

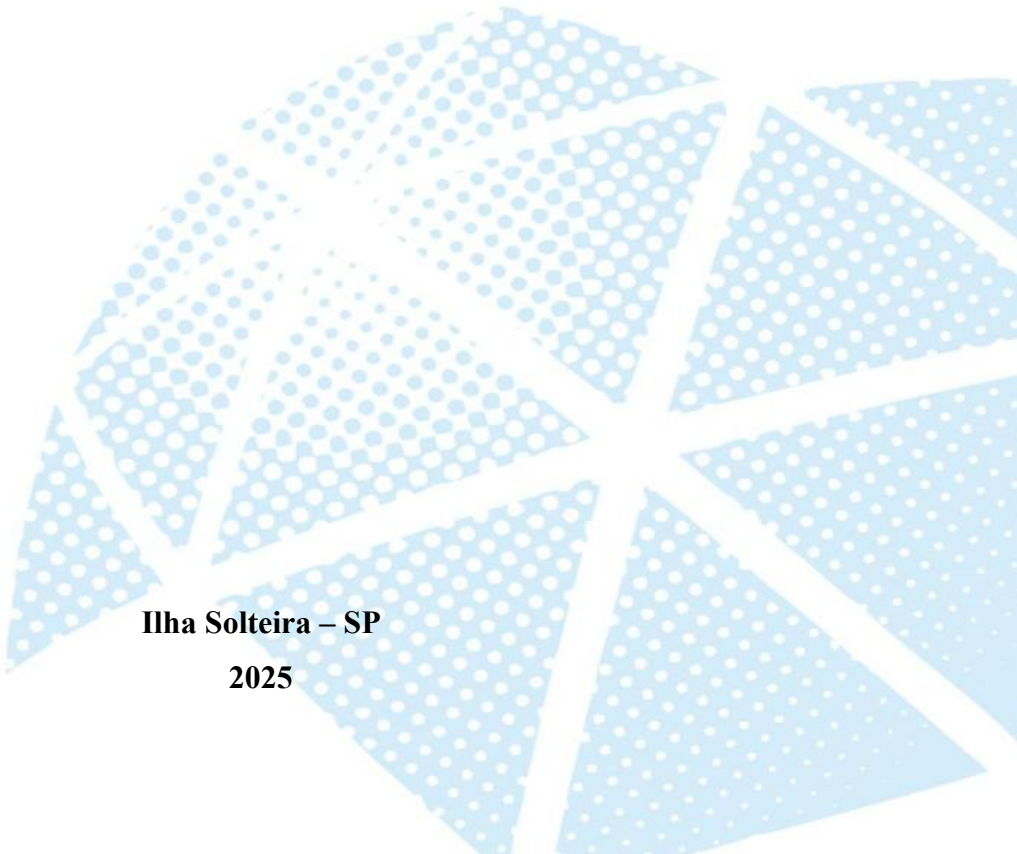
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BÁRBARA DE ALMEIDA NEGRÃO

**ENCAPSULAMENTO DE ESPOROS DE FUNGO MICORRÍZICO ARBUSCULAR
COM BIOPOLÍMERO E DOSES DE FÓSFORO NO DESENVOLVIMENTO
INICIAL DE MILHO EM VASOS**

Ilha Solteira – SP

2025



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BÁRBARA DE ALMEIDA NEGRÃO

**ENCAPSULAMENTO DE ESPOROS DE FUNGO MICORRÍZICO ARBUSCULAR
COM BIOPOLÍMERO E DOSES DE FÓSFORO NO DESENVOLVIMENTO
INICIAL DE MILHO EM VASOS**

Orientador(a): Profa. Dra. Ana Maria
Rodrigues Cassiolato

Coorientador(a): Dr. Philippe Solano Toledo
Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia da Unesp – Câmpus
de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

**Ilha Solteira – SP
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

N385e Negrão, Bárbara de Almeida.
Encapsulamento de esporos de fungo micorrízico arbuscular com biopolímero e doses de fósforo no desenvolvimento inicial de milho em vasos. / Bárbara de Almeida Negrão. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
38 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Ana Maria Rodrigues Cassiolato
Coorientador: Philippe Solano Toledo Silva
Inclui bibliografia

1. Micorriza. 2. Alginato. 3. *Rhizophagus clarus*. 4. Cerrado. 5. *Zea mays* L. 6. Simbiose.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Encapsulamento de esporos de fungo micorrízico arbuscular com biopolímero e doses de fósforo no desenvolvimento inicial de milho em vasos.

ALUNO: *Bárbara de Almeida Negrão* RA: 212051415

ORIENTADOR: Ana Maria Rodrigues Cassiolato

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 9

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 PHILIPPE SOLANO TOLEDO SILVA
Data: 03/12/2025 18:44:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Philippe Toledo Solano Silva
Presidente (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 DEBORA RIBEIRO ANTUNES
Data: 04/12/2025 10:10:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Débora Ribeiro Antunes

Documento assinado digitalmente
 GUILHERME CARLOS FERNANDES
Data: 09/12/2025 11:52:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Guilherme Carlos Fernandes

Documento assinado digitalmente
 BARBARA DE ALMEIDA NEGRAO
Data: 10/12/2025 11:27:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Bárbara de Almeida Negrão

Ilha Solteira, 12 de Novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha mais profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse realizar esta fase tão significativa de minha vida.

Em primeiro lugar, à minha orientadora Ana Maria Rodrigues Cassiolato e ao meu coorientador Philippe Solano Toledo Silva, pela orientação, paciência e sabedoria, as quais foram fundamentais ao longo deste processo. Mais do que orientadores acadêmicos, vocês me apoiaram nos momentos complicados da minha graduação, sempre trazendo palavras de encorajamento e direcionamento para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor Grillo e à Débora pelo auxílio e orientação no desenvolvimento das esferas, cuja contribuição foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Luiza Van Leeuwen, que me incentivou desde os primeiros passos; à Eduarda de Almeida Abrahão e ao Leonardo de Almeida Palamin pela amizade e suporte constantes desde o início da graduação.

À minha família, dedico um agradecimento especial. Breno Sgarbi Gomes, sua confiança e apoio foram a inspiração que me impulsionou nos momentos difíceis. Aos meus pais, Luiz Carlos Negrão e Suely dos Santos de Almeida Negrão, e à minha irmã, Sabrina de Almeida Negrão, meu mais sincero reconhecimento por estarem sempre ao meu lado, acreditando no meu potencial, compreendendo minhas escolhas e sendo essenciais em cada etapa da minha vida e mesmo sem perceber ao meu sobrinho, Gabriel de Almeida Negrão que apenas por sua existência me motiva cada dia mais a progredir e ser uma pessoa melhor.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

RESUMO

O uso de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), como *Rhizophagus clarus* é uma estratégia sustentável para melhorar o crescimento vegetal em solos do Cerrado, onde a baixa disponibilidade de fósforo (P) limita o desenvolvimento das plantas. O FMA amplia a absorção de nutrientes, e seus esporos precisam ser protegidos para manter a viabilidade. O encapsulamento em alginato de sódio preserva os propágulos e favorece a colonização radicular. Este estudo avaliou esferas de alginato com esporos associadas à adubação fosfatada, visando melhorar o desenvolvimento inicial do milho. Os experimentos foram conduzidos na UNESP de Ilha Solteira. Na Etapa I, multiplicou-se *Rh. clarus*, cultivando *Urochloa brizantha* por 80 dias para produzir o solo-inóculo. Na Etapa II, esporos foram extraídos, selecionados e encapsulados em alginato gelificado com CaCl₂. Na Etapa III, avaliou-se o desempenho das esferas associadas ao superfosfato triplo em delineamento 4 × 2 com milho AG 7098. A adubação fosfatada aumentou número de folhas, comprimento radicular e crescimento inicial. A combinação entre P e esporos encapsulados elevou massa seca, altura e colonização micorrízica. O encapsulamento mostrou-se eficaz para manter a viabilidade dos propágulos, resultando em plantas mais desenvolvidas e maior eficiência na absorção de nutrientes, configurando uma estratégia sustentável.

Palavras-chave: Micorriza; Alginato; *Rhizophagus clarus*; Cerrado; *Zea mays* L; Simbiose.

