

UniRV - UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS
MINERAIS E ORGANOMINERAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA E
MILHO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO**

MARIANA CLEMENTE ANDRADE

Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2026

MARIANA CLEMENTE ANDRADE

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS MINERAIS E
ORGANOMINERAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA E MILHO EM LATOSSOLO
VERMELHO DISTROFÉRICO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de
Rio Verde, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

**RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2026**

Universidade de Rio Verde
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

A568e Andrade, Mariana Clemente

Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados minerais e organominerais na produção de soja e milho em latossolo vermelho distroférico. / Mariana Clemente Andrade. — 2026.

79 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius de Melo Benites.

Coorientadora: Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes.

Coorientador: Dr. Ricardo de Castro Dias.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, 2026.

Inclui índice de tabelas e figuras.

1. Fósforo. 2. Fertilidade do solo. 3. Nutrição vegetal. 4. *Glycine max* L. 5. *Zea mays*. I. Benites, Vinicius de Melo. II. Menezes, June Faria Scherrer. III. Dias, Ricardo de Castro. IV. Título.

CDD: 631.85

Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

MARIANA CLEMENTE ANDRADE

“EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS MINERAIS E ORGANOMINERAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA E MILHO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO”

Dissertação apresentada à UniRV - Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 27 de fevereiro de 2026



Prof. Dr. Vinicius de Melo Benites
Presidente da Banca Examinadora
PPGPV - UniRV

Documento assinado digitalmente
gov.br MILTON FERREIRA DE MORAES
Data: 03/03/2026 17:44:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes
Membro externo - UFMT

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO FERNANDES BOLDRIN
Data: 04/03/2026 22:32:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin
Membro - PPGPV/UniRV

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANA SILVA RODRIGUES CABRAL
Data: 10/03/2026 09:27:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Juliana Silva Rodrigues Cabral
Membro - PPGPV/UniRV

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar-me sempre durante a vida e iluminar-me nesta trajetória de estudos.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional, carinho e incentivo constante, indispensáveis à minha vida e à conclusão desta jornada do mestrado.

Ao meu orientador pesquisador da Embrapa Solos, Prof. Dr. Vinicius de Melo Benites, pela idealização do projeto, pela oportunidade de desenvolver ciência, de gerar e explorar conhecimentos, por todo o apoio e valiosos ensinamentos.

Aos meus coorientadores Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes, por todo o auxílio, motivação, e aprendizado recebidos, e ao Dr. Ricardo de Castro Dias, pelo suporte e tempo dedicado às contribuições durante a execução deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da UniRV, pelos conhecimentos compartilhados.

Aos estudantes, que contribuíram com a coleta de dados nos ensaios e análises, em especial à Sarah Ferrari Marin e Murilo Silva Martins.

Aos servidores do Laboratório de Manejo de Solo e Produção Vegetal da UniRV, pelo auxílio na condução de análises.

Aos colegas, pelo companheirismo durante o curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da UniRV, pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pelo apoio técnico, pelos recursos concedidos, disponibilização de materiais e realização de análises laboratoriais que viabilizaram esta pesquisa (Projeto Fertilize4Life).

Ao Instituto de Ciências Alimentares e Agrícolas da Universidade da Flórida (UF/IFAS) e ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), pela parceria, financiamento e viabilização da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMO GERAL.....	viii
GENERAL ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	2
CAPÍTULO 1 - EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOLÚVEIS EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO EM CONDIÇÃO DE SUPERCALAGEM.....	4
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
1 INTRODUÇÃO.....	6
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1 Delineamento experimental.....	7
2.2 Análises estatísticas.....	10
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1 Modelos de resposta de biomassa e absorção de fósforo por soja e milho em função das doses de fósforo.....	11
3.2 Efeito da calagem e das fontes de fósforo sobre o solo.....	13
3.3 Produção de massa seca.....	13
3.4 Acúmulo de fósforo.....	16
3.5 Absorção de nutrientes.....	18
3.6 Análise discriminante canônica.....	20
3.7 Balanço de fósforo.....	21
4 CONCLUSÕES.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
CAPÍTULO 2. INFLUÊNCIA DA ACIDULAÇÃO E ADIÇÃO DE ENXOFRE ELEMENTAR SOBRE A EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS ORGANOMINERAIS A PARTIR DE CAMA DE AVIÁRIO.....	31
RESUMO.....	31

