dose*inoculante	2	388,80 ^{ns}	753,50 ^{ns}	13479,63 [*]	18,00 ^{ns}	
Resíduo	15	105,73	1766,87	2497,76	261,88	
CV		3,79	3,57	3,78	8,81	

** e *: Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ns: Não significativo a 5%. CE: Comprimento da espiga; DE: Diâmetro da espiga; FE: Fileira por espiga; GF: Grãos por fileira; GE: Grãos por espiga; MG: Massa do grão; M100: Massa de 100 grãos; PRODT: Produtividade; MSPA: Massa seca da parte aérea."

Para a variável PRODT as doses dentro do tratamento não inoculada e com inoculante FMA foram estatisticamente iguais (Tabela 4). Quando comparado a inoculação dentro das doses 0, 50 e 100 de P, os tratamentos sem inoculante foram superiores aos tratamentos com inoculante.

Tabela 4. Valores médios para a produtividade do milho inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e doses de fósforo.

Dose de P	Produtividade kg ha ⁻¹	
	Sem inoculante	FMA
0	14.727,9Aa	12.084,68Ab
50	13.870,38Aa	12.867,6Ab
100	13.850,08Aa	11.966,62Ab
CV (%)	3,78	

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente si pelo teste de F a 5% de probabilidade.

Para a dose 100% de fósforo recomendada, a média do CE foi de 20,20 cm, enquanto que na ausência de P a média foi de 19,38 planta⁻¹. Para a variável GE, a dose 0 foi superior as demais com média de 647,63 grãos por espigas (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios para o comprimento de espiga e grãos por espigas.

Dose de P	CE	GE
	cm planta ⁻¹	Und planta ⁻¹
0	19,38b	647,63a
50	19,67b	593,69b
100	20,20 ^a	596,25b
CV (%)	1,67	6,53

Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Comprimento da espiga (CE) e grãos por espiga (GE)

Para as variáveis MG e massa de cem grãos (M100), ($p < 0,05$), as médias foram de 280,08 e 37,78 respectivamente, para o tratamento sem inoculante (Tabela 6).

Tabela 6. Valores médios da massa do grão e massa de cem grãos de plantas de milho em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* e sem inoculante.

Inoculante	MG	M100
	g planta ⁻¹	
S/Inoculante	280,08a	37,76a
FMA	263,03b	36,60b
CV (%)	3,79	3,57

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

O teor foliar de P mostrou diferenças significativas ($p < 0,05$) em função da interação entre a adubação fosfatada e a inoculação de FMA. As doses dentro do tratamento não inoculada foram estatisticamente iguais e com inoculante FMA, a dose 50% de P_2O_5 foi estatisticamente superior que a dose 0 (Tabela 7). Quando comparado a inoculação dentro das doses 0, 50 e 100 de P, o tratamento sem inoculante para dose 0 foi superior ao tratamento 0 com inoculante.

Tabela 7. Teor foliar de fósforo em milho em função das doses de fósforo e da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices* nas sementes.

Dose de P	Sem inoculante	FMA
	g kg ⁻¹	
0	1,957Aa	1,557Bb
50	1,778Aa	2,099Aa
100	2,035Aa	1,875ABa
cv (%)	12,96	

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente si pelo teste de F a 5% de probabilidade.

A absorção de P nos grãos não apresentou diferenças estatísticas igual para ambos os tratamentos com media variando de 3,57 mg P kg para dose 0 , de 3,72 mg P kg para dose 50 e 3,83 mg P kg para dose 100. O teor do P no solo variou de 11,73 mg P dm⁻³ a 38,45 mg P dm⁻³ para dose 0 e 100, respectivamente. O teor de P no solo foi maior para o tratamento com dose 100% de P_2O_5 . Não houve efeito da inoculação micorrízica, da adubação fosfatada ou da interação entre ambos sobre o teor de fósforo nos grãos de milho e no solo (Tabela 8).

Tabela 8. Teor de fósforo no grão de milho e teor de fósforo no solo em função da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus intraradices*.

Inoculante	Pgrãos mg kg ⁻¹	Psolo mg dm ⁻³
S/Inoculante	3,51 ^a	22,42a
FMA	3,92 ^a	22,73a
CV (%)	16,05	68,14

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Para as concentrações de proteínas do solo relacionada a glomalina (PSRG), não houve efeito dos tratamentos, as médias foram de 0,27 mg g solo⁻¹ para os tratamentos sem inoculante e 0,28 mg g solo⁻¹ para os tratamentos com inoculante (Tabela 9). Em relação a respiração basal do solo, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos sem inoculante e com inoculante (Tabela 9).

Tabela 9. Valores médios da proteína do solo relacionado a glomalina facilmente extraível e da respiração basal do solo (mg C-CO₂ Kg⁻¹ solo⁻¹ h⁻¹).

Inoculante	PSRG mg g solo ⁻¹	RBS (mg C-CO ₂ Kg ⁻¹ solo ⁻¹ h ⁻¹)
S/Inoculante	0,27 a	0,12 a
FMA	0,28 a	0,19 a
CV (%)	4,42	56,73

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

4. DISCUSSÃO

O uso de FMA pode potencializar o aumento da colonização micorrízica, o que, por sua vez, poderá reduzir a quantidade necessária de fósforo a ser aplicado ou otimizar a eficiência na utilização de fertilizantes fosfatados (BATTINE et al., 2017; YANG et al., 2022; XU et al., 2023). Contudo, nem sempre são evidentes os resultados dessa interação, pois os efeitos da inoculação micorrízica são influenciados por diversas variáveis, incluindo o genótipo da planta e a espécie do fungo, bem como condições externas, como a fertilidade do solo, a disponibilidade de água e a população nativa de FMA (HORA et al., 2021; BUZO et al., 2022; EL-FATTAH et al.,

2023).

As taxas de colonização micorrízica observadas neste estudo mostram-se semelhantes às de estudos realizados por Buzo et al. (2023), em Selvíria, Mato Grosso do Sul, em uma área da região do Cerrado, utilizada para fins agrícolas há mais de vinte anos. Eles concluíram que a colonização radicular por FMA não foi alterada pela adubação com P ou inoculação com Rottela BR., com médias de 61,69% em 2019 e 40,85% em 2020.

A variação do percentual de colonização micorrízica para o milho, conforme relatado na literatura, abrange uma faixa de 23% a 90% (GUO et al., 2014; AQUINO et al., 2015; BATTINI et al., 2017; STOFFEL, 2020; BUZO et al., 2022; MA et al., 2022), colocando a faixa da colonização observada no presente estudo dentro do intervalo encontrada na literatura.

A aplicação de um inoculante comercial com uma concentração elevada de propágulos (167.000 g^{-1}), pode aumentar a competição com os FMA nativos nas plantações de milho, e os efeitos observados neste estudo podem ser atribuídos à associação do milho com inoculante comercial *Rhizophagus intraradices*. Dos dados obtidos, deve-se destacar que o tratamento com apenas o inoculante micorrízico apresentou intensidade de colonização de 85% (Figura 2) significativamente maior quando comparado com o tratamento com apenas dose de P_2O_5 .

O potencial de produtividade da cultura do milho é influenciado pelo comprimento e pelo diâmetro da espiga (OHLAND et al., 2005). O diâmetro da espiga, que pode ser influenciado pelo genótipo, tem uma relação direta com massa dos grãos, assim como, número de grãos e o número de fileiras de grãos presentes em cada espiga e que irá influenciar produtividade.

A adubação fosfatada é fundamental para assegurar uma nutrição adequada as plantas (BASTOS et al., 2008). No presente estudo, em que a fertilidade e o teor de P no solo são considerados bom, ao pensar em cultivos futuros requer uma consideração cuidadosa sobre a aplicação de fertilizantes com P. A necessidade em otimizar o aproveitamento do que o solo oferece torna-se iminente, assim, o uso do inoculante micorrízico surge como um recurso promissor.

Ao substituir a adubação fosfatada por um inoculante micorrízico ocorrerá o acesso das plantas ao P já presente no solo. Essa abordagem apresenta vantagens expressivas ao considerar a economia, custo e eficiência ao utilizar o P disponível, os inoculantes contribuem para reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados,

alinhando-se a uma prática mais sustentável e economicamente viável.

Portanto, ao utilizar o inoculante micorrízico em culturas futuras tende a ser promissor no sentido de buscar mais acesso da planta ao P já existente no solo. Essa escolha inteligente não apenas preserva os recursos finitos e atende a critérios de custo/benefício, mas também representa um passo significativo em direção a práticas agrícolas mais eficientes e sustentável ao meio ambiente.

A variável CE foi superior na dose 100% de P_2O_5 com média de 20,20 cm. Esse valor é superior ao apresentado por Couto et al. (2017), que obteve um comprimento de 18,6 cm em espigas de milho verde. De acordo com Silva et al. (1997), as espigas comerciais são caracterizadas por apresentarem comprimento superior a 17 cm e têm diâmetro igual ou superior a 30 mm.

No presente estudo, observou-se que o uso do inoculante não contribuiu para o aumento da produtividade. Para os tratamentos com doses de P_2O_5 e não inoculado, a produtividade foi de 294,56 sacas de milho, enquanto os tratamentos com doses de P_2O_5 e inoculados com *Rhizophagus intraradices*, a produtividade foi de 241,69 sacas de milho. Esses resultados indicam que a aplicação do inoculante, em solos com alta ou moderada disponibilidade de P, pode interferir negativamente, resultando em uma produção inferior aquela que recebeu apenas as doses de P.