ABSTRACT

The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), such as *Rhizophagus clarus*, is a sustainable strategy to improve plant growth in Cerrado soils, where low phosphorus (P) availability limits plant development. AMF enhance nutrient uptake, and their spores must be protected to maintain viability. Encapsulation in sodium alginate preserves the propagules and favors root colonization. This study evaluated alginate spheres containing spores combined with phosphate fertilization to improve early maize growth. The experiments were conducted at UNESP in Ilha Solteira. In Stage I, *Rh. clarus* was multiplied by cultivating *Urochloa brizantha* for 80 days to produce the inoculum soil. In Stage II, spores were extracted, selected, and encapsulated in alginate gelled with CaCl₂. In Stage III, the performance of the spheres combined with triple superphosphate was evaluated in a 4 × 2 designs using AG 7098 maize. Phosphate fertilization increased leaf number, root length, and early growth. The combination of P and encapsulated spores enhanced shoot dry mass, plant height, and mycorrhizal colonization. Encapsulation proved effective in maintaining propagule viability, resulting in better-developed plants and greater nutrient uptake efficiency, representing a sustainable strategy for agricultural systems.

Keywords: Mycorrhiza; Alginate; *Rhizophagus clarus*; Cerrado; *Zea mays* L.; Symbiosis.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	O CERRADO E A PRODUÇÃO VEGETAL DE MILHO	13
2.2.	FÓSFORO NO SOLOS DO CERRADO	14
2.3.	<i>RHIZOPHAGUS CLARUS</i> FUNÇÃO E ECOLOGIA DOS FMA	15
2.4.	BIOPOLÍMEROS DE ALGINATO DE SÓDIO	17
3.	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA	23
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5.	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Multiplicação do fungo micorrízico arbuscular *Rh. clarus*. a) semeadura e b) adubação com ureia. _____ 19
- Figura 2.** Processos para obtenção dos esporos viáveis de *Rh. clarus* e encapsulamento. a) decantação e peneiramento úmido; b) centrifugação das amostras; c) esporos viáveis para separação e d) esporos encapsulados em solução de CaCl_2 . _____ 20
- Figura 3.** Experimento da avaliação do potencial, análise de clorofila foliar, colonização radicular das plantas de milho e análise de multiplicação de esporos, sendo a) análise de clorofila foliar com o ClorofiLOG da FALKER nas plantas de milho após 40 dias de semeadura, b) fragmento de raiz colonizada; c) quantificação de esporos com microscópio ótico. _____ 22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos do solo arenoso (neossolo) na camada superficial (0,0 – 0,2 m), utilizando metodologia proposta por Raij et al. (2001). _____ 21

Tabela 2. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) para massa seca da parte aérea (MSPA), altura de plantas (ALT), número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DC), comprimento de raízes (CR), teor relativo de clorofila (SPAD), colonização radicular por fungo micorrízico arbuscular (FMA) e número de esporos de FMA (NESP) em plântulas de milho cultivadas em vasos, para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), aos 45 dias após a germinação. _____ 25

Tabela 3. Interações significativas para os fatores Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus claurus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), para massa seca da parte aérea, altura de plantas, diâmetro do coleto, colonização radicular por FMA e número de esporos de FMA em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação. _____ 26

Tabela 4. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) da fertilidade do solo para Fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), pH, acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V), para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação. _____ 27

Tabela 5. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) da análise foliar em plântulas de milho cultivadas em vasos para nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação. _____ 29

Tabela 6. Interações significativas para os fatores: Esferas de alginato, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), para o teor nutricional de cálcio e boro em plântulas de milho, em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação. _____ 30

1. INTRODUÇÃO

O uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas é uma prática sustentável na agricultura. Dentre estes, a associação com os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) vem sendo relatada como benéfica para o cultivo de milho no Cerrado (Silva et al., 2022b). Visto que por meio de sua rede de hifas, estes fungos exploram o solo por água e nutrientes, que são transferidos aos hospedeiros, se necessário, incluindo os de baixa mobilidade. Além de suas hifas, os esporos dos FMA também funcionam como estruturas de propagação. Estes, por serem quiescentes, precisam ser ativados para desencadear suas funções metabólicas de germinação e crescimento (Lidoy et al., 2023).

Esses simbiossiontes são biotróficos obrigatórios, ou seja, se propagam apenas quando associados a uma planta viva e em condições adequadas de umidade e temperatura (Delvian; Rambey, 2019). No Cerrado, tais condições são particularmente relevantes, já que seus solos, predominantemente Latossolos e Argissolos, possuem elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica e forte fixação de fósforo por óxidos de ferro e alumínio, dificultando a disponibilidade desse nutriente essencial (Dias et al., 2025). Desta forma, a manutenção destes esporos e sua viabilidade devem ser preservadas para garantir o sucesso na colonização radicular e os seus benefícios à planta hospedeira. Neste contexto, técnicas de encapsulamento de microrganismos utilizando polímeros biodegradáveis, com boa compatibilidade e de baixo custo, podem ser uma alternativa para aumentar a viabilidade destes propágulos no solo (Delvian; Rambey, 2019).

Nesse contexto, técnicas de encapsulamento de microrganismos utilizando polímeros biodegradáveis apresentam-se como alternativas promissoras para proteger, transportar e favorecer a sobrevivência de propágulos no solo (Delvian; Rambey, 2019). Uma variedade de materiais pode ser utilizada como matéria-prima para o encapsulamento de microrganismos, como amido, quitosana, e o alginato. O alginato é um polímero, extraído de algas marrons, apresentando baixo custo e é ambientalmente seguro (Machado et al., 2022).

O fungo *Rhizophagus clarus*, amplamente estudado no Brasil, destaca-se por sua elevada eficiência simbiótica, contribuindo para o aumento da absorção de nutrientes, tolerância a estresses abióticos e melhoria no crescimento inicial de culturas como o milho (Silva et al., 2022b; Tavares et al., 2024). Além disso, a inoculação com *R. clarus* tem sido associada a maior aproveitamento de fósforo em solos com alta fixação desse elemento, característica típica das áreas de Cerrado (Radi et al., 2024).

Dessa forma, configura-se como uma alternativa sustentável promissora para aumentar a viabilidade de esporos dos FMA no solo. Este estudo está alinhado à "Agenda 2030" da ONU,

que visa promover os "17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável" (ODS), destacando-se o "ODS2" – "Fome zero e agricultura sustentável", o "ODS13" – "Ação contra a mudança global do clima" e o "ODS15" – "Vida terrestre" (ONU, 2021).

Assim, testamos a seguinte hipótese: a utilização de alginato de sódio na construção de esferas poliméricas para o encapsulamento de esporos de *Rh. clarus* aumentará a viabilidade desses propágulos no solo, promovendo benefícios às culturas, como a do milho, por meio da colonização radicular e da maior aquisição de nutrientes do solo.

Dessa maneira, foi avaliado o efeito do alginato de sódio na formação de esferas poliméricas destinadas ao encapsulamento de esporos de *Rh. clarus*, associadas à adubação fosfatada, sobre a fertilidade do solo e o desenvolvimento inicial de plantas de milho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O CERRADO E A PRODUÇÃO VEGETAL DE MILHO

Considerada a savana mais rica do mundo, conforme o ICMBio (Brasil, 2024) o Cerrado possui cerca de 6 mil espécies de plantas nativas, abrangendo uma área de 2.036.448 km², cerca de 23,9% do território brasileiro. Como Bioma, é o segundo maior do Brasil, estando presente em estados como Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e São Paulo (Colli; Vieira; Dianese, 2020). A região apresenta grande relevância e potencial para a produção de grãos voltados à agricultura, como o milho, que se destina a alimentação humana, na forma de farinhas e óleos (Tanumihardjo et al., 2020; Alves et al., 2021) e a produção animal, como rações e silagens (Alamnie et al., 2022).

No contexto do agronegócio mundial, o milho (*Zea mays*), uma gramínea da família Poaceae originária do México, é atualmente uma das culturas mais expressivas do mundo, destacando-se como um dos três cereais mais relevantes. O Brasil, como um dos principais atores globais, ocupa a terceira posição na produção e a segunda na exportação do grão (Gonçalves et al., 2021; USDA, 2024).

Com no total duas safras anuais, o milho se consolida como um dos pilares do agronegócio brasileiro, exercendo papel estratégico tanto no mercado interno, sendo a maior parte ao consumo humano e o restante ficando nas propriedades, para o consumo animal, quanto no externo com destino ao mercado, onde será comercializada para indústrias químicas, fábricas de ração e exportação (Maciel; Tunes, 2021). A segunda safra, conhecida como safrinha, é cultivada entre os meses de janeiro e maio, logo após a colheita da soja, permitindo o aproveitamento da mesma área produtiva e otimizando recursos. Assim mais do que uma

oportunidade econômica, a safrinha representa o compromisso do setor com a inovação, sustentabilidade e o aumento da oferta de alimentos (Sou Agro, 2025).