ABSTRACT.....	32
1 INTRODUÇÃO.....	33
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	34
2.1 Análises estatísticas.....	38
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
3.1 Biomassa e acúmulo de nutrientes em soja e milho.....	39
3.2 Fertilidade do solo após o experimento.....	48
3.3 Quantificação de genes associados à resistência a antibióticos e ciclagem de Fósforo e Nitrogênio em solo rizosférico de <i>Urochloa</i> ao final do experimento.....	50
4 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
ANEXOS.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico antes da aplicação de calcário.....	8
TABELA 2	Teores de macro e micronutrientes nas amostras de fertilizantes.....	9
TABELA 3	Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico utilizado no experimento após correção com calcário (1x e 10x a recomendação).....	13
TABELA 4	Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico.....	35
TABELA 5	Composição dos fertilizantes organominerais testados.....	35
TABELA 6	Teor de nutrientes e pH dos fertilizantes.....	36
TABELA 7	Propriedades químicas do solo antes da instalação do experimento, do tratamento controle sem adubação fosfatada, ao final do experimento, e dos tratamentos com adubação fosfatada.....	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Modelos da curva de resposta ao fósforo para as variáveis dependentes: (A) massa seca da parte aérea e (B) acúmulo de fósforo na parte aérea das culturas.....	12
FIGURA 2	Produção de massa seca da parte aérea (g), em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg ⁻¹), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada), em cultivo sucessivo de soja e milho.....	14
FIGURA 3	Acúmulo de P na parte aérea (mg) em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg ⁻¹), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada), em cultivo sucessivo de soja e milho.....	17
FIGURA 4	Acúmulo de nitrogênio (A), potássio (B), cálcio (C), magnésio (D) e enxofre (E) na parte aérea de soja e milho em função da aplicação de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP), sob duas condições de calagem (1× e 10× a dose recomendada).....	19
FIGURA 5	Acúmulo de zinco (A), manganês (B), cobre (C) e boro (D) na parte aérea de soja e milho em função da aplicação de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP), sob duas condições de calagem (1× e 10× a dose recomendada).....	19
FIGURA 6	Biplot da análise discriminante canônica mostrando escores de tratamento associados a fontes de fósforo, fosfato monoamônico (MAP) e triplo superfosfato (TSP), sob dois níveis de calagem (1× e 10× dose recomendada). Controle sem aplicação de fósforo (Cont) é demonstrado para ambas as condições de calagem. Setas representam cargas canônicas de variáveis de resposta da soja, incluindo massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn). Elipses indicam dispersão dos tratamentos, destacando a separação de grupos pela fonte de fertilização e nível de calagem.....	20
FIGURA 7	Recuperação de fósforo a partir da porcentagem de P exportado para as plantas (soma dos totais de soja e milho) em função das doses de P (mg) aplicadas por vaso.....	22

FIGURA 8	pH do solo após a realização do experimento, em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg ⁻¹), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada).....	24
FIGURA 9	Massa seca da parte aérea de soja (g) em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar.....	40
FIGURA 10	Massa seca da parte aérea de milho (g) em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar.....	42
FIGURA 11	Acúmulo de macronutrientes (mg) nas plantas de soja, em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT1(, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar.....	43
FIGURA 12	Acúmulo de micronutrientes (Zn, Mn, Cu, B) (mg) nas plantas de soja, em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar.....	45
FIGURA 13	Biplot da análise discriminante canônica mostrando escores de tratamento associados a diferentes fertilizantes organominerais e controle sem aplicação de fósforo (Cont). Setas representam cargas canônicas de variáveis de resposta da soja, incluindo massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Cu e Zn) ..	46

FIGURA 14	Teores de cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) no solo em função dos tratamentos, após a finalização do experimento.....	49
FIGURA 15	Abundância relativa do gene bacteriano <i>phoD</i> (fosfatase alcalina), <i>phoC</i> (fosfatase ácida) e <i>pqqC</i> (cofator para a produção de ácidos orgânicos) no solo rizosférico. Os valores representam o número de cópias do gene normalizadas (gene alvo/16S rRNA).....	51
FIGURA 16	Número de cópias normalizadas de genes microbianos envolvidos na oxidação da amônia, ammonia-oxidizing bacteria (AOB) e ammonia-oxidizing archaea (AOA), e dos genes associados à resistência a antibióticos, <i>tetA</i> e <i>tetW</i>	53

RESUMO GERAL

ANDRADE, Mariana Clemente, MSc. Universidade de Rio Verde – UniRV, fevereiro de 2026. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados minerais e organominerais na produção de soja e milho em Latossolo Vermelho distroférico.** Orientador: Prof. Dr. Vinicius de Melo Benites. Coorientadores: Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes; e Dr. Ricardo de Castro Dias.