Elevados níveis de fósforo no solo, geralmente não estimulam uma grande comunidade de FMA, já que tais condições tendem a reprimir a colonização das raízes e, conseqüentemente, o desenvolvimento dos FMAs. Isso pode representar um desafio para os FMAs introduzidos, pois, se apresentarem uma adaptação limitada em populações reduzidas, serão facilmente superados pelos FMAs nativos do solo (VERBRUGGEN et al., 2012; VERBRUGGEN et al., 2013).

Em condições de elevada colonização das plantas por espécies nativas de FMAs e disponibilidade de fósforo no solo, não foi identificado um efeito imediato da inoculação sobre a eficiência da adubação fosfatada. Ressalta-se ainda que a adubação fosfatada é essencial para o desenvolvimento e na produtividade do milho, embora seus efeitos imediatos podem não ser observados em solos com boa fertilidade (BUZO et al.; 2023). A inoculação com FMAs contribuiu para uma maior eficiência na adubação fosfatada (BUZO et al., 2022).

Um estudo mostrou que o efeito da colonização por FMAs nativos foi equivalente a economia de 30 kg P ha⁻¹ na produção de milho (WANG et al., 2020). No presente estudo a inoculação com FMAs mais a dose 50% de P_2O_5 promoveu

melhor teor de P nas folhas. Conforme documentado na literatura, a aplicação de adubos fosfatados aumenta a disponibilidade desse nutriente para as raízes, resultando em uma maior absorção e, conseqüentemente, em uma concentração mais elevada nos tecidos vegetais (LIMA et al., 2011).

Os teores de P no solo não variaram em função da inoculação e dos tratamentos com dose de P_2O_5 (Tabela 8). O P é essencial para o desenvolvimento dos grãos e é um dos macronutrientes mais importantes para as plantas influenciando diretamente a produção de amido, proteína e outros compostos vitais nos grãos (RUFF et al., 2023). Uma deficiência de fósforo pode resultar em grãos subdesenvolvidos, com menor teor de nutrientes e rendimento reduzido. Portanto, garantir um suprimento adequado de fósforo é importante para promover a qualidade e a produtividade dos grãos de milho, contribuindo para o sucesso da produção agrícola.

Os teores da PSRG determinados neste experimento não variaram significativamente, o pH final do experimento 6,8 pode ter influenciado a atividade dos FMA e por consequência, a produção da glomalina. Em um experimento realizado no Estados Unidos com diferentes amostras de solo de pastagens foi observado que à medida que o pH aumentava diminuía a quantidade da PSRG presente no solo (HADDAD e SARKAR, 2003). Ainda não são bem compreensíveis os mecanismos que controlam a produção da PSRG pelos FMA, mas fatores que impactam a simbiose micorrízica podem também ter um papel na produção dessa glicoproteína pelos FMA (SOUSA et al., 2012).

Considerando que a glomalina é produzida pelos FMA, e fungos tem preferencias por solos ácidos, espera-se uma maior produção dessa glicoproteína em solos ácidos devido à maior atividade fúngica nessas condições (HADDAD e SARKAR, 2003). Outro fator a ser considerado é a seleção do FMA e da planta hospedeira compatíveis para aumentar o teor da glomalina no solo (ZHOU et al., 2023).

Uma vez que algumas famílias produzem mais essa glicoproteína que outras (HOLATKO et al., 2021), essa seleção colaboraria para melhorar a qualidade do solo de forma mais assertiva. Em estudo anterior também mostrou diferenças na produção de glomalina por diferentes gêneros de *Glomus* e *Gigaspora* (WRIGHT et al., 1996).

Os fungos micorrízicos podem competir com outros decompositores do solo, como bactérias e outros fungos, pela matéria orgânica disponível. Essa competição

pode afetar a taxa de decomposição da matéria orgânica e, por conseguinte, a respiração basal do solo (TRUJILLO et al., 2020). Assim como o teor de glomalina a baixa taxa de RBS pode estar relacionada com os desempenhos dos FMAs no solo, sabendo que os FMAs podem aumentar a decomposição da matéria orgânica no solo, liberando carbono e outros nutrientes, o que pode aumentar a respiração do solo.

5. CONCLUSÃO

A inoculação de *Rhizophagus intraradices* na cultura do milho apresenta potencial para colonização, entretanto a produtividade do milho não apresentou aumento no tratamento com inoculação e doses adicionais de fósforo.

A inoculação de *Rhizophagus intraradices* e a adubação fosfatada na cultura do milho não influenciaram os atributos biológicos do solo determinados pela quantificação do teor de glomalina e respiração basal no solo.

Os resultados indicam que o teor foliar de fósforo foi influenciado pela interação entre a adubação fosfatada e a inoculação com *Rhizophagus intraradices*. A combinação da dose intermediária de fósforo com a inoculação de *Rhizophagus intraradices* atingiu níveis de fósforo foliar comparáveis à dose máxima de fósforo sem inoculante.

A inoculação com FMA é essencial para melhor a absorção de P para as plantas o que contribui para melhor crescimento e produtividade, embora seus efeitos imediatos não possam ser percebíveis em solos com alta fertilidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 26, p. 241- 248, 2002.

AQUINO, S. S.; SCABORA, M. H.; ANDRADE, J. A. C.; COSTA, S. M. G.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Mycorrhizal colonization and diversity and corn genotype yield in soils of the Cerrado region, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 36, p. 4107-4118, 2015.

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**. v. 12, p. 136-142, 2008.

BATTINI, F.; GRONLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN, I. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. **Scientific Reports**. v. 7, 2017.

BLEVINS, D. G. Por que as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**. n. 87, p. 4-5, 1999.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**. v. 72, p. 248-254, 1976.

BUZO, F. S.; GARCIA, N.F.S.; GARÉ, L. M.; GATO, I. M. B.; MARTINS, J. T.; MARTINS, J. O. M.; MORITA, P. R. S.; SILVA, M. S. R. A.; SALES, L. Z. S.; NOGALES, A.; RIGOBELLO, E. C.; ARF, O. Phosphate fertilization and mycorrhizal inoculation increase corn leaf and grain nutrient contents. **Agronomy**. v. 12, p. 1-14, 2022.

BUZO, F. S.; GARÉ, L. M.; GARCIA, N. F. S.; ANDRADE SILVA, M. S. R. DE; MARTINS, J. T.; SILVA, P. H. G. DA; MEIRELES, F. C.; SOUZA SALES, L. Z. DE; NOGALES, A.; RIGOBELLO, E. C.; ARF, O. Effect of mycorrhizae on phosphate fertilization efficiency and maize growth under field conditions. **Scientific Reports**, v. 13, p. 3527, 2023.

CARMO, C.A.F.S. ARAUJO, W.S.; BERNARDI, A.C.C. SALDANHA, M. F.C. Métodos de Análise de Tecidos Vegetais Utilizados a Embrapa Solos. **Rio de Janeiro: Embrapa Solos**. p 41, 2000.

COELHO, A. C.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; HERNANI, L. C. Cultivo do milho. **Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção**. 2008.

COUTO, C. A.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, M. T. P.; VASCONCELOS, J. P.; SILVA, A. R.; SOBREIRA, E. A.; MOURA, J. B. Corn cultivars performance intended for production of green corn and silage. **Fronteiras Journal of Social Technological and Environmental Science**. v. 6, p. 232-251, 2017.

DEINES, J. M.; PATEL, R.; LIANG, S. -Z.; DADO, W.; LOBELL, D. B. A million kernels of truth: Insights into scalable satellite maize yield mapping and yield gap analysis from an extensive ground dataset in the US corn belt. **Remote Sensing of Environment**. v. 253, p. 112-174, 2021.

EHISIANYA, C. N.; IKPI, P. O.; OKORE, O. O.; OBEAGU, I. A. Assessment of plant powders as protectants of stored maize grains against maize weevil, *Sitophilus zeamais* (motsch). [Coleoptera: Curculionidae]. **Nigerian Agricultural Journal**. v. 50, p. 37–45, 2019.

EL-FATTAH, D. A. A; MAZE, M.; ALI, B. A. A.; AWED, N. M. Role of mycorrhizae in enhancing the economic revenue of water and phosphorus use efficiency in sweet corn (*Zea mays* L. var. *saccharata*) plants. **Journal of the saudi society of Agricultural Sciences**. v 22, p. 174-186, 2023.

FERROL, N.; AZCÓN-AGUILAR, C.; PÉREZ-TIENDA, J. Review: Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved. **Plant Science**. v. 280, p. 441-447, 2019.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytology** v. 84, p. 489-500, 1980.

GUO, W.; ZHAO, R.; FU, R.; BI, NA.; WANG, L.; ZHAO, W.; GUO, J.; ZHANG, J. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the development of maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoils. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 21, p. 3592–3603, 2014.

HADDAD, M. J.; SARKAR, D. Glomalin, a newly discovered component of soil organic matter: part II – relationship with soil properties. **Environmental Geosciences**, v. 10, n. 3, p. 99-106, 2003.

HANSEL, F. D. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, RS, Brasil, 2013.

HOLATKO, J.; BRTNICKY, M.; KUCERIK, J.; KOTIANOVA, M.; ELBL, J.; KINTL, A.; KYNICKY, J.; BENADA, O.; DATTA, R.; JANSÁ, J. Glomalin – Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 153, 2021.