Nos solos de Cerrado, no entanto, em função da intemperização e baixa disponibilidade de nutrientes, o desenvolvimento inicial de plantas de milho pode ser prejudicado (Raniero et al., 2022). Destacando-se especialmente o fósforo, cuja baixa disponibilidade representa um dos principais entraves ao crescimento vegetal.

2.2.FÓSFORO NO SOLOS DO CERRADO

Dentre os macronutrientes essenciais às plantas, o fósforo (P) se destaca como um dos mais limitantes ao crescimento vegetal, sobretudo pela sua baixa disponibilidade nos solos (Aleixo et al., 2020). Trata-se de um elemento indispensável ao metabolismo das plantas, participando de reações bioquímicas fundamentais para o fluxo energético, já que compõe moléculas como ADP (adenosina difosfato) e ATP (adenosina trifosfato) (Júnior et al., 2022; Wang et al., 2021; Lambers, 2022; Caballero; Durango; Pérez-Polo, 2023). Além da função energética, o P desempenha papéis estruturais relevantes, pois integra membranas fosfolipídicas e os ácidos nucleicos (DNA e RNA), conferindo estabilidade e funcionamento adequado às células (Wang et al., 2021; Lambers, 2022; Caballero; Durango; Pérez-Polo, 2023).

Por atuar em diferentes etapas do desenvolvimento, o P influencia diretamente nos processos como divisão celular, crescimento inicial das raízes, perfilhamento, formação de sementes, atividades fotossintéticas e respiratórias. Sua disponibilidade, portanto, está intimamente ligada à produção de biomassa e à qualidade nutricional das culturas (Wang et al., 2021; Lambers, 2022).

Apesar disso, a oferta desse nutriente nos solos agrícolas especialmente nos solos do Cerrado representa um dos maiores gargalos da agricultura moderna. As reservas naturais de rochas fosfatadas, principal matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados, são finitas e apresentam queda gradual na qualidade, o que eleva custos de extração e processamento (Alewell et al., 2020). Assim, a reposição contínua do nutriente se torna indispensável para manter a produtividade, reforçando a necessidade de estratégias mais eficientes e sustentáveis de manejo (Sulieman et al., 2021).

Essa dificuldade se intensifica devido à própria dinâmica do P no solo. Grande parte dos compostos fosfatados ocorre em formas insolúveis ou fortemente adsorvidas às partículas minerais, dificultando a absorção pelas plantas (Milic et al., 2019). Estimativas indicam que entre 80 e 90% do P aplicado pode ser perdido por escoamento superficial ou lixiviação, agravada por chuvas e práticas de irrigação (Salama et al., 2023). Quando esse excesso alcança

corpos d'água, contribui para processos de eutrofização, estimulando a proliferação de organismos aquáticos e a redução do oxigênio dissolvido, com impactos ambientais expressivos (Alewell et al., 2020).

Nos solos brasileiros, esses desafios são ainda mais marcantes. O intenso intemperismo típico de regiões tropicais reduz naturalmente os teores de P disponível (Novais et al., 2007; Vinha et al., 2021). A presença de argilas de alta atividade e de elevados teores de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) favorece a forte adsorção do nutriente, que pode ser gradualmente convertido em formas não lábeis, indisponíveis às plantas (Novais et al., 2007; Vinha et al., 2021; Milic et al., 2019). Somado aos baixos níveis de matéria orgânica, esse cenário contribui para a predominância de formas inorgânicas pouco acessíveis aos vegetais (Pinto et al., 2020; Alovisei et al., 2020).

Mesmo assim, o fósforo orgânico constitui uma fração relevante nos solos tropicais, variando entre 15 e 18% do total (Pinto et al., 2020). Originado principalmente da decomposição de resíduos vegetais e da biomassa microbiana, ele é continuamente mineralizado e reciclado, desempenhando papel importante no suprimento de P em sistemas pobres em formas inorgânicas ou manejados com altas cargas de matéria orgânica (Pinto et al., 2020; Sulieman et al., 2021).

Diante desse contexto, a definição adequada das doses de fertilizantes fosfatados é essencial para atender às necessidades das culturas, evitar o desperdício de um recurso não renovável e minimizar os riscos ambientais decorrentes do escoamento superficial e da contaminação de corpos hídricos (Ullah et al., 2023). Nesse cenário, estratégias biológicas, como o uso de fungos micorrízicos arbusculares, podem auxiliar na absorção de nutrientes de baixa mobilidade como o P.

2.3. *RHIZOPHAGUS CLARUS* FUNÇÃO E ECOLOGIA DOS FMA

Rhizophagus clarus é um fungo micorrízico arbuscular (FMA), pertencente ao filo Glomeromycota, amplamente reconhecido pela capacidade de formar simbioses mutualísticas obrigatórias com as raízes da maioria das plantas terrestres (Radi et al., 2024; Tavares et al., 2024). Essa relação se concretiza por meio da formação de arbúsculos e vesículas no interior das raízes, além de uma rede extensa de hifas extrarradiculares, que aumenta de forma expressiva o volume de solo explorado. Essas estruturas são fundamentais para a absorção de água e nutrientes, refletindo diretamente no crescimento e no vigor das plantas (Silva et al., 2022a; Tavares et al., 2024; Radi et al., 2024).

No processo simbiótico, há uma troca equilibrada: a planta fornece ao fungo o carbono produzido pela fotossíntese, enquanto o FMA disponibiliza água e nutrientes essenciais, especialmente aqueles de baixa mobilidade no solo, como fósforo (P), zinco (Zn) e cobre (Cu) (Singh et al., 2010; Salgado et al., 2016; Storer et al., 2017; Gomes Júnior et al., 2018). As hifas micorrízicas conseguem ultrapassar a região imediata da rizosfera, alcançando locais inacessíveis ao sistema radicular, o que otimiza a absorção mineral (Sousa et al., 2021). Além disso, a simbiose contribui para aumentar a tolerância das plantas a condições adversas, como seca, salinidade e outros estresses ambientais ou fitopatogênicos (Costa et al., 2020).

Do ponto de vista morfológico, *Rh. clarus* apresenta esporos hialinos a amarelados, com formato globoso a subgloboso e protegidos por uma parede formada por três camadas: uma camada mucilaginosa externa, outra laminada e hialina mais rígida e, por fim, uma camada laminada pigmentada, responsável pela coloração do esporo (Stürmer et al., 2025). Essa composição garante proteção ao material genético e contribui para a sobrevivência e dispersão do fungo em diferentes ambientes.

Estudos biogeográficos mostram que *Rh. clarus* possui distribuição cosmopolita, sendo encontrado em praticamente todos os continentes e em biomas muito distintos, como desertos, manguezais, florestas boreais, formações temperadas e ambientes tropicais (Stürmer et al., 2025). Sua ocorrência é favorecida em locais com temperatura média anual próxima de 20 °C e precipitação em torno de 2.000 mm. Além disso, o fungo apresenta boa adaptação a solos moderadamente ácidos e pobres em P, uma condição comum em regiões tropicais fortemente intemperizadas, nas quais a simbiose micorrízica oferece vantagens ecológicas significativas.

Sob a perspectiva funcional, o *Rh. clarus* se destaca pela eficiência em promover crescimento vegetal e melhorar o estado nutricional das plantas. Os arbúsculos funcionam como pontos de intensa troca metabólica entre fungo e hospedeiro, permitindo maior eficiência na absorção de nutrientes pouco móveis. A simbiose também contribui para melhorar o estado hídrico da planta e reduzir danos provocados por estresses abióticos, particularmente em ambientes salinos. Nessas condições, o fungo auxilia no equilíbrio iônico, minimiza a toxicidade por sódio e estimula enzimas antioxidantes, como catalases e peroxidases, reduzindo o estresse oxidativo nos tecidos vegetais (Tavares et al., 2024).