A agricultura brasileira tem significativa dependência da importação de fertilizantes, o que reforça a necessidade do desenvolvimento de tecnologias, que otimizem o uso desses insumos e explorem fontes alternativas de nutrientes economicamente viáveis e acessíveis. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de fertilizantes organominerais (OMF), formulados a partir de fertilizantes minerais solúveis e cama de aviário, com diferentes níveis de acidulação ou com adição de enxofre elementar. Inicialmente, dada a importância da calagem na agricultura tropical e sua influência direta na eficiência de uso de alguns nutrientes, foi instalado experimento preliminar que avaliou a resposta ao fósforo (P) em dois níveis de calagem, a definição da melhor dose de P e o impacto da calagem excessiva sobre a eficiência de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP) em solo ácido do Cerrado. Cultivo sucessivo de soja e milho, com duração de 50 dias cada, foi realizado em vasos contendo 3 kg de solo seco. Os resultados permitiram identificar que o MAP teve mais impacto pela aplicação excessiva de calcário e o modelo estatístico quadrático com raiz quadrada foi o mais adequado para descrever a curva de resposta das culturas à fertilização fosfatada. A dose responsiva de P para a produção máxima de biomassa foi de 297 mg kg⁻¹, com o MAP, e a dose escolhida para ser utilizada no experimento subsequente foi a de 100 mg kg⁻¹. Em seguida, foi conduzido o experimento principal em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado com nove tratamentos: três OMF à base de MAP + cama de aviário, acidulados com 0, 0,971 e 2,428% de ácido sulfúrico; três OMF à base de TSP + cama de aviário, acidulados com 0, 1,457 e 3,885%; um OMF à base de TSP + cama de aviário + enxofre elementar (S⁰); um TSP puro; e um controle sem fósforo. As unidades experimentais consistiram em vasos plásticos com 3 kg de solo corrigido. Foi realizado o cultivo sucessivo de soja, milho e *Urochloa*, para avaliação do efeito residual dos fertilizantes a partir do segundo ciclo. A produção de massa seca e acúmulo de nutrientes foram determinados ao final de cada cultivo. Ao final do terceiro ciclo de cultivo, avaliou-se a fertilidade do solo e a microbiota da rizosfera de *Urochloa*. Os organominerais foram fontes eficientes de fósforo para o cultivo da soja, com resposta igual ou ligeiramente superior à do TSP, com destaque para os OMF enriquecidos com enxofre. Organominerais não afetaram a população de bactérias relacionadas à oxidação de amônia e resistência aos antibióticos testados, indicando serem fontes seguras para uso agrícola.

Palavras-chave: Fósforo, fertilidade do solo, nutrição vegetal, *Glycine max* L., *Zea mays*.

GENERAL ABSTRACT

ANDRADE, Mariana Clemente, MSc. University of Rio Verde – UniRV, February 2026. **Agronomic efficiency of mineral and organomineral phosphate fertilizers on Soybean and Maize production in Oxisol.** Adviser: Prof. Vinicius de Melo Benites, Ph.D. and Co-advisers: Prof. June Faria Scherrer Menezes, Ph.D. and Ricardo de Castro Dias, Ph.D.

Brazilian agriculture has a significant dependence on fertilizer imports, which reinforces the need to develop technologies that optimize the use of these inputs and explore alternative sources of economically viable and accessible nutrients. This study aimed to evaluate the efficiency of organomineral fertilizers (OMF), formulated from soluble mineral fertilizers and poultry litter, on dry matter production and nutrient accumulation in soybean and maize, as well as their residual effect on the soil and rhizosphere of *Urochloa*. Initially, given the importance of liming in tropical agriculture and its direct influence on the efficiency of use of some nutrients, a preliminary experiment was carried out to assess the response to phosphorus (P) under two liming levels, determine the optimal P dose and evaluate the impact of excessive liming on the efficiency of monoammonium phosphate (MAP) and triple superphosphate (TSP) in acidic Cerrado soil. Successive soybean and maize crops, each lasting 50 days, were grown in pots containing 3 kg of dry soil. The results allowed us to identify that excessive limestone application had more impact on MAP, and the quadratic statistical model with square root was the most appropriate to describe the response curve of crops to phosphate fertilization. The responsive P dose for maximum biomass production was 297 mg kg⁻¹, with MAP, and the dose selected for use in the subsequent experiment was 100 mg kg⁻¹. Subsequently, the main experiment was conducted in a greenhouse, in a completely randomized design with nine treatments: three OMF based on MAP + poultry litter, acidulated with 0, 0.971 and 2.428% sulfuric acid; three OMF based on TSP + poultry litter, acidulated with 0, 1.457 and 3.885%; a TSP-based OMF + poultry litter + elemental sulfur (S⁰); pure TSP; and a control without phosphorus. Experimental units consisted of plastic pots with 3 kg of amended soil. Two successive soybean and maize crops were conducted to evaluate the residual effect of fertilizers in the second cycle. Dry matter production and nutrient accumulation were determined at the end of each crop. At the end of the three cycles, soil fertility and the *Urochloa* rhizosphere microbiota were also evaluated. Organominerals were efficient phosphorus sources for soybean cultivation, with responses equal to or slightly superior to TSP, with emphasis on OMFs enriched with sulfur. The application of organomineral fertilizers did not alter the populations of ammonia-oxidizing bacteria nor the prevalence of antibiotic resistance, demonstrating their environmental safety for agricultural use.