HORA, F. A. S.; SILVA, A. C. S.; MOREIRA, F. W.; VENDRUSCOLO, J.; SOUZA, L. C. C.; OLIVEIRA, L. A. Ocorrência de fungos micorrízicos em paurosa (*Aniba duckei* kosterm) e mogno (*Swietenia macrophylla* king) em diferentes épocas de coleta na região de Manaus. **Research Society and Development**. v. 10, 2021.

HOSSAIN, M. B. Glomalin and contribution of glomalin to carbon sequestration in soil: a review. **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**. v. 9, p. 191-196, 2021.

JI, L.; TAN, W.; CHEN, X. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil & Tillage Research**. v. 185, p. 1-8, 2019.

KHAN, M. A.; RAHMAN, M.U.; RAMZANI, P. M. A.; ZUBAIR, M.; RASOOL B.; KHAN, M. K.; AHMED, A.; KHAN S. A.; TURANG, V.; IGBAL, M. Associative effects of lignin-derived biochar and arbuscular mycorrhizal fungi applied to soil polluted from Pb-acid batteries effluents on barley grain safety. **Science of the Total Environment**. v. 710, 2020.

KOBAE, Y. Dynamic phosphate uptake in arbuscular mycorrhizal roots under field conditions. **Frontiers in Environmental Science**. v. 6, p. 1-12, 2019.

LAMBERS, H.; RAVEN, J.; SHAVER, G.; SMITH, S. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. **Trends in Ecology & Evolution**. v. 23, p. 95–103, 2008.

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**. v. 42, n. 4, p. 950-956, 2011.

MA, J.; WANG, W.; YANG, J.; QIN, S.; YANG, Y.; SUN, C.; PEI, G.; ZEESHAN, M., LIAO, H.; LIU, L.; HUANG, J. Mycorrhizal symbiosis promotes the nutrient content accumulation and affects the root exudates in maize. **BMC Plant Biology**. v. 22, p. 64, 2022.

MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria Orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.

MURITIBA, M. J. S. **Luta pela terra, reforma agrária e territorialização: produção de espaços para trabalho e vida**. Itaitê / Bahia: 1997-2007. Superintendência de Pós-Graduação, 259 f, 2008.

OHLAND, R. A. A.; SOUZA, L. C. F.; HERNANI, L. C.; MARCHETTI, M. E. E.; GONÇALVES, M. C. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência Agrotécnica**. v.29, p. 538-544, 2005.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria, 2023.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Intensidade de colonização do córtex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim-pensacola. **Ciência Rural**. v. 25, p. 223-228, 1995.

RUFF, O. J.; DUARTE, J. P.; SANTOS, C. C.; SANTOS, C. L. R. Doses de fósforo em híbridos de milho cultivados em solo arenoso. **Scientific Electronic Archives**. v. 16, p. 15-21, 2023.

SAPAGNOLETTI, F. N.; CORNERO, M. CHIOCCHIO, V. LAVADO, R. S.; ROBERTS, I. N. Arbuscular mycorrhiza protects soybean plants against *Macrophomina phaseolina* even under nitrogen fertilization. **European Journal of Plant Pathology**. v. 156, p. 839–849, 2020.

SILVA, P. S. L.; BARRETO, H. E. P.; SANTOS, M. X. 1997. Avaliação de cultivares de milho quanto ao rendimento de grãos verdes e secos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 32, p. 63-69, 1997.

STOFFEL, S. C. G.; SOARES, C. R. F. S.; MEYER, E., LOVATO, P. E.; GIACHINI, A. J. Yield increase of corn inoculated with a commercial arbuscular mycorrhizal inoculant in Brazil. **Ciência Rural**. v. 50, p. 1-10, 2020.

TANDZI, L. N.; MUTENGWA, C. S. Estimation of maize (*Zea mays L.*) yield per harvest area: Appropriate Methods. **Agronomy**. v.10, p. 1-18, 2020.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solos, plantas e outros materiais. **Boletim Técnico de Solos**, 5. 2. ed.

Porto Alegre: UFRGS.174 p. 1995.

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; SALDANHA, M. F. C. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa. p. 574, 2017.

TRUJILLO, L., LUIZÃO, F. J., LEHMANN, J., LIANG, B., RIBEIRO, G. Respiração do solo e dinâmica da liteira fina em Terra Preta de Índio e solos adjacentes, na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**. v. 9, p. 007-020, 2020.

VERBRUGGEN, E., VAN DER HEIJDEN, M.G.A., WEEDON, J.T., KOWALCHUK, G. A., ROLING, W, F, M. Community assembly, species richness and nestedness of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. **Molecular Ecology**. v.21, p 2341–2353, 2012.

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

VIERHEILIG, H.; COUGHLAN, A.P.; WYSS, U.; PICHÉ, Y. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. **Applied and Environmental Microbiology**. v. 64, p. 5004-5007, 1998.

WATTS-WILLIAMS, S.; GILBER, S. E. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the concentration and distribution of nutrients in the grain differently in barley compared with wheat. **Plants People Planet**. v. 3, p. 567–5577, 2021.

WANG, X. X.; VAN DER WERF, W.; YU, Y.; HOFFLAND, E.; FENG, G.; KUYPER, T. W. Field performance of different maize varieties in growth cores at natural and reduced mycorrhizal colonization: yield gains and possible fertilizer savings in relation to phosphorus application. **Plant Soil**. v. 450, p. 613–624. 2020.

WRIGHT, S.; UPADHYAYA, A. A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**. v. 161, p. 575-586, 1996.

XIN, Y.; FAN, Y.; BABALOLA, O. O.; ZHANG, X.; YANG, W. Legacy Effects of Biochar and Compost Addition on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community and Co-Occurrence Network in Black Soil. **Microorganisms**. v. 10, p. 1-13, 2022.

XU, D.; YU, X.; CHEN, J.; LIU, H.; ZHENG, Y.; QU, H.; BAO, Y. Arbuscular mycorrhizae fungi diversity in the root–rhizosphere–soil of *Tetraena mongolica*, *Sarcozygium xanthoxylon*, and *Nitraria tangutorum* Bobr in Western Ordos, China. **Agronomy**. v. 13, p. 1-17, 2023.

YANG, Y.M.; NASEER, M.; ZHU, Y.; ZHU, S.G.; WANG, S.; WANG, B.Z.; WANG, J.; ZHU, H.; WANG, W.; TAO, H.Y.; XIONG, Y.C.; 2022. Dual effects of nZVI on maize growth and water use are positively mediated by arbuscular mycorrhizal fungi via rhizosphere interactions. **Environmental Pollution**. v.308, 2022.

ZHAO, Z. M. ZHAO, C. Y.; YAN, Y.Y.; LI, J. Y. LI, J.; SHI, F. Z. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and moisture in an oasis cotton field, central Asia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 168, p. 46-52, 2013.

ZHOU, X.; WANG, T.; WANG, J.; CHEN, S.; LING, W. Research progress and prospect of glomalin-related soil protein in the remediation of slightly contaminated soil. **Chemosphere**. v, 344, 2023.

CAPÍTULO 2

Crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) em grãos de milho cultivados com adubação fosfatada

Resumo

Sitophilus zeamais, conhecido como gorgulho-do-milho, é uma das principais pragas do armazenamento de milho, causando danos severos aos grãos, resultando em perdas econômicas significativas e degradação da qualidade do produto. Esse estudo avaliou a resistência de três híbridos de milho cultivados com diferentes doses de fósforo ao ataque de *Sitophilus zeamais* em teste sem chance de escolha, realizado em laboratório. A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios Relação Solo/Planta e Biologia do Solo, no Campus de Cruz das Almas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no período de maio a setembro de 2023. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 3x3 com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de três híbridos de milho (MP- 512, MC - 707 e MS - 898) e três doses de fósforo (0, 50% e 100% da dose recomendada). O bioensaio foi conduzido em frascos plásticos de 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, equipados com tampas perfuradas e revestidos com Voile para promover ventilação. Cada frasco continha 70 g de grãos de milho por tratamento e vinte insetos adultos não-sexados, com idade entre um e cinco dias. Após 60 dias, foram avaliados: sobrevivência acumulada do inseto, emergência acumulada do inseto, mortalidade acumulada do inseto, grão danificados, produção de excremento e a taxa instantânea de crescimento populacional dos insetos. Os resultados do estudo evidenciam variações significativas na resistência ao *Sitophilus zeamais* entre os híbridos de milho analisados, ressaltando a importância da escolha criteriosa dos híbridos e das práticas de manejo para mitigar os danos causados por pragas. O híbrido MP- 512 destacou-se com maior suscetibilidade ao ataque, pois apresenta maiores taxas de emergência de adultos e sobrevivência de adultos. Os híbridos MC - 707 e MS - 898 revelaram maiores incidência de grãos danificados, sugerindo também uma suscetibilidade ao ataque do *Sitophilus zeamais*. A PCA revelou que variáveis como produção de excrementos e taxas de crescimento estão associadas à suscetibilidade dos híbridos ao *Sitophilus zeamais*. MA indica resistência, com MP-512 sendo mais suscetível e MS-898 mostrando maior resistência. Esses resultados são importantes para a escolha de híbridos e estratégias de manejo de pragas.