A soma de características, como a ampla distribuição geográfica, capacidade de colonização radicular, eficiência em melhorar o crescimento e a nutrição das plantas e habilidade de mitigar estresses abióticos, coloca *Rh. clarus* entre os FMA mais promissores para uso como biopolímeros em sistemas agrícolas sustentáveis. Diante de desafios como salinização de solos, baixa disponibilidade de P em ambientes tropicais e impactos das

mudanças climáticas, sua utilização representa uma estratégia ecologicamente adequada e agronomicamente vantajosa para manter e elevar a produtividade agrícola (Stürmer et al., 2025; Radi et al., 2024; Tavares et al., 2024; Silva et al., 2022a).

Considerando esse potencial e a necessidade de tecnologias que garantam a estabilidade e a eficiência do fungo no campo, torna-se fundamental empregar métodos capazes de proteger os esporos e preservar sua viabilidade. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se os biopolímeros naturais, como o alginato de sódio, amplamente utilizado para o encapsulamento de microrganismos (Costa, 2024).

2.4.BIOPOLÍMEROS DE ALGINATO DE SÓDIO

Extraído principalmente de algas marrons da classe *Phaeophyceae*, o alginato é amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, biomédica e farmacêutica devido à biodegradabilidade, à baixa toxicidade e à capacidade de formar filmes (Santos, 2022; Soares, 2025).

O uso de biopolímeros ambientalmente sustentáveis tem ganhado destaque nos últimos anos, especialmente na produção de embalagens biodegradáveis e filmes ativos (Amado, 2022). Entre esses materiais, o alginato de sódio se destaca como um dos mais empregados em técnicas de encapsulamento por gelificação iônica. Essa popularidade se deve à sua grande versatilidade, ao baixo custo, à biocompatibilidade e à capacidade de formar géis estáveis, características que o tornam especialmente adequado para diversas aplicações tecnológicas e biológicas (Costa, 2024). Por essas razões, o uso do alginato de sódio no encapsulamento de esporos fúngicos tem ganhado espaço no desenvolvimento de biofungicidas e biopolímeros, contribuindo para manter a viabilidade microbiana e ampliar a durabilidade dos produtos durante o armazenamento (Costa, 2024; Celestino et al., 2022).

A encapsulação contribui diretamente para a estabilidade dos esporos ao minimizar danos provocados por variações de temperatura, umidade ou pela exposição ao oxigênio, o encapsulamento microbiano tem sido estudado como uma barreira eficaz contra estresses térmicos, oxidativos e ambientais, especialmente em formulações de biopolímeros. Ensaio com *Trichoderma* spp. imobilizado em alginato mostram que os conídios mantêm elevada viabilidade ($\approx \log 7/g$) por até 120 dias sob temperaturas entre 8 °C e 25 °C, tanto em esferas intactas quanto em formulações liofilizadas (Lopes et al., 2018; Silva et al., 2024).

Outro avanço importante envolve o co-encapsulamento com substâncias que atuam como crioprotetores ou fontes nutricionais, como trealose, manitol e ácido húmico. Esses

compostos ajudam a preservar a integridade microbiana e a aumentar a taxa de sobrevivência após períodos de armazenamento ou criopreservação (Costa, 2024; Santiago et al., 2020).

O processo químico por trás da formação das esferas de alginato ocorre pela gelificação ionotrópica, que depende da interação entre o alginato de sódio e os íons cálcio presentes na solução de cloreto de cálcio (CaCl_2). O alginato é um polieletrólito aniônico, solúvel em água devido aos grupos carboxilato das unidades de ácido manurônico (M) e gulurônico (G). Quando a solução contendo o microrganismo é gotejada em CaCl_2 , os íons Na^+ são substituídos por Ca^{2+} , que se ligam preferencialmente aos blocos G das cadeias poliméricas. Forma-se então o conhecido modelo “egg-box”, no qual os íons Ca^{2+} se organizam entre as cadeias como “ovos em uma caixa”, promovendo ligações cruzadas que resultam em um hidrogel insolúvel de alginato (Medeiros et al., 2022).

A técnica de gotejamento é uma das mais utilizadas para a gelificação ionotrópica por ser simples, econômica e altamente reprodutível, permitindo a produção de esferas uniformes com elevada eficiência de encapsulamento (Medeiros et al., 2022). As dimensões das macros, micros ou nanoesferas dependem, sobretudo, da viscosidade da solução polimérica, do diâmetro do bico extrusor e da concentração de CaCl_2 (Costa, 2024).

Do ponto de vista estrutural, o alginato é formado por unidades de β -D-manuronato (M) e α -L-guluronato (G), ligadas por ligações glicosídicas 1 $\rightarrow$ 4, que podem se organizar em blocos homogêneos ou heterogêneos. A proporção M/G determina propriedades como viscosidade, rigidez da matriz, seletividade iônica e capacidade gelificante características essenciais em aplicações de encapsulamento e na produção de hidrogéis e filmes (Amado, 2022).

Assim, o alginato de sódio destaca-se como uma matriz eficiente para o encapsulamento microbiano e como um biopolímero versátil na produção de hidrogéis e filmes. Sua estrutura, aliada à capacidade de gelificação iônica e à compatibilidade com diferentes técnicas de modificação, assegura ao material um potencial expressivo para aplicações agrícolas, ambientais e industriais (Amado, 2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

As etapas de desenvolvimento dos experimentos foram realizadas nas dependências da Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Ilha Solteira, como no Laboratório de Microbiologia do Solo e em casa-de-vegetação.

Etapa I – Multiplicação do inóculo do FMA

A multiplicação do inóculo do *Rh. clarus* (Figura 1), foi conduzida em casa-de-vegetação. Esta teve início com a desinfecção das jardineiras, com água e sabão e uma solução de hipoclorito de sódio (10%), seguida pela preparação e peneiramento de uma mistura de solo arenosa, composto de solo de barranco misturado com areia grossa lavada, na proporção de 2:1. O solo, segundo Santos et al., 2023, se trata de um LATOSSOLO Vermelho, textura argilosa o qual foi coletado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da UNESP, Campus de Ilha Solteira. Separada a quantidade correta para 4 bandejas, a mistura foi autoclavado por 20 minutos, a 110 °C / 1 atm, para eliminar microrganismos existentes, que poderiam interferir no experimento.

Figura 1. Multiplicação do fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus clarus*. a) semeadura e b) adubação com ureia.



Fonte: Autoria própria (2023).

Preenchidas as jardineiras, foi realizado a semeadura da gramínea *Urochloa brizantha*, mais conhecida como Capim Marandu, misturada com esporos do FMA. Assim preparadas, foram transferidas para uma casa de vegetação fechada, após 19 dias houve aplicações de 15 gramas de ureia por vaso e aos 80 dias no total com monitoramento e irrigação diária, a multiplicação do fungo foi encerrada com a retirada da parte aérea. O solo, juntamente com as raízes, foi deixado secar à sombra, temperatura ambiente, antes serem peneirados, resultando no solo-inóculo.

Etapa II – Separação dos esporos de FMA e preparo das esferas

Para separação dos esporos do solo-inóculo (Figura 2), amostras de 50g foram lavadas para coleta dos esporos, sendo cada uma com uma média de 39 esporos. Para tanto, foi utilizada a metodologia de decantação e peneiramento úmido proposta por Gerdemann e Nicolson (1963), seguida de centrifugação e flutuação em solução por sacarose (Jenkins, 1964), a qual

consiste na lavagem e peneiramento das amostras 4 vezes, centrifugação por 5 minutos para sedimentação, é retirado o excesso de água e adicionado à solução de sacarose, foram agitadas e centrifugadas por mais 1 minuto para os esporos flutuarem e então foi realizada a separação (Figura 2) de 900 esporos viáveis de *Rh. clarus* sob microscópio estereoscópio, para posterior encapsulamento.

As esferas poliméricas de alginato foram preparadas utilizando a metodologia adaptada de gelificação, descrita por Şanlı et al. (2008) e Bulut (2020). A técnica envolve a agitação de uma solução contendo 0,4 g de alginato de sódio em 10 mL de água com os esporos. Após se tornar homogênea, esta foi gotejada com uma seringa em uma solução preparada com 1 g CaCl_2 em 100 mL de água, sob também agitação constante resultando na formação das esferas (Figura2), com uma média de 2 esporo de FMA cada.

Figura 2. Processos para obtenção dos esporos viáveis de *Rhizophagus clarus* e encapsulamento. a) decantação e peneiramento úmido; b) centrifugação das amostras; c) esporos viáveis para separação e d) esporos encapsulados em solução de CaCl_2 .



Fonte: Autoria própria (2024).