Keywords: Phosphorus, soil fertility, plant nutrition, *Glycine max* L., *Zea mays*.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O agronegócio contribuiu, no ano de 2025, com aproximadamente 30% do produto interno bruto (PIB) brasileiro (CEPEA; CNA, 2025). Para alcançar este patamar, foram necessárias décadas de pesquisa para o desenvolvimento de técnicas e tecnologias que possibilitassem o cultivo em áreas de baixa fertilidade natural (Schaefer *et al.*, 2023). Dentre as técnicas, destaca-se a adubação que, ao longo dos anos, foi aprimorada de maneira regional com o desenvolvimento dos manuais de recomendação de adubação e calagem (Ribeiro *et al.*, 1999; Sousa; Lobato, 2004; BRASIL *et al.*, 2020).

Entretanto, a indústria brasileira de fertilizantes é pouco desenvolvida e a produção interna de fertilizantes atende menos de 20% da demanda nacional. As principais justificativas para tanto são a baixa qualidade e quantidade de matérias-primas, como apatitas de origem ígnea, e o alto custo de investimento em novas fábricas (Ogasawara *et al.*, 2010).

Com tudo isso, instituiu-se o Grupo de Trabalho Interministerial, com o intuito de desenvolver o Plano Nacional de Fertilizantes por meio do Decreto n. 10.991 de 2022, com alterações realizadas pelo Decreto n. 11.518, de 2023. O plano teve como objetivo fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e distribuição de fertilizantes no Brasil de maneira sustentável.

Os solos do Cerrado, em sua quase totalidade muito intemperizados, são caracterizados por sua acidez natural e baixa fertilidade, o que impõe a necessidade de correção e altas doses de fertilizantes, sobretudo fosfatados, para viabilizar a produção agrícola (Whiters *et al.*, 2018). Contudo, o uso continuado dessas práticas, muitas vezes em níveis superiores à demanda da cultura, resulta no acúmulo superficial de fósforo (P) (Pavinato *et al.*, 2020). Esse excedente potencializa o risco de contaminação de corpos hídricos, induzindo à eutrofização e degradando a qualidade das águas (Schoumans *et al.*, 2014). É salutar um manejo adequado do solo. Portanto, o cuidado em se fazer uma avaliação rigorosa sobre as quantidades necessárias de aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes fosfatados no solo tem benéficos reflexos econômicos e ambientais.

Vários fatores influenciam a eficiência da adubação fosfatada, incluindo: pH do solo, que afeta diretamente a solubilidade e disponibilidade de P; matéria orgânica, que pode aumentar a disponibilidade de P através da mineralização e redução da fixação; textura do solo, em que solos arenosos têm menor capacidade de fixar fósforo, enquanto solos argilosos tendem

a fixar mais; umidade do solo, necessária para a dissolução e difusão do fósforo; e tipos de fertilizantes (Sousa; Lobato, 2004).

A geração de novas tecnologias que possam potencializar a eficiência do uso de fósforo na agricultura, como os fertilizantes organominerais (OMF), contribui para a redução da necessidade de importações, se alinhando ao Plano Nacional de Fertilizantes, mas principalmente, faz o aproveitamento de resíduos orgânicos na agricultura, fornecendo uma destinação adequada a potenciais poluidores ambientais. Entretanto, é importante garantir a qualidade da matéria orgânica utilizada na fabricação dos OMF para evitar contaminantes, manter a saúde do solo e os nutrientes necessários para as plantas.