Palavra Chave: Fósforo, Gorgulho do milho, Grãos Armazenados, Resistência, Suscetibilidade

Population Growth of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) in Corn Grains Cultivated with Phosphorus Fertilization

Abstract

Sitophilus zeamais, known as the maize weevil, is one of the main pests in corn storage, causing severe damage to the grains, resulting in significant economic losses and degradation of product quality. This study evaluated the resistance of three corn hybrids cultivated with different phosphorus doses against *Sitophilus zeamais* in a no-choice test conducted in the laboratory. The research was conducted in the Soil/Plant Interaction and Soil Biology laboratories at the Campus of Cruz das Almas of the Federal University of Recôncavo da Bahia from May to September 2023. The experimental design used was a randomized block design in a 3x3 factorial scheme with four replicates. The treatments consisted of the combination of three corn hybrids (MP-512, MC-707, and MS-898) and three phosphorus doses (0, 50%, and 100% of the recommended dose). The bioassay was conducted in plastic containers measuring 10 cm in diameter and 6 cm in height, equipped with perforated lids and lined with voile to promote ventilation. Each container held 70 g of corn grains per treatment and twenty unsexed adult insects, aged between one and five days. After 60 days, the following were evaluated: cumulative insect survival, cumulative insect emergence, cumulative insect mortality, damaged grains, excrement production, and the instantaneous population growth rate of the insects. The study results reveal significant variations in resistance to *Sitophilus zeamais* among the corn hybrids analyzed, emphasizing the importance of careful hybrid selection and management practices to mitigate pest damage. The MP-512 hybrid showed greater susceptibility to attack, as it presented higher rates of adult emergence and adult survival. The MC-707 and MS-898 hybrids revealed higher incidences of damaged grains, also suggesting susceptibility to *Sitophilus zeamais* attack. The PCA revealed that variables such as excrement production and growth rates are associated with the susceptibility of the hybrids to *Sitophilus zeamais*. MA indicates resistance, with MP-512 being more susceptible and MS-898 showing greater resistance. These results are important for the selection of hybrids and pest management strategies.

Keywords: Phosphorus, Maize Weevil, Stored Grains, Resistance, Susceptibility

1. INTRODUÇÃO

Sitophilus zeamais Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) é uma praga que causa grandes prejuízos a grãos armazenados em todo o mundo (EESIAH et al., 2022; BALTZEGAR et al., 2023; RANJITH et al., 2023). Esses insetos são considerados pragas primárias, pois causam danos aos grãos tanto interna quanto externamente, dependendo da fase em que o inseto se encontra. Os insetos adultos perfuram os grãos, depositam ovos e, após a eclosão, consomem seu interior e continuam a viver dentro deles até se tornarem adultos. Esses insetos têm a capacidade de causar infestações cruzadas e podem resistir a grandes profundidades dentro da massa de grãos (LORINI et al., 2015).

Os adultos alimentam-se dos grãos e as larvas se desenvolvem dentro deles. Através de seus hábitos alimentares, eles não só causam perdas em termos de quantidade, mas também tem o impacto na qualidade do cereal (NWOSU, 2018). Além de colocar em risco a segurança alimentar, a infestação de grãos por insetos durante o cultivo, armazenamento e transporte tem o potencial de prejudicar seriamente a produção (SULEIMAN et al., 2015; HENDRIVAL et al., 2019).

Embora exista uma grande área dedicada à produção de cereais, uma quantidade considerável da produção acaba sendo perdida, principalmente devido a infestação no período de armazenamento. Uma das principais espécies conhecidas por causar danos às sementes armazenadas é o *Sitophilus zeamais*, causando perdas na quantidade e qualidade das sementes (NWOSU, 2018; BOAMAH et al., 2023).

O *Sitophilus zeamais* tem uma preferência por grãos pequenos e preferem os de cor, especialmente os verdes (GROOTE et al., 2017). As pesquisas têm se concentrado na utilização de variedades de milho que demonstre predisposição contra as pragas que afetam os cereais (KASOZI et al., 2021; CORTESE e ANDRADE, 2022; Boamah et al., 2023). Esse foco inclui a busca por fontes de resistência, como os inibidores enzimáticos (NASERI e MAJD-MARANI, 2022; DIKBAS et al., 2023). O grão do milho armazenado que apresenta uma resistência às pragas pode ser em parte influenciada por fatores bioquímicos e genéticos (LOPEZ-CASTILLO et al., 2018).

Métodos alternativos para controle de pragas em armazenamento, como grãos resistentes, são essenciais na promoção de sistemas agrícolas sustentáveis uma vez

que favorece a produção sem ameaçar os recursos naturais. O uso de inoculante micorrízico para o milho é uma estratégia para aumentar a produtividade (BUZO et al., 2023) e melhorar a qualidade dos grãos de empreendimentos agrícolas dependentes de baixa tecnologia e principalmente em solos originalmente com baixos níveis ou médios de P disponível no solo (RAYA-HERNÁNDEZ et al., 2020; STOFFEL et al., 2020; DIERKS et al., 2022; WHITE e GLEASON, 2022). Estudos mostram que o milho quando inoculado com FMA, pode atingir rendimentos semelhantes aos obtidos com o uso de fertilizantes à base de P (HOU et al., 2021; BUZO et al., 2023). Isso evidencia o potencial da inoculação com FMA como uma alternativa eficaz e de custo reduzido em diferentes regiões.

Portanto, hipotetizamos que: (1) a inoculação com FMA pode melhorar a resistência das sementes de milho ao ataque de *Sitophilus zeamais*, (2) doses de fósforo aumentam a resistência dos grãos de milho contra *Sitophilus zeamais*, (3) a combinação de doses de fósforo e inoculação com fungos micorrízicos aumenta a resistência dos grãos de milho contra *Sitophilus zeamais*, (4) a combinação de tratamentos (fósforo e fungos micorrízicos) e a origem dos híbridos têm um efeito interativo na resistência dos grãos contra *Sitophilus zeamais*, (5) a origem dos híbridos de milho influencia a resistência dos grãos contra *Sitophilus zeamais*.

Essa abordagem pode proporcionar uma alternativa eficaz e de baixo custo para o controle de pragas em sistemas de armazenamento de grãos, contribuindo para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e a redução das perdas na produção de cereais. O trabalho teve por objetivo avaliar a resistência de sementes de três híbridos de milho cultivados com diferentes doses de fósforo frente ao ataque de *Sitophilus zeamais* em teste sem chance de escolha, em laboratório.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios Relação Solo/Planta e Biologia do Solo no Campus de Cruz das Almas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no período de maio a setembro de 2023.

2.1 Origem dos híbridos utilizados

Três híbridos de milhos (MP- 512, MC - 707 e MS - 898) foram avaliados em

três estados brasileiros (Bahia, Piauí e São Paulo) (Figuras 1,2 e 3), que apresentam diferentes climas e classes de solo (Tabela 1).

Tabela 1. Características do solo dos experimento em campo.

Local	Bahia	Piauí	São Paulo
Coordenadas	12°59'9" S, 40°58'22" W	9°05'02.0"S e 44°19'32.0"W	20°16'50' S e 50°17'4' W
Textura	Franca		Arenosa/média
Classificação	Latossolo vermelho	Latossolo	Argiloso Vermelho- amarelo

Figura 1. Experimento em campo na Bahia.



Autora: Clara Oliveira

Figura 2. Experimento em campo no Piauí.



Autora: Elaine Martins

Figura 3. Experimento em campo em São Paulo.



Autora: Gisele Herbst Vazquez

Em campo, os delineamentos experimentais foram em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições totalizando 24 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos em esquema fatorial 3x2 (três níveis de P=0, 50 e 100%, dose recomendada) e inoculação micorrízica (com e sem inoculante FMA) para as três localidades. As sementes foram colocadas dentro de um saco plástico, para realizar o tratamento utilizando o método do saco e seguindo a recomendação do fabricante foi adicionado 150 g do produto em pó para a quantidade de sementes recomendada por hectare, foi adicionado goma xantana para melhorar a adesão do inoculante na semente. Em seguida, todo o conteúdo do saco foi agitado repetidamente até que o produto aderisse de maneira uniforme às sementes. O inoculante utilizado é conhecido como Rootella® BR ULTRA, contendo 167.000 propágulos de *Rhizophagus intraradices* por grama de produto. Todos os experimento atenderam as práticas agronômicas recomendadas para cada localidade.

O MP- 512 é um híbrido que tem ciclo precoce, sua adaptabilidade permite que seja cultivado em diferentes regiões, com um estande de 50-65 mil plantas ha⁻¹. O MC - 707 também apresenta um ciclo precoce, é conhecido por sua adaptabilidade, estabilidade, boa tolerância a doenças e ao estresse hídrico e com um estande de 50-65 mil plantas ha⁻¹. Por último o híbrido MS - 898 é um material de ciclo precoce, recomendado para a semeadura em época normal e tardia, com um estande de 60-65 mil plantas ha⁻¹ e é recomendado tanto para a produção de grãos quanto para

silagem.

2.2 Criação de gorgulhos do milho

Adulta de *Sitophilus zeamais* mantidos no laboratório de Biologia do Solo e Relação Solo Planta foram utilizados nesse experimento. Em um vaso plástico com capacidade para 1L foi colocado cerca de 500 g de macarrão (Figura 4 - A) e 150 insetos adultos não sexados, o vaso foi fechados com tampas perfuradas e revestidas com tecido Voile para permitir as trocas gasosas, evitar a fuga dos insetos e a penetração de agentes biológicos indesejáveis e mantidos em temperatura ambiente de 25 °C e 66% de umidade relativa. Os gorgulhos foram deixados por 10 dias para ovipositar e posteriormente removidos para permitir a emergência da progênie e colhidos quando se obtinha números suficiente para montagem dos experimentos.