Etapa III - Potencial de esporos em esferas em combinação com fertilizante superfosfato triplo.

O experimento foi realizado para avaliar o potencial de esporos em esferas, em combinação com o fertilizante superfosfato triplo, utilizando apenas uma dose da adubação fosfatada, ou seja, 50% da dose indicada para a cultura do milho. O Neossolo foi coletado de barranco na camada 0 - 0,20 m, na FEPE, UNESP, Campus de Ilha Solteira e, devido às suas características química antes da montagem do experimento (Tabela 1), foi necessária a correção com 3,95 g de calcário.

Tabela 1. Atributos químicos do solo arenoso (neossolo) na camada superficial (0,0 – 0,2 m), utilizando metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Atributos	Unidade		Atributos	Unidade	
P-resina	mg dm ⁻³	2	B	mg dm ⁻³	0,06
S-SO ₄	mg dm ⁻³	9	Cu	mg dm ⁻³	0,9
MO	g dm ⁻³	13	Fe	mg dm ⁻³	14
pH(CaCl ₂)	-	5,7	Mn	mg dm ⁻³	10,9
K	mmol _c dm ⁻³	0,5	Zn	mg dm ⁻³	0,1
Ca	mmol _c dm ⁻³	14	CTC	mmol _c dm ⁻³	39,5
Mg	mmol _c dm ⁻³	10	V	%	62

B = boro determinado em água quente; o Cu= cobre, Fe = ferro, Mn = manganês e Zn = zinco foram determinados em DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético), CTC: capacidade de troca de cátions; V (%): saturação por base, MO: matéria orgânica.

Foram 9 repetições por tratamento, totalizando 72 vasos, os quais foram devidamente desinfetados com hipoclorito a 10% e preenchidos com neossolo e areia na proporção (2:1). A semeadura consistiu na deposição de quatro sementes de milho Ag 7098 por vaso, um híbrido simples e precoce. O experimento foi estruturado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, composto por 4 tratamentos de inoculação (0, 10 e 20 esferas, com aproximadamente 2 esporos por esferas e o controle com 50 g de inóculo FMA com aproximadamente 39 esporos), e 2 níveis de adubação fosfatada, metade do experimento sem adição e a outra metade com 0,1 g de superfosfato triplo (P50) incorporado ao solo, conforme recomendações de Cantarella et al. (2022) do Boletim 100.

Após 40 dias foi realizado a análise de clorofila foliar utilizando um clorofilômetro ClorofiLOG da FALKER (Figura 3).

Figura 3. Experimento da avaliação do potencial, análise de clorofila foliar, colonização radicular das plantas de milho e análise de multiplicação de esporos, sendo a) análise de

clorofila foliar com o ClorofiLOG da FALKER nas plantas de milho após 40 dias de semeadura, b) fragmento de raiz colonizada; c) quantificação de esporos com microscópio ótico.



Fonte: Autoria própria (2024)

Aos 45 dias após a semeadura, antes da desmontagem do experimento, foram contabilizadas o número total de folhas (NF), além de mensurados com auxílio de uma trena o comprimento do sistema radicular (CR), a altura da parte aérea (ALT) e o diâmetro do coleto (DC). A parte aérea foi colocada em saco de papel e submetida à secagem em estufa à 56 °C por 4 dias até estabilização, para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA).

Após essas avaliações, as folhas das plantas foram agrupadas em amostra compostas por três repetições dentro de cada tratamento para análise foliar. Da mesma forma o solo foi disposto em porções de 50 g de cada uma das três repetições para análise de fertilidade, o que resultou de ambas as análises 3 amostras por tratamento, cada uma composta de 3 repetições, sendo 24 amostras cada análise.

Para a análise da colonização radicular por FMA, as raízes foram lavadas em água corrente e submetidas ao clareamento do tecido, seguido da coloração das estruturas fúngicas, sempre em banho-maria a 90°C, como segue: KOH 10% por 30 minutos, novamente lavadas e imersas em HCl por 20 minutos. Após descartar o HCl, foi adicionado azul de metileno por 7

minutos. As raízes foram lavadas novamente e armazenadas em lactoglicerol para conservação. A avaliação da colonização seguiu metodologia proposta por Phillips e Hayman (1970). Como mostrado um pouco do processo na Figura 2, seguimentos de raiz foram transferidos para a superfície de lâminas de vidro para microscopia ótica, totalizando 10 seguimento e 100 pontos de avaliação, com intervalos de 1 cm de distância, por repetição, por tratamento.

Por fim para quantificar os esporos viáveis de FMA foi seguida a mesma metodologia descrita anteriormente de decantação e peneiramento úmido, seguida de centrifugação e flutuação por solução de sacarose.

3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Utilizando o programa AgroStat, os dados foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), e nos casos em que o teste F for significativo, Scott-Knott a 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Houve aumento no número de folhas (NF) e no comprimento das raízes (CR) do milho com a adubação fosfatada, em comparação ao controle (sem adubação com P) (Tabela 2). A adubação com P melhora o crescimento vegetativo do milho, pois o fósforo participa da síntese de ATP, DNA e RNA, essenciais para divisão celular e crescimento (Margenot et al., 2024). Avaliando o crescimento inicial do milho sob doses de fosfato, Vitorino et al. (2020) demonstraram que a planta respondeu a aplicação de 200 mg dm^{-3} de P (via fosfito), incrementando sua produção de biomassa seca aos 45 dias após a germinação de sementes. Neste estudo, resultados semelhantes foram observados com a aplicação de 50% da adubação fosfatada recomendada para a cultura, fornecida via superfosfato triplo, exemplificando a importância desse nutriente no crescimento inicial do milho.

Estudos corroboram com os resultados mostrando que a aplicação de superfosfato triplo favorece o crescimento radicular, ampliando a área de absorção e aumentando a eficiência na captação de nutrientes. Esse sistema radicular mais vigoroso contribui para a maior absorção de água e nutrientes, refletindo em folhas mais saudáveis e com maior teor de elementos essenciais ao desenvolvimento da cultura. Além disso, evidências apontam que a aplicação de superfosfato triplo em doses próximas a 50% da recomendação, é suficiente para garantir o desenvolvimento inicial e a produtividade satisfatória, favorecendo a formação radicular e o

vigor das plantas, especialmente em solos com baixa disponibilidade de fósforo (Revista FT, 2021; Embrapa, 2022).

Tabela 2. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) para massa seca da parte aérea (MSPA), altura de plantas (ALT), número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DC), comprimento de raízes (CR), teor relativo de clorofila (SPAD), colonização radicular por fungo micorrízico arbuscular (FMA) e número de esporos de FMA (NESP) em plântulas de milho cultivadas em vasos, para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), aos 45 dias após a germinação.

Tratamentos	MSPA g	ALT cm	NF -	DC mm	CR cm	SPAD -	FMA %	NESP 50g-solo
Inoculação (Inoc)								
Controle	1,36 b	52,58 a	6,83 a	0,27 a	31,27 a	20,70 a	1,44 d	2,33 c
10 Esferas	1,30 b	50,33 b	7,33 a	0,31 a	32,22 a	21,43 a	8,00 c	18,22 a
20 Esferas	1,70 a	53,75 a	7,33 a	0,30 a	30,00 a	20,42 a	17,88 a	16,50 a
Solo-Inóculo	1,21 b	49,72 b	7,16 a	0,20 b	32,44 a	17,92 a	11,22 b	11,83 b
Fósforo (P)								
Sem P	0,87 b	46,94 b	6,72 b	0,18 b	23,88 b	21,45 a	4,88 b	16,19 a
Com P	1,91 a	56,25 a	7,61 a	0,35 a	39,08 a	18,81 b	14,38 a	8,25 b
Valores de F								
Inoc	6,25**	3,08*	1,26 ^{NS}	7,65**	0,27 ^{NS}	2,40 ^{NS}	81,50**	97,15**
P	144,16**	74,65**	17,89**	86,87**	50,68**	7,11**	157,16**	120,82**
Inoc x P	7,91**	3,59*	0,79 ^{NS}	3,04*	2,56 ^{NS}	0,37 ^{NS}	10,94**	27,59**
Média Geral	1,39	51,59	7,16	0,27	31,48	20,13	9,63	12,2
CV (%)	26,32	8,85	12,44	28,79	28,76	20,91	33,35	25,08

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, ** e *: significativos a 1 e 5%, respectivamente, NS: não significativo.