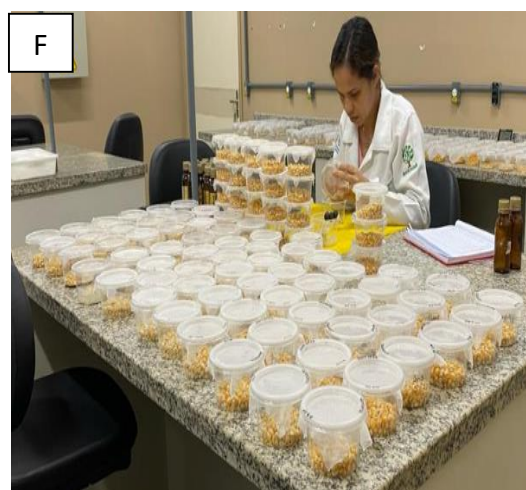
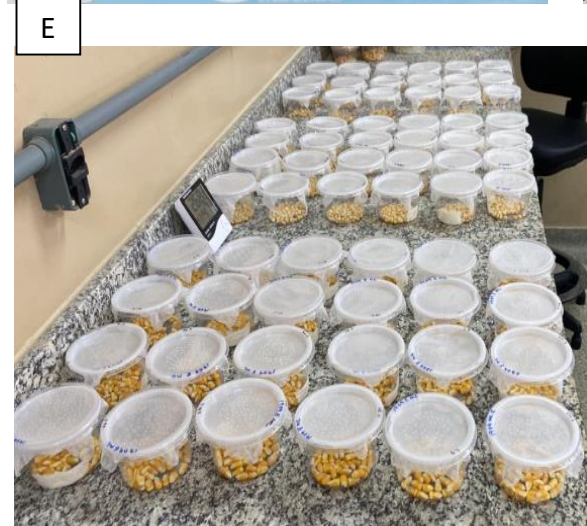
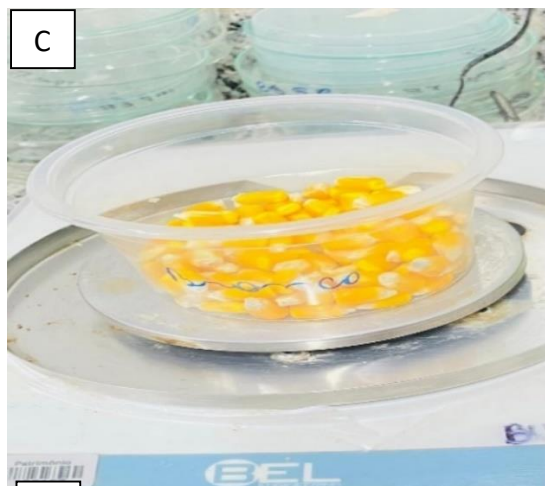
2.3 Condições experimentais

Amostras de grãos do campo de cada localidade foram secas em sacos de papel para atingir um teor de 13% de umidade. Para destruir qualquer vestígio dos insetos adultos e ovos que poderia esta presente devido a infestação cruzada, os grãos foram colocados em sacos plásticos e conservados em uma temperatura de 18°C (congelador), por 15 dias, para eliminar qualquer vestígio dos insetos provenientes do campo. Antes dos bioensaios, os grãos foram retirados do congelador, colocados em recipientes plásticos e preservados no laboratório durante oito dias para atingirem equilíbrio higroscópico.

2.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental no laboratório Relação Solo Planta utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 3x3 com, 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos pela combinação de três híbridos de milho (MP- 512, MC - 707 e MS - 898) três doses de fósforo. Os ensaios foram dispostos seguindo o desenho do ensaio em campo. Um teste sem chance de escolha foi realizado com os híbridos de cada localidade (Bahia, Piauí e São Paulo).

Figura 4. Execução do experimento - A: Criação do *Sitophilus zeamais* com dieta de macarrão; B: milho debulhado; C: milho pesado; D: milho com os insetos; E: experimento montado; F e G: desmontando o experimento; H: grão danificados pelos *Sitophilus zeamais*.





Autora: Damiana Souza, 2023

Para as análises da resistência dos grãos oriundos dos seis tratamentos ao ataque de *Sitophilus zeamais*, realizou-se teste sem chance de escolha para verificar o crescimento populacional. O bioensaio foi realizado em frascos plásticos com 10cm de diâmetro e 6 cm de altura, com tampas perfuradas e revestidas com Voile para facilitar a ventilação e evitar a saída dos insetos. Em cada frasco, foram colocados grãos de milho (70g) de cada tratamento e vinte insetos adultos não-sexados com idade variando de um a cinco dias (Figura 4 – C e D). A temperatura ambiente no período do experimento teve média de 26,6°C e a umidade com média de 48%. Cada frasco foi aberto após 60 dias (Figura 4 – E,F,G e H).

2.5 Variáveis analisadas

a) Emergência acumulada (vivos e mortos): com o auxílio de uma pinça os insetos vivos e mortos foram separados e contados. Obtendo assim a emergência acumulada.

b) Sobrevivência acumulada: obtida através da contagem dos insetos vivos no final do experimento.

c) Mortalidade acumulada: foi calculada a partir do número de insetos mortos no final do experimento.

d) Grão danificados: os grãos foram classificados manualmente considerando não danificados aqueles livres de qualquer furo ou vestígio da presença do *Sitophilus zeamais* e danificados os grãos que apresentavam furos ou “túneis”

causados pelo *Sitophilus zeamais*, posteriormente os grãos foram contados e classificados em porcentagem de grão danificados e não danificados.

e) Excremento produzido: após a abertura dos vasos foi feita a separação dos insetos, grãos e do excremento produzido em seguida o peso do excremento foi determinado com o auxílio de uma balança de precisão.

f) Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i): foi calculado utilizando-se a equação proposta por Walthall e Stark (1997): $r_i = \ln(N_f / N_0) / \Delta t$, onde N_f e N_0 são respectivamente o número final e inicial de insetos e Δt é a variação do tempo em dias. Valor positivo de r_i indica crescimento populacional, $r_i = 0$ significa que a população está estável e valor negativo de r_i indica declínio da população até a extinção.

2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilke a 5% de significância. Para confirmar a distribuição normal, os dados referentes à mortalidade dos insetos foram transformados em raiz quadrada de $(x + 0,5)$. Em seguida, as variáveis foram testadas por análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de probabilidade. Utilizando-se o pacote ExpDes.pt no software estatístico "R" (R CORE TEAM, 2023). Para verificar a semelhança entre os híbridos e as doses de fósforo, foi realizada Análise de Cluster utilizando o método de agrupamento UPGMA (Unweighted Pair-Group Means Average) a partir de agrupamentos homogêneos (MINGOTI, 2013). Em seguida realizou-se a análise de componentes principais (PCA) de todos os parâmetros para cada híbrido e dose de fósforo. As análises multivariadas foram realizadas no software R versão 4.3.1 (R CORE TEAM, 2023) com o pacote FactoMineR (LÊ et al., 2008).

3. RESULTADOS

Não houve interação significativa entre as doses de fósforo e os híbridos para as variáveis analisadas. Efeito isolado dos híbridos foi observado para todas as variáveis analisadas, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros biológicos de *Sitophilus zeamais*, avaliadas aos 60 dias em dieta com grãos de híbridos de milho, oriundos de plantas cultivadas com diferentes doses de fósforo.

FV	QM						
	GL	EA	SA	MA	GD	TIC	EXC
Dose	2	2,062 ^{ns}	2,241 ^{ns}	5,757 ^{ns}	4,76 ^{ns}	0,000034 ^{ns}	0,085 ^{ns}
Híbrido	2	23,671*	25,623*	3,343*	26,615*	0,000389*	1,58825*
Dose*híbrido	4	2,590 ^{ns}	2,441 ^{ns}	16,426 ^{ns}	1,030 ^{ns}	0,000046 ^{ns}	0,074175 ^{ns}
Resíduo	21	2413,90	2287,90	5811,29	1377,14	0,000033	888,38095
CV (%)		39,11	39,54	35,94	4,06	17,32	57,02

* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade.

Houve influência ($p < 0,05$) do híbrido MP- 512 para emergência acumulada (EA) e sobrevivência acumulada (SA) dos insetos (Tabela 3). Quando alimentados com o híbrido MP- 512, a variável EA dos insetos apresentou um aumento de 62% em comparação ao híbrido MC - 707 e de 93,75% em comparação ao híbrido MS – 898. Para EA dos insetos, a dose 0 de fósforo obteve a maior média em relação às doses 50% e 100% de fósforo, com médias de 140,45; 123,00 e 113,45 para as doses de 0, 50% e 100%, respectivamente.

A SA dos insetos alimentados com o híbrido MP - 512 apresentou médias maiores em relação aos insetos alimentados com os híbridos MC - 707 e MS – 898 (Tabela 3). Com a dieta à base do híbrido MP- 512, os insetos apresentaram um aumento de 61,92% na SA dos insetos quando comparado aos insetos alimentados com o híbrido MC - 707 e um aumento de 98,75% em comparação ao híbrido MS – 898. As médias das doses de fósforo para a variável SA dos insetos foram de 136,73; 117,27 e 108,91 para as doses de 0, 50% e 100% respectivamente.