Na análise de interação (Tabela 3), a combinação de 20 esferas + fertilização com fósforo teve um valor mais alto que diverge significativamente para massa seca da parte aérea, altura da planta e colonização por FMA, e resultados adequados semelhantes para o diâmetro do coleto em plantas fertilizadas com P associadas a tratamentos inoculados com 10 e 20 esferas, indicando que P + inóculo encapsulado favoreceu o crescimento e vigor das mudas onde a proteção do inóculo permitiu uma associação estável com as raízes. Esses resultados concordam com os mostrados por Lima (2020), que indicou a presença de FMA para efeito de absorção eficiente de fósforo, mesmo em solos com grande capacidade de fixação de nutrientes. A contribuição das hifas extrarradiculares foi, portanto, fundamental para aumentar a zona de absorção, o que é imperativo para utilizar o P inacessível às raízes.

Em relação ao número de esporos de FMA, ocorreu uma diminuição quando eles foram encapsulados e associados ao P; a encapsulação pode proteger os esporos, mas a liberação e germinação podem ser afetadas por ambos os parâmetros (Berruti et al., 2016).

Tabela 3. Interações significativas para os fatores Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus claurus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), para massa seca da parte aérea, altura de plantas, diâmetro do coleto, colonização radicular por FMA e número de esporos de FMA em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação.

Tratamentos	0 Esferas	10 Esferas	20 Esferas	Solo-Inóculo
Fósforo	Massa seca da parte aérea (g)			
Sem Fósforo	0,76 bA	0,80 bA	0,92 bA	1,01 bA
Com Fósforo	1,95 aB	1,80 aB	2,48 aA	1,41 aC
	Altura de plantas (cm)			
Sem Fósforo	46,16 bA	45,33 bA	48,27 bA	48,00 aA
Com Fósforo	59,00 aA	55,33 aB	59,22 aA	51,44 aB
	Diâmetro do coleto (cm)			
Sem Fósforo	0,21 bA	0,20 bA	0,18 bA	0,14 bA
Com Fósforo	0,33 aB	0,42 aA	0,42 aA	0,25 aB
	Colonização radicular por FMA (%)			
Sem Fósforo	0,11 bC	3,11 bC	10,55 bA	5,77 bB
Com Fósforo	2,77 aD	12,88 aC	25,22 aA	16,66 aB
	Número de esporos de FMA (x 100 g solo)			
Sem Fósforo	1,11 aD	26,11 aA	21,33 aB	16,22 aC
Com Fósforo	3,55 aC	10,33 bA	11,66 bA	7,44 bB

Médias seguidas da mesma letra minúsculas na linha e maiúscula na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A análise da fertilidade do solo mostrou que os níveis de fósforo no solo foram maiores nos tratamentos com adição de P (9,08 mg kg⁻¹) em comparação aos sem adição de P (4,33 mg kg⁻¹). No entanto, outros parâmetros não foram significativamente afetados (Tabela 4), permitindo inferir que os efeitos positivos no crescimento e desenvolvimento das mudas seriam principalmente devido ao aumento da relação biológica planta-microrganismos, mas não favorecendo a modificação das propriedades do solo. Esse resultado é consistente com a natureza biotrófica de *Rh. clarus* que, como as outras espécies de FMA, permite aumentar a eficiência da absorção de P sem necessariamente afetar os níveis desse nutriente disponível no solo (Lima, 2020).

Tabela 4. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) da fertilidade do solo para Fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), pH, acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V), para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação.

Tratamentos	P mg kg ⁻¹	MO g kg ⁻¹	pH CaCl ₂	H+Al ———— mmolc kg ⁻¹ ————	SB mmolc kg ⁻¹	CTC	V %
Inóculo (Inoc)							
Controle	7,33 a	11,83 a	7,00 a	8,00 a	48,38 a	56,38 a	85,16 a
10 Esferas	6,16 a	11,50 a	7,01 a	8,00 a	43,55 a	51,55 a	84,00 a
20 Esferas	7,16 a	11,83 a	6,98 a	8,16 a	44,36 a	52,53 a	84,33 a
Solo-Inóculo	6,16 a	11,50 a	7,01 a	8,00 a	44,05 a	52,05 a	84,50 a
Fósforo (P)							
Sem P	4,33 b	11,58 a	6,97 a	8,08	43,27 a	51,35 a	83,83 a
Com P	9,08 a	11,75 a	7,03 a	8,00	46,90 a	54,90 a	85,16 a
Valores de F							
Inoc	1,46 ^{NS}	0,41 ^{NS}	0,09 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,51 ^{NS}	0,24 ^{NS}
P	83,31 ^{**}	0,31 ^{NS}	1,20 ^{NS}	1,00 ^{NS}	1,37 ^{NS}	1,32 ^{NS}	1,79 ^{NS}
Inoc x P	1,32 ^{NS}	1,13 ^{NS}	1,39 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,93 ^{NS}	0,96 ^{NS}	0,88 ^{NS}
Média Geral	6,70	11,66	7,00	8,04	45,08	53,12	84,50
CV (%)	19,00	6,30	1,86	2,53	16,80	14,21	2,88

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, ** e *: significativos a 1 e 5%, respectivamente, NS: não significativo.

No que diz respeito à nutrição mineral, é possível observar na Tabela 5 que a adição de P estimulou um acúmulo maior de P nos tecidos, mas reduziu a concentração de N, apontando para o efeito de diluição, uma vez que, como o crescimento vegetativo foi melhor induzido devido à presença de P, aumentando a demanda conjunta por N. Isso também pode ser relatado

na meta-análise global de El-Sabaar e Bai (2020), onde houve maior produtividade primária quando N e P foram fornecidos juntos, superando apenas o efeito isolado de cada nutriente. Esse sinergismo deve-se ao fato de que ambos os nutrientes se complementam nos processos metabólicos, crescimento das raízes e absorção de nutrientes, proporcionando condições para um maior uso de N quando P está disponível (El-Sabaar; Bai, 2020). O P está envolvido no desenvolvimento do sistema radicular e na fisiologia do metabolismo do P em plantas, incluindo a absorção (Tabela 1), translocação e assimilação de microelementos, por exemplo, Mg, Fe, Mn. O magnésio é necessário para a formação da clorofila e importantes reações de energia, enquanto o ferro e o manganês, sendo relativamente imóveis no solo, requerem um sistema radicular ativo para absorção efetiva. O fornecimento de P predispõe tanto o desenvolvimento das raízes quanto o acúmulo na planta desses nutrientes, melhorando o desempenho fisiológico e produtivo (Silva; Berti, 2022).

Em contrapartida adubação fosfatada pode comprometer a disponibilidade e absorção do zinco pelas plantas, devido à formação de compostos insolúveis de fosfato de zinco no solo e ao desequilíbrio metabólico na relação fósforo/zinco (P/Zn) (Souza et al., 2021). Para os autores, esse antagonismo nutricional pode induzir sintomas de deficiência de zinco, mesmo em solos com teores adequados do micronutriente, prejudicando o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Portanto, a adubação sustentável em milho deve considerar não apenas o fornecimento equilibrado de fósforo, mas também a suplementação adequada de zinco, a fim de evitar desequilíbrios nutricionais e garantir o desempenho produtivo da cultura.