O número de insetos mortos ao serem alimentados com o híbrido MS – 898 foi significativamente maior ($p < 0,05$) em comparação com os híbridos MC – 707 e MP – 512 (Tabela 3). Quando analisadas as doses de fósforo a mortalidade dos insetos foi de 1,91% para a dose 0, de 2,36 % para dose 50 e 2,09 para dose 100% de fósforo.

Observou-se um aumento de 1,06% na mortalidade dos insetos alimentados com o híbrido MS - 898 em comparação com os híbridos MP- 512 e MC - 707 (Tabela 3).

Tabela 3. Médias da emergência acumulada, sobrevivência acumulada e mortalidade acumulada de *Sitophilus zeamais* avaliados em dieta com grãos de híbridos de milho em teste sem chance de escolha aos 60 dias.

Híbridos	Emergência Acumulada	Sobrevivência Acumulada nº absoluto	Mortalidade Acumulada
MP- 512	173,75a	170,42a	1,833b
MC - 707	111,75b	108,5b	1,833b
MS - 898	80b	71,67b	2,889a

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Os híbridos MC - 707 e MS - 898 apresentaram uma maior média de grãos danificados (GD) por *Sitophilus zeamais* em comparação ao híbrido MP- 512 para essa variável (Tabela 4). Houve um aumento de 9% nos GD do híbrido MC - 707 em relação ao híbrido MP- 512 (Tabela 4). Para a variável GD, as médias das doses de 0, 50% e 100% de fósforo foram de 91,82; 91,91 e 90,73; respectivamente, sem diferença significativa entre si.

O híbrido MP- 512 apresentou diferença ($p < 0,05$) na produção de excrementos (PE) por *Sitophilus zeamais* (Tabela 4). Não houve diferença significativa entre as doses de fósforo, com médias de 0,62; 0,47 e 0,48 para as doses 0, 50% e 100% respectivamente. Em relação à TIC, os insetos alimentados com o híbrido MP – 512 apresentaram uma diferença ($p < 0,05$) em comparação aos insetos alimentados com os outros híbridos (Tabela 5). As médias das doses de fósforo para essa variável não apresentaram diferença significativa entre si, sendo 0,033; 0,031 e 0,029 para as doses 0, 50% e 100%, respectivamente.

Tabela 4. Médias de grão danificado, produção de excremento e taxa de crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* avaliados em dieta com grãos de híbridos de milho em teste sem chance de escolha aos 60 dias.

Híbridos	Grão danificado %	Excremento %	TIC ri
MP- 512	86,17b	0,94a	0,04a
MC - 707	95,29a	0,27b	0,03b
MS - 898	94,33a	0,30b	0,02b

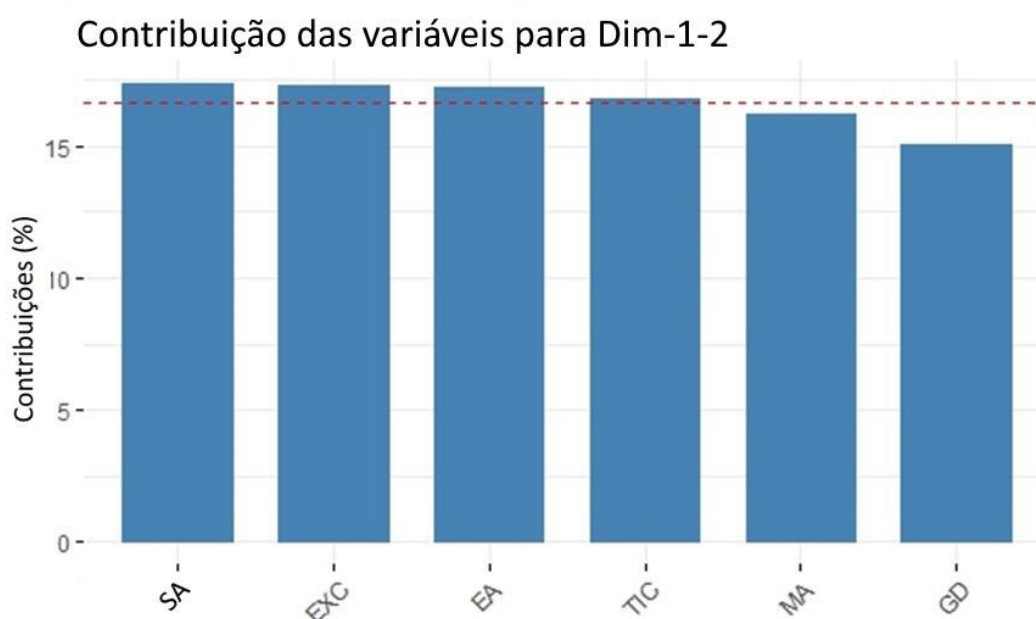
Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

A Análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para identificar as principais direções de variação entre as variáveis estudadas, relacionadas à

resistência e suscetibilidade dos grãos de milho ao *Sitophilus zeamais*.

A Figura 5 apresenta as contribuições percentuais das variáveis para as Dimensões 1 e 2 da PCA. Observa-se que as variáveis SA, EXC, EA e TIC têm contribuições superiores a 15%, evidenciando sua importância na explicação da variabilidade observada nessas dimensões principais. Embora as variáveis MA e GD apresentem contribuições relativamente menores, elas ainda desempenham um papel significativo na estrutura geral das dimensões analisadas.

Figura 5. Contribuição percentual das variáveis (SA, EXC, EA, TIC, MA, GD) para as Dimensões 1 e 2 da Análise de Componentes Principais (PCA).



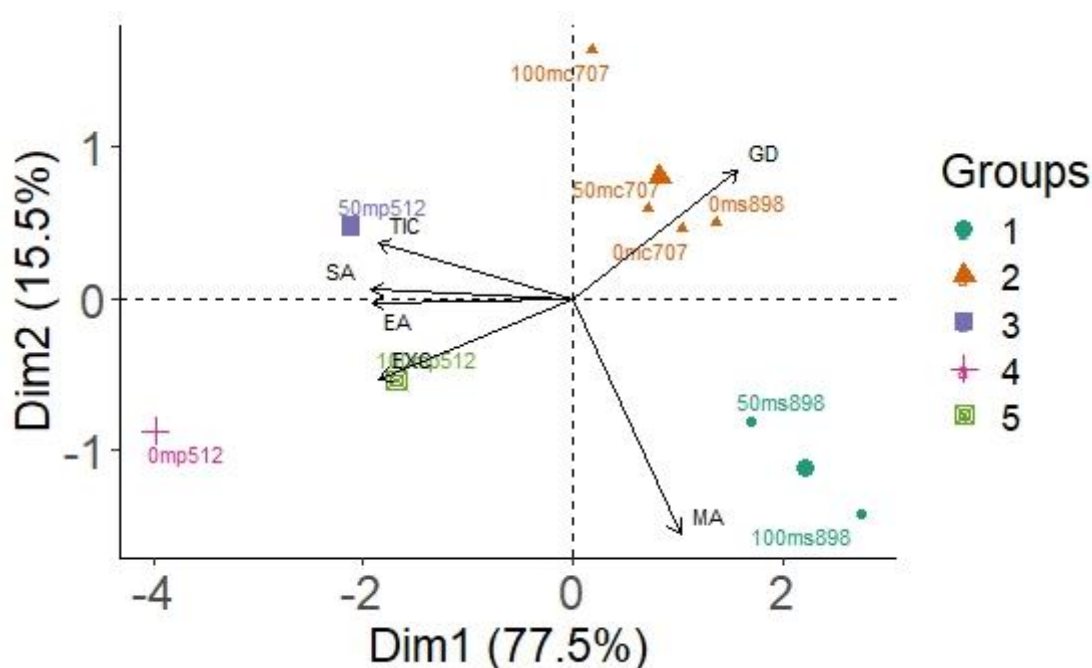
A PCA revelou as correlações entre as variáveis e agrupou os híbridos de milho com diferentes doses de fósforo com base em suas semelhanças. A Figura 6 mostra que as duas primeiras dimensões explicam 93% da variação total dos dados (77,5% pela Dimensão 1 e 15,5% pela Dimensão 2). As variáveis SA e TIC apresentaram uma correlação positiva significativa, sugerindo que respondem de forma semelhante à resistência ou suscetibilidade dos grãos ao inseto praga *Sitophilus zeamais*. EA e EXC também estão positivamente correlacionadas, indicando uma resposta similar à infestação desse inseto praga. MA e GD mostram uma correlação negativa, sugerindo que o aumento em uma dessas variáveis pode corresponder à diminuição na outra.

Os híbridos de milho e as doses de fósforo foram agrupados em cinco grupos

baseadas nas semelhanças das variáveis analisadas. O híbrido MS-898 nas doses de 50% e 100% de fósforo foi agrupado no grupo 1, apresentando características semelhantes em relação à Dimensão 1 e associadas a MA e GD. O grupo 2 incluiu os híbridos MC-707 nas doses de 0%, 50% e 100% de fósforo e MS-898 na dose 0% de fósforo, todos correlacionados positivamente com as variáveis GD e MA.

O grupo 3 compreendeu o híbrido MP-512 na dose de 50% de fósforo, associado a variáveis como SA, TIC, e EA, possivelmente indicando uma resposta semelhante em termos de resistência e suscetibilidade ao inseto praga. O grupo 4 destacou o híbrido MP-512 na dose de 0% de fósforo, sugerindo características distintas, enquanto o grupo 5, que compreende o híbrido MP-512 na dose 100% de fósforo, não foi fortemente associado a nenhuma das direções principais das variáveis.