Tabela 5. Médias, valores de F e coeficientes de variação (CV) da análise foliar em plântulas de milho cultivadas em vasos para nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), para os fatores: Inóculo, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
Inóculo (I)											
Controle	17,41 a	1,05 a	22,48 a	4,66 b	5,18 a	1,80 a	72,16 a	8,66 a	214,26 a	42,00 a	8,66 a
10 Esferas	16,46 a	1,28 a	20,81 a	3,36 b	4,83 a	1,76 a	46,83 b	8,66 a	151,00 b	40,83 a	6,83 a
20 Esferas	15,48 a	0,98 a	20,35 a	4,16 b	5,06 a	1,65 a	53,66 b	6,50 b	123,83 b	33,33 b	6,33 a
Solo-Inóculo	14,51 a	1,13 a	22,35 a	5,80 a	5,30 a	1,60 a	52,33 b	6,33 a	132,66 b	30,16 b	6,83 a
Fósforo (P)											
Sem P	18,46 a	0,73 b	22,05 a	3,65 b	4,67 b	1,67 a	43,91 b	7,50 a	132,85 b	31,75 b	8,75 a
Com P	13,47 b	1,49 a	20,94 a	5,35 a	5,51 a	1,73 a	68,58 a	7,58 a	178,02 a	41,41 a	5,58 b
Valores de F											
I	2,23 ^{NS}	1,36 ^{NS}	0,48 ^{NS}	6,49 ^{**}	0,59 ^{NS}	1,26 ^{NS}	4,91 [*]	2,94 ^{NS}	13,73 ^{**}	4,04 [*]	1,52 ^{NS}
P	35,57 ^{**}	46,79 ^{**}	0,51 ^{NS}	18,07 ^{**}	10,59 ^{**}	0,48 ^{NS}	24,61 ^{**}	0,01 ^{NS}	16,82 ^{**}	11,41 ^{**}	14,44 ^{**}
I x P	1,40 ^{NS}	0,43 ^{NS}	1,50 ^{NS}	3,49 ^{**}	0,67 ^{NS}	0,85 ^{NS}	4,56 [*]	0,98 ^{NS}	0,91 ^{NS}	1,14 ^{NS}	1,56 ^{NS}
Média Geral	15,97	1,11	21,50	4,50	5,09	1,70	56,25	7,54	155,44	36,58	7,16
CV (%)	12,83	24,41	17,76	21,76	12,43	12,09	21,65	24,65	17,35	19,15	28,48

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, ** e *: significativos a 1 e 5%, respectivamente, NS: não significativo. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Dunnett a 5% de probabilidade.

No tratamento com P, os teores de Ca e B aumentaram, Ca com destaque para o solo-inóculo, o qual foi mais expressivo, indicando maior eficiência desse método na absorção desse nutriente, já o boro os teores aumentaram em quase todos os tratamentos, exceto com 10 esferas (Tabela 6). Estimulando o crescimento das raízes e a atividade microbiana no solo, o P também é benéfico na promoção da mobilização e absorção de B e Ca do solo pelas plantas, assim como, possivelmente, aumentos no pH do solo, o que torna esses nutrientes mais solúveis (Zhao et al., 2021; Irfan et al., 2019), portanto, aumentando sua disponibilidade para absorção pode finalmente ter um efeito positivo na eficiência de uso de P, B e Ca pela planta.

Tabela 6. Interações significativas para os fatores: Esferas de alginato, contendo esporos de *Rhizophagus clarus* (Controle: sem esporos, 10 esferas, 20 esferas, Solo-inóculo) e adubação com P (com ou sem), para o teor nutricional de cálcio e boro em plântulas de milho, em plântulas de milho cultivadas em vasos, aos 45 dias após a germinação.

Tratamentos	Controle	10 Esferas	20 Esferas	Solo-Inóculo
Fósforo	Cálcio (g kg⁻¹)			
Sem Fósforo	3,93 aA	3,10 aA	3,70 aA	3,86 bA
Com Fósforo	5,40 aB	3,63 aB	4,63 aB	7,73 aA
	Boro (mg kg⁻¹)			
Sem Fósforo	44,33 bA	43,00 aA	45,66 bA	42,66 bA
Com Fósforo	100,00 aA	50,66 aB	61,66 aA	62,00 aA

Médias seguidas da mesma letra minúsculas na linha e maiúscula na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se com base nos resultados obtidos, que o encapsulamento dos esporos de *Rh. clarus* em esferas de alginato associado a adubação fosfatada e ao desenvolvimento inicial de plantas de milho em vasos foi efetivo para manter a viabilidade dos propágulos, permitindo sua aplicação no solo sem prejuízo às características estruturais e fisiológicas do fungo.

Os dados mostraram que as plantas inoculadas apresentaram desenvolvimento superior, especialmente no crescimento radicular, indicando que o fungo encapsulado foi capaz de colonizar as raízes e exercer seus efeitos benéficos, representando uma estratégia viável e sustentável para melhorar o desenvolvimento das plantas, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes em solos do Cerrado.

REFERÊNCIAS

- ALAMNIE, A. D. et al. Effects of long-term mineral fertilization on silage maize monoculture yield, phosphorus uptake and its dynamic in soil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 280, p. e108476, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108476>
- ALEIXO, S. et al. Can soil phosphorus availability in tropical forest systems be increased by nitrogen-fixing leguminous trees? **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 712, p. e136405, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136405>
- ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature Communications**, Belin, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
- ALOVISI, A. M. T. et al. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brasil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 22, p. e00298, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>
- ALVES, L. R. et al. A utilização de óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretano: uma revisão. **Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 99-118, 2021. <https://doi.org/10.37779/nt.v22i1.3711>
- AMADO, L. R. **Filmes à base de proteína isolada de soja e alginato de sódio – Aspectos das misturas de biopolímeros, propriedades dos filmes e efeitos de extrato de beldroega nos filmes**. 2022. 194 f Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto.
- BERRUTI, A.; LUMINI, E.; BALESTRINI, R.; BIANCIOTTO, V. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 6, p. e1559, 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- BRASIL. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Cerrado**. Brasília, DF: ICMBio, 2024.

BULUT, E. Flurbiprofen-loaded interpenetrating polymer network beads based on alginate, polyvinyl alcohol and methylcellulose: design, characterization and *in vitro* evaluation. **Journal of Biomaterials Science**. Polymer edition, Oxon, v. 31, n. 13, p. 1671-1688, 2020. <https://doi.org/10.1080/09205063.2020.1769800>

CABALLERO, E.; DURANGO, E. M. P.; PÉREZ-POLO, D. J. Nutritional content of pastures with phosphate fertilization in 2 calcareous soils. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 1, p. 87-95, 2023. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n110rc>

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; VAN RAIJ, B. (EDS.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2022. 500 p. (Boletim Técnico, 100).

CELESTINO, M. F.; OLIVEIRA, J. A. S. Métodos de encapsulamento de fungos entomopatogênicos para sua aplicação no controle biológico. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 16, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38031>.

COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. **Biodiversity and Conservation**, Dordrecht, v. 29, n. 5, p. 1465-1475, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01967-x>

COSTA, F. M. et al. Crescimento de milho crioulo cultivado com fungos micorrízicos arbusculares. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 13, n. 3, p. 983-1000, 2020. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n3p983-1000>

COSTA, F. S. F. **Desenvolvimento e avaliação de biofertilizantes à base de alginato de cálcio....** 2024. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

DELVIAN; RAMBEY, R. Effect of salinity on spore germination, hyphal length and root colonization of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, Cambridge, v.260, p.e012124, 2019. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012124>.

DIAS, F.C.; LOPES, H.S.S.; ZANUZO, M.R.; MACHADO, T.M. Aplicação de fontes

boratadas na culturas da soja e do milho no cerrado brasileiro em diferentes classes texturais de solo. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, v. 23, n. 5, e9790, 2025. <https://doi.org/10.55905/oelv23n5-010>.

EL-SABAAR, R.; BAI, E. Nitrogen and phosphorus co-limitation of grassland primary production: A global meta-analysis. *Ecology*, Hoboken, v. 101, n. 12, p. e03003, 2020.

SANTIAGO, F. L. A.; BARBOSA, M. V.; CARNEIRO, M. A. C.; SAGGIN JÚNIOR, O. J. **Adaptação de metodologia para criopreservação de esporos de fungos micorrízicos arbusculares**. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2020. 17 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 104).

LOPES, A. R. O.; LOCATELLI, G. O.; LOBO JÚNIOR, M.; MASCARIN, G. M.; LUNA-FINKLER, C. L. Obtenção de cápsulas de alginato contendo *Trichoderma asperellum* T356. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 22.; e ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 17. *Anais...* São Paulo. Embrapa Arroz & Feijão, 2018.

EMBRAPA. **Resposta do milho à adubação fosfatada**: eficiência de fontes e manejo de doses. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2022.

GERDEMANN, J.W.; NICOLSON, T.H. Spores of micorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transaction of British Mycology Society*, v. 46, p. 234-244, 1963. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

GOMES JÚNIOR, G. A. et al. Absorption of nutrients by soursop seedlings in response to mycorrhizal inoculation and addition of organic compost. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 48, n.3, p. 287-294, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4852302>

GONÇALVES, M. V. M. et al. **Fertirrigação de milho (*Zea mays* L.) com água residuária de suinocultura e piscicultura**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal Goiano, Rio Verde.

IRFAN, M.; ABBAS, M.; SHAH, J. A.; et al. Interactive effect of phosphorus and boron on plant growth, nutrient accumulation and grain yield of wheat grown on calcareous soil.