Figura 6. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) mostrando a distribuição das variáveis e amostras nas Dimensões 1 e 2. Suscetibilidade de híbridos de milho cultivados com diferentes doses de fósforo sobre ataque do inseto praga *Sitophilus zeamais*.

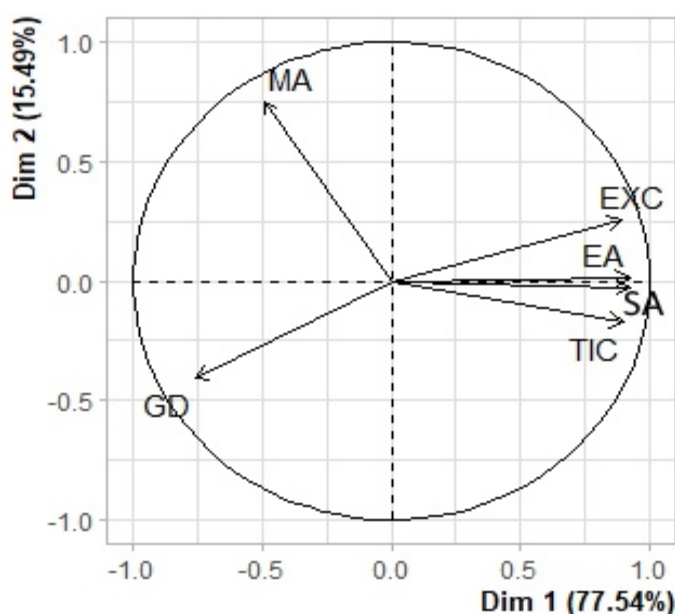


A PCA foi realizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar as principais direções de variação entre as variáveis. A Figura 7 mostra que os dois primeiros componentes principais explicam 93,03% da variância total, com 77,54%

atribuídos ao primeiro componente (Dim 1) e 15,49% ao segundo (Dim 2). As variáveis EXC, EA, SA, e TIC apresentam uma forte correlação positiva com Dim 1. Na nossa análise, identificamos que esses quatro fatores principais determinam a suscetibilidade dos grãos de milho ao ataque do *Sitophilus zeamais*. Por outro lado, a variável GD se correlaciona negativamente com essas variáveis, sugerindo que representa uma característica distinta.

A variável MA, por sua vez, contribui principalmente para Dim 2, revelando uma dimensão adicional de variação não capturada por Dim 1. Esses resultados sugerem que Dim 1 captura a maior parte da variabilidade compartilhada entre as variáveis, enquanto Dim 2, influenciado principalmente por MA, revela uma dimensão complementar, essencial para uma compreensão mais abrangente do fenômeno estudado.

Figura 7. Correlação entre as variáveis e suas contribuições para Dim1 e Dim2 em relação aos componentes principais.



4. DISCUSSÃO

Esse estudo analisou a resistência do *Sitophilus zeamais* entre diferentes híbridos de milho submetidos a diferentes doses de adubação fosfatada em três regiões do Brasil, utilizando teste sem chance de escolha.

A emergência e a sobrevivência da progênie de *Sitophilus zeamais* variaram

significativamente entre os híbridos avaliados. O híbrido MP- 512 apresentou o maior número de adultos do inseto em comparado aos demais híbridos, indicando alta susceptibilidade. Os híbridos MC - 707 e MS - 898 mostraram um elevado número de descendentes, o que surge uma resposta suscetível à infestação.

Os genótipos de milho com maior número de progênes e maior índice de suscetibilidade tendem a ter uma quantidade maior de excremento, enquanto aqueles com menor número de progênes e menor índice de suscetibilidade geralmente apresentam um peso reduzido de excrementos (ACHEAMPONG et al., 2019). Esses resultados são consistentes com as descobertas deste estudo, em que o híbrido MP - 512 apresentou as maiores médias para a emergência acumulada do inseto e produção de excrementos pelos insetos.

A emergência de insetos adultos é um parâmetro importante para avaliar a resistência a pragas (TORRES et al., 2016; NHAMUCHO et al 2017), impactando diretamente a qualidade e a comercialização dos grãos. Uma alta taxa de emergência de *Sitophilus zeamais* compromete a qualidade e o valor de mercado do milho.

A mortalidade do inseto praga *Sitophilus zeamais* foi significativa quando os insetos se alimentavam com o híbrido MS - 898. Em um estudo envolvendo 17 genótipos de milho moçambicano, a mortalidade parental de *Sitophilus zeamais* variou consideravelmente, sendo observada em níveis mais elevados (NHAMUCHO et al., 2017). A mortalidade do gorgulho é um dos critérios usados para avaliar a resistência ao gorgulho-do-milho (DERERA et al 2010). No entanto, embora a mortalidade elevada possa indicar algum nível de resistência, ela não é, por si só, suficiente para determinar a resistência de um híbrido ao ataque dessa praga. Isso ocorre por que tanto genótipos resistentes quanto suscetíveis podem apresentar alta mortalidade parental (NHAMUCHO et al., 2017). Portanto, é necessário considerar outros fatores além da mortalidade para avaliar a resistência ao *Sitophilus zeamais* de forma mais abrangente.

A resistência ao *Sitophilus zeamais*, medido pelo número de grãos danificados, mostrou variações significativas entre os híbridos. Entretanto, a dureza dos grãos não foi avaliada. Os híbridos MC - 707 e MS - 898 apresentaram maior número de grãos danificados pelos *Sitophilus zeamais*. A quantidade de excrementos produzidos por *Sitophilus zeamais* variou entre os híbridos, com maior produção quando alimentados pelo híbrido MP- 512. A presença de excrementos está diretamente relacionada ao sucesso reprodutivo de *Sitophilus zeamais* no milho.

Para a variável taxa instantânea de crescimento populacional os híbridos MC - 707 e MS - 898 apresentaram as menores médias diferindo do híbrido MP- 512 (Tabela 5). Embora todos os híbridos tenham mostrado uma taxa de crescimento populacional positiva, os híbridos MC - 707 e MS - 898 podem ser considerados mais resistentes, pois apresentaram uma redução na taxa instantânea de crescimento populacional do *Sitophilus zeamais*.

A seleção criteriosa durante as fases iniciais do desenvolvimento pode resultar em híbridos mais eficientes, atendendo tanto às exigências agronômicas quanto à resistência a pragas (KASOZI et al., 2015; SSERUMAGA et al., 2021). Esses achados enfatizam a necessidade de estratégias de manejo integrado de pragas e a importância de considerar variabilidades entre híbrido para maximizar a eficiência dos tratamentos aplicados.

A PCA revelou padrões importantes relacionados à resistência e suscetibilidade dos grãos de milho ao ataque do *Sitophilus zeamais*. Os gráficos fornecem uma visão abrangente dessas dinâmicas, destacando a contribuição das variáveis, a correlação entre elas e sua relação com as amostras testadas.

Na Figura 5, observa-se que as variáveis EXC, EA, SA e TIC contribuem significativamente para Dim 1, sugerindo que essa dimensão captura a variabilidade associada ao desenvolvimento e crescimento dos insetos. Esses fatores estão fortemente correlacionados, indicando que grãos que facilitam maior excreção, emergência, sobrevivência e crescimento dos insetos são mais suscetíveis ao ataque. Em contraste, GD e MA contribuem de forma distinta para Dim 2, sugerindo que essa dimensão está relacionada à resistência dos grãos, com MA associada a uma maior mortalidade dos insetos em grãos mais resistentes.

A Figura 6 detalha a relação entre as variáveis e as amostras de grãos e doses de fósforo. As variáveis EXC, EA, SA e TIC estão agrupadas, refletindo sua interdependência e confirmando que as amostras associadas a esses fatores são mais suscetíveis ao ataque do *Sitophilus zeamais*. Por outro lado, GD e MA estão posicionadas em oposição, indicando que as amostras associadas a essas variáveis são menos propícias ao desenvolvimento dos insetos, sugerindo maior resistência dos grãos.

A figura 7 evidencia as correlações diretas entre as variáveis estudadas. A proximidade das setas que representam EXC, EA, SA e TIC indicam uma forte correlação positiva entre elas, sugerindo que essas variáveis aumentam

simultaneamente em condições favoráveis ao *Sitophilus zeamais*. Isso implica que grãos de milho com altos níveis de EXC, EA, SA e TIC são mais suscetíveis a danos. Ao identificar essas características, possibilita a selecionar os grãos mais resistentes, contribuindo para a redução das perdas durante o armazenamento. Por sua vez, a seta de GD aponta na direção oposta a essas variáveis, indicando que, em grãos com maior dano, as condições não são ideais para o crescimento dos insetos.

A variável MA mostrou uma correlação negativa com outros parâmetros relacionados a resistência do milho, esses resultados corroboram aos de Nhamucho et al. (2017), o que sugere que grãos que aumentam a mortalidade dos insetos são menos propensos a permitir altos níveis de excreção, emergência e sobrevivência.

De acordo Nhamucho et al. (2017), MA não é um parâmetro aceitável como indicador da resistência do milho ao ataque do inseto praga *Sitophilus zeamais*. No entanto, a MA pode ser considerada um indicador indireto de resistência porque reflete como o híbrido de milho impacta a viabilidade do inseto *Sitophilus zeamais*. Se um híbrido resulta em alta mortalidade dos insetos, isso sugere que o híbrido possui características que dificultam a sobrevivência e o desenvolvimento do inseto, como propriedades defensivas ou menor atratividade. Assim, uma maior mortalidade acumulada indica que o híbrido pode ser mais resistente ao ataque do inseto, ao limitar sua capacidade de se proliferar e causar danos. Portanto essa variável precisa ser melhor elucidada para validar se deve ser um bom indicador a resistência do milho ao *Sitophilus zeamais*.

5. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a resistência de três híbridos de milho ao *Sitophilus zeamais* sob diferentes doses de adubação fosfatada. Os resultados indicam que o híbrido MP-512 apresentou a maior suscetibilidade, com aumentos significativos na emergência de adultos e produção de excrementos. Em contraste, os híbridos MC-707 e MS-898 demonstraram maior resistência relativa, com menores taxas instantâneas de crescimento populacional e menor produção de excrementos. As doses de fósforo não tiveram efeito significativo sobre a emergência e a sobrevivência dos insetos, sugerindo que a resistência dos híbridos é um fator mais determinante.

A Análise de Componentes Principais destacou que as variáveis produção de excrementos, emergência acumulada, sobrevivência acumulada e taxas instantâneas

de crescimento populacional estão associadas à suscetibilidade dos híbridos de milho ao inseto *Sitophilus zeamais*. Em contraste, a variável MA indica resistência, refletindo a capacidade dos híbridos de reduzir a viabilidade do inseto.

O híbrido MP-512, nas doses de 0% e 50% de fósforo, demonstrou uma maior suscetibilidade, seguido pelo MS-898 nas doses de 50% e 100% mostrando uma maior resistência. Esses resultados são fundamentais para a seleção de híbridos resistentes e o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo de pragas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHEAMPONG, A.; AYERTEY, J. N.; EZIAH, V. Y.; LFIE, B. E. Susceptibility of selected maize seed genotypes to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**. v.81, p. 62-68. 2019.

BALTZEGAR, J.; JONES, M. S.; WILLCOX, M.; RAMSEY, J. M.; GOULD, F. Population genetic structure of the maize weevil, *Sitophilus zeamais*, in southern Mexico. **PLOS ONE**. v,18. 2023.

BOAMAH, E.; OSEKRE, E.; AFUN, J.; AMOAH, R. Susceptibility of pro-Vitamin A biofortified maize genotypes to *Sitophilus zeamais* (Mots) in Ghana. **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development**. v.23,p.121, 23617 - 23636. 2023.

BUZO, F. S.; GARÉ, L. M.; GARCIA, N. F. S.; ANDRADE SILVA, M. S. R. DE; MARTINS, J. T.; SILVA, P. H. G. DA, MEIRELES, F. C., SOUZA SALES, L. Z. DE; NOGALES, A.; RIGOBELLO, E. C.; ARF, O. Effect of mycorrhizae on phosphate fertilization efficiency and maize growth under field conditions. **Scientific reports**. v.13, p. 3527, 2023.

CORTESE, D.; ANDRADE, G. S. Resistência de genótipos de milho a densidades de *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Revista Agrária Acadêmica**. v.5, p.41 – 55, 2022.

DERERA, J.; PIXLEY, K. V.; GIGA, D.P. Appraisal of protocol for the rapid screening of maize genotypes for maize weevil resistance. **African Entomology**. v.18, p. 8 - 16. 2010.

DIERKS, J.; BLASER-HART, W. J.; GAMPER, H. A.; SIX, J. Mycorrhizal fungi-mediated uptake of tree-derived nitrogen by maize in smallholder farms. **Nature Sustainability**. v. 5, p. 64 -70, 2022.

DIKBAS, N.; UÇAR, S.; TOZLU, G.; ÖZER, T. Ö.; KOTAN, R. The effect of immobilized chitinase enzyme on the biocontrol of *Sitophilus zeamais*. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**. v.47, p. 170 – 177, 2023.

EESIAH, S.; YU, J.; DINGHA, B.; AMOAH, B.; MIKIASHVILI, N. Preliminary Assessment of Repellency and Toxicity of Essential Oils against *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) on Stored Organic Corn Grains. **Foods**. v. 11, p. 2907, 2022.

GROOTE, H. DE.; GROOTE, B. DE.; BRUCE, A. Y.; MARANGU, C.; TEFERA, T. Maize storage insects (*Sitophilus zeamais* and *Prostephanus truncatus*) prefer to feed on smaller maize grains and grains with color, especially green. **Journal of Stored Products Research**. v. 71, p. 72 - 80. 2017.

HENDRIVAL, A.; ARYANI, D. S. Susceptibility and damage cereals to infestation *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) in storage. **Journal Agro**. v.6, p. 57 – 65, 2019.

HOU, L.; ZHANG, X.; FENG, G.; LI, Z.; ZHANG, Y.; CAO, N. Arbuscular mycorrhizal enhancement of phosphorus uptake and yields of maize under high planting density in the black soil region of China. **Scientific Reports**. 13;11(1):1100, 2021.

JOLLIFFE, L. T. 2002. **Principal component analysis**, second ed. Springer, New York, United States of America. 487.

KASOZI, L. C.; DERERA, J.; TONGOONA, P.; GASURA, E. Seed generation effect on quality of genetic information from maize (*Zea mays* L.) diallel cross for maize weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky) resistance. **Euphytica**. v.217, p.114., 2021

KASOZI, L. C., DERERA, J., TONGOONA, P. Response of maize population “Longe5” to two cycles of modified S1 recurrent selection for resistance to maize weevil. **Euphytica**. v. 204, p. 587 – 598. 2015.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**. v. 25, p. 1 –18. 2008.

LOPEZ-CASTILLO, L. M.; SILVA-FERNÁNDEZ, S. E.; WINKLER, R.; BERGVINSON, D. J.; ARNASON, J. T.; GARCÍA-LARA, S. Postharvest insect resistance in maize. **Journal of Stored Products Research**. v. 77, p. 66 - 76. 2018.

LORINI, I.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. DE B.; HENNING, A. A.; HENNING, F. A. **Manejo Integrado de Pragas de Grãos e Sementes Armazenadas**. 1ª ed. Brasília: Embrapa. 84 p., 2015.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 295 p., UFMG, 2013.

NASERI, B.; MAJD-MARANI, S. Different cereal grains affect demographic traits and digestive enzyme activity of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). **Journal of Stored Products Research**. v. 95, 2022.

NHAMUCHO, E.; MUGO, S.; GOHOLE, L.; TEFERA, T.; KINYUA, M.; MULIMA, E. Resistance of selected Mozambican local and improved maize genotypes to maize

weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky). **Journal of Stored Products Research**. 73, 115 – 124, 2017.

NWOSU, L. C. Impact of age on the biological activities of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) Adults on Stored Maize: Implications for Food Security and Pest Management. **Journal of Economic Entomology**. v. 111, p. 2454 - 2460. 2018.

RANJITH, H. V.; SAGAR, D.; KALIA, V. K.; DAHUJA, A.; SUBRAMANIAN, S. Differential activities of antioxidant enzymes, superoxide dismutase, peroxidase, and catalase vis-à-vis phosphine resistance in field populations of lesser grain borer (*Rhyzopertha dominica*) from India. **Antioxidants (Base)**. v. 12, n.2, p. 270. 2023.

RAYA-HERNÁNDEZ, A. I.; JARAMILLO-LÓPEZ, P. F.; LÓPEZ-CARMONA, D. A.; DÍAZ, T.; CARRERA-VALTIERRA, J. A.; LARSEN, J. Field evidence for maize-mycorrhiza interactions in agroecosystems with low and high P soils under mineral and organic fertilization. **Applied Soil Ecology**. v.149. 2020.

R DEVELOPMENT CORE TEAM., 2023. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria.

SSERUMAGA, J. P.; MAKUMBI, D.; OIKEH, S. O.; OTIM, M.; MACHIDA, L.; ANANI, B. Y.; NHAMUCHO, E.; BEYENE, Y.; MUGO, S. Evaluation of early-generation tropical maize testcrosses for grain-yield potential and weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky) resistance. **Crop Protection**. 139. 2021

STOFFEL, S. C. G., SOARES, C. R. F. S., MEYER, E., LOVATO, P. E.; GIACHINI, A. J. Yield increase of corn inoculated with a commercial arbuscular mycorrhizal inoculant in Brazil. **Ciência Rural**. v. 50, p. 1 – 10. 2020.

SULEIMAN, R.; WILLIAMS, D.; NISSEN, A.; BERN, C. J.; ROSENTRATER, K. A., 2015. Is flint corn naturally resistant to *Sitophilus zeamais* infestation? **Journal of Stored Products Research**. v.60, 2015.

TORRES, E. B.; NÓBREGA, R. S. A.; FERNANDES-JUNIOR, P. I.; SILVA, L. B. CARVALHO, G.S.; MARINHO, R. C. N.; PAVAN, B. The damage caused by *Callosobruchus maculatus* on cowpea grains is dependent on the plant genotype. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v.96, 2016.

WALTHALL, W. K.; STARK, J.D. Comparison of two population-level ecotoxicological endpoints: the intrinsic (rm) and instantaneous (ri) rates of increase. **Environmental Toxicology and Chemistry**. v 16, p. 1068-1073, 1997.

WHITE, R. R.; GLEASON, C. B. Global human-edible nutrient supplies, their sources, and correlations with agricultural environmental impact. **Scientific Reports**. v.12, 1687, 2022.