Eurasian Journal of Soil Science, v. 8, n. 1, p. 17-26, 2019.
<https://doi.org/10.18393/ejss.484654>

JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 73, p. 288-300, 1964.

JÚNIOR, J. J. A. et al. Fosfato natural reativo como remineralizador de solo utilizado na cultura da soja na região de Cerrado. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 472-485, 2022.
<https://doi.org/10.53660/CONJ-1288-X56>

LAMBERS, H. Phosphorus acquisition and utilization in plants. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 73, p. 17-42, 2022. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>.

LIDOY, J.; BERRIO, E.; GARCÍA, M.; LUQUE, L.E.; POZO, M.J.; LÓPEZ-RÁEZ, J.A. Flavonoids promote *Rhizophagus irregularis* spore germination and tomato root colonization: A target for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, p. e1094194, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094194>

LIMA, R. L. F. de A. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, n. 3, p. 1062-1079, 2020.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1062-1079>

MACHADO, A.R.; SILVA, P.M.P.; VICENTE, A.A.; SOARES, L.A.S.; PINHEIRO, A.C.; CERQUEIRA, M.A. Alginate particles for encapsulation of phenolic extract from *Spirulina* sp. LEB-18: Physicochemical characterization and assessment of *in vitro* gastrointestinal behavior. **Polymers**, Basel, v. 14, p. e4759, 2022.
<https://doi.org/10.3390/polym14214759>

MACIEL, L. M.; DE TUNES, L. V. M. A importância do controle de qualidade nas sementes de milho. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 5, p. 49934-49938, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30011>

MARGENOT, A. J.; SILVA, M. J.; LIMA, R. S.; et al. Physiological mechanisms of phosphorus nutrition in maize: impacts on leaf development and shoot elongation.. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Cham, v. 187, n. 3, p. 345-360, 2024.

MILIC, S. et al. Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experiment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 339, p. 9-19, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.017>

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 276-374.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. Preventing, halting and reversing loss of nature, 2021. Disponível em: <https://www.decadeonrestoration.org>. Acesso em: 13 out 2024.

PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedures for clearing roots for rapid assessment of infection. **Transaction of British Mycology Society**, v. 55, p. 158-161, 1970. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

PINTO, L. A. S. R. et al. Extração e quantificação das frações de fósforo orgânico no solo. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 6, p. 34260-34278, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-102>

RADI, A. J. et al. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* on tomato promotes increasing yield under organic farming inputs. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 54, n. 12, e20220585, 2024. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2022058>

RANIRO, H.R.; TELES, A.P.B.; ADAM, C.; PAVINATO, P.S. Phosphorus solubility and dynamics in a tropical soil under sources derived from wastewater and sewage sludge. **Journal of Environmental Management**, London, v. 302, p. e113984, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113984>

MEDEIROS, K. de A.; ROLIM, M. de O. P.; ANTONINO, R. S. C. M. de Q.; SILVA, D. T. C. da; MENDONÇA JÚNIOR, F. J. B.; SILVA, J. A. da; DAMASCENO, B. P. G. de L.. Development of alginate granules for thiophenic derivative 5CN06 delivery by ionotropic gelation. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 14, p. e26111435898, out. 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.35898>.

REVISTA FT. Adubação fosfatada no milho: eficiência do superfosfato triplo em doses reduzidas. Revista FT, São Paulo, 2021.

SALAMA, D. M. et al. Effect of foliar application of phosphorus nanoparticles on the performance and sustainable agriculture of sweet corn. **Plant Physiology and Biochemistry**, Moulineaux, v. 203, p. e108058, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108058>

SALGADO, F. H. M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and mycorrhizal stimulant affect dry matter and nutrient accumulation in bean and soybean plants. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 46, n. 4, p. 367-373, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4640282>

ŞANLI, O., BICER, E., ISIKLAN, N. *In vitro* release study of diltiazem hydrochloride from poly (vinyl pyrrolidone)/sodium alginate blend microspheres. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 107, n. 3, p. 1973-1980, 2008. <https://doi.org/10.1002/app.27168>

SANTOS, G. A. S. **Análise da incorporação de microfibras do endocarpo *Euterpe edulis* Mart. em biopolímeros de alginato de sódio e mesocarpo de *Attalea speciosa* Mart.: estudo das propriedades físico-químicas, mecânicas e termodinâmicas.** 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Maranhão, Engenharia Química.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 6. ed. Brasília: Embrapa, 2023.

SILVA, L. M.; BERTI, M. P. S. Manganês no solo e nas plantas: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 3, p. 21-25, 2022. <https://doi.org/10.36560/15320221512>

SILVA, C. G. S.; SILVA, M. E. C. M. Levantamento bibliográfico sobre a associação de rizóbios e fungos micorrízicos arbusculares em *Vigna unguiculata* L. Walp. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 13, e297111335412, 2022a. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35412>

SILVA, P. S. T. et al. *Azospirillum brasilense* and zinc rates effect on fungal root colonization and yield of wheat-maize in tropical savannah conditions. **Plants**, Basel, v. 11, p. e3154, 2022b. <https://doi.org/10.3390/plants11223154>

SILVA, M. C. da; SILVA, L. R. da; ALVES, H. G. F.; JESUS, É. V. O.; SILVA, P. C. V. da; SANTOS, T. M. C. dos. Imobilização de *Trichoderma* spp. em alginato e viabilidade sob diferentes condições de armazenamento. **Diversitas Journal**, v. 9, n. 1, p. 183–191, 2024. <https://doi.org/10.48017/dj.v9i1.2848>.

SINGH, B. K. et al. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. **Nature Reviews Microbiology**, Berlin, v. 8, p. 779-790, 2010. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2439>.

SOARES, H. V. A. **Caracterização de biopolímeros de alginato de sódio plastificados com glicerol e sorbitol com dupla reticulação utilizando cloreto de cálcio**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Maranhão.

SOU AGRO. Milho se torna pilar estratégico do agronegócio. *Sou Agro*, 2025. Disponível em: <https://souagro.net/noticia/2025/01/milho-se-torna-pilar-estrategico-do-agronegocio/>.

SOUSA, S. M. et al. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 40, p. 867-877, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10146-9>

SOUZA, M. A. et al. Interação entre fósforo e zinco na nutrição do milho: implicações para manejo da adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, 2021.

STORER, K. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi reduce nitrous oxide emissions from N₂O hotspot. **New Phytologist**, Hoboken, v. 220, p. 1285-1295, 2017.

STÜRMER, S. L. et al. Synonymization of three species of *Rhizophagus*. **Mycorrhiza**, New York, v. 35, n. 2, p. 16, 2025.

SULIEMAN, S.; MÜHLING, K. H. Utilization of soil organic phosphorus as a strategic approach for sustainable agriculture. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 184, p. 311-319, 2021. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100057>.

TANUMIHARDJO, S. A. et al. Maize agro-food systems to ensure food and nutrition security in reference to the Sustainable Development Goals. **Global Food Security-Agriculture Policy Economics and Environment**, Amsterdam, v. 25, p. e100327, 2020.

TAVARES, D. S.; SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; GOMES, M. P. Unleashing the power of fungi: Utilizing the Arbuscular Mycorrhizal Fungi *Rhizophagus clarus* to Mitigate Salinity Stress and Boost Cowpea Bean Productivity for Food Security. **Stresses**, v. 4, n. 2, p. 393-410, 2024. <https://doi.org/10.3390/stresses4020026>

ULLAH, J. et al. Combined Di-Ammonium Phosphate and Straw Return Increase Yield in Sweet Corn. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1-18, 2023.

USDA. Production, Supply and Distribution (PSD) online. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>. Acesso em: 15 mar. 2024.

VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30-35, 2021.

VITORINO, P. J. P.; SANTOS, E. da N.; ROCHA, J. L. A.; MARCELINO, R. M. O. da S.; SANTOS, L. C. dos. Crescimento e acúmulo de fósforo em milho sob doses de fosfato radicular e fosfito via foliar. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 5, e76953120, 2020.

WANG, Y.; CHEN, Y. F.; WU, W. H. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, Hoboken, v. 63, p. 34-52, 2021. <https://doi.org/10.1111/jipb.13053>.

ZHAO, L.; LI, J.; LI, X.; et al. Effect of balanced application of boron and phosphorus fertilizers on soil bacterial community, seed yield and phosphorus use efficiency of *Brassica napus*. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 751, p. 141644, 2021.