A hipótese deste trabalho foi que a utilização dos novos OMF, produzidos a partir de cama de aviário e componentes minerais (fosfato monoamônico – MAP ou superfosfato triplo – TSP), com ou sem adição de enxofre, propiciaram melhoria na eficiência do uso dos nutrientes, bem como foram capazes de reduzir a dependência de fontes minerais importadas enquanto mantêm ou elevam a produtividade de culturas.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de fertilizantes organominerais, produzidos com fertilizantes fosfatados minerais solúveis e cama de aviário, com diferentes níveis de acidulação ou com adição de enxofre elementar. Para tanto, primariamente, avaliou-se a influência da calagem excessiva sobre a adubação, com dois fertilizantes fosfatados solúveis na sucessão soja-milho, obtendo uma curva de resposta à aplicação de doses crescentes de P.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL, E.C.; CRAVO, M.S.; VIÉGAS, I.J.M. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2ª ed. Brasília: Embrapa, 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SDIC/MGI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA); CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **PIB do agronegócio brasileiro**: relatório trimestral – 1º trimestre de 2025. Piracicaba: CEPEA; Brasília: CNA, 2025. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br>. Acesso em: 10 nov. 2025.

OGASAWARA, E.; KULAIF, Y.; FERNANDES, F.R.C. A indústria brasileira de fertilizantes. In.: FERNANDES, R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. **Agrominerais para o Brasil**, 1ª ed, CETEM, 2010. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/904/1/cap2.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

PAVINATO, P. S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, art. 15615, 2020: Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>. Acesso em: 10 nov. 2025.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª ed. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

SCHAEFER, C.E. *et al.* Brief History of Brazilian Soil Science. in: SCHAEFER, C.E.G.R. (eds) **The Soils of Brazil. World Soils Book Series**. Springer, Cham. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_1. Acesso em: 10 nov. 2025.

SCHOUMANS, O. F. *et al.* Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review. **Science of the Total Environment**, v. 468-469, p. 1255-1266, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.061>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2ª ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

WITHERS, P. J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, art. 2537, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>. Acesso em: 10 nov. 2025.

CAPÍTULO 1

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOLÚVEIS EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO EM CONDIÇÃO DE SUPERCALAGEM

RESUMO

Na agricultura tropical, a calagem é prática amplamente adotada para a correção da acidez do solo. Entretanto, o equívoco em sua recomendação pode acarretar menor eficiência de uso de alguns nutrientes, dentre eles o fósforo (P). Objetivou-se com este trabalho avaliar os efeitos da calagem excessiva sobre a disponibilidade e aproveitamento de duas fontes solúveis de P, em cultivo sucessivo soja-milho, visando também identificar o efeito residual dos fertilizantes. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial triplo (2 x 2 x 4) + 2 tratamentos adicionais, e quatro repetições. Foram utilizadas duas doses de calcário (1 vez e 10 vezes a dose recomendada), duas fontes de P (monoamônio fosfato – MAP, e superfosfato triplo – TSP) em quatro doses (50, 100, 200, e 400 mg dm⁻³ de P), além de dois tratamentos-controle sem a aplicação de P, um para cada valor de pH. O cultivo sucessivo de soja e milho foi realizado em vasos contendo 3 kg de solo seco. Ao final de cada ciclo, com duração de 50 dias cada, as plantas foram coletadas e secas em estufa para a determinação da massa seca e acúmulo de nutrientes na parte aérea. Amostras de solo foram coletadas ao final do experimento para determinação do pH do solo. O MAP foi mais eficiente do que o TSP no crescimento inicial das plantas e foi mais impactado pela aplicação excessiva de calcário em relação à produção de biomassa e absorção de nutrientes. Os resultados também permitiram definir a dose de 100 mg kg⁻¹ de P como a ideal para ser aplicada ao Latossolo Vermelho distroférico utilizado, nas condições experimentais adotadas.

Palavra-Chave: Superfosfato triplo, monoamônio fosfato, pH do solo, fertilidade do solo.

AGRONOMIC EFFICIENCY OF SOLUBLE PHOSPHATE FERTILIZERS IN AN OXISOL UNDER OVERLIMING CONDITION

ABSTRACT

In tropical agriculture, liming is a widely adopted practice for correcting soil acidity. However, the mistake in its recommendation may lead to lower efficiency in the use of certain nutrients, including phosphorus (P). This study aimed to evaluate the effects of excessive liming on the availability and uptake of two soluble P sources across successive soybean-maize crops, while also assessing the residual effect of fertilizers. The experiment was conducted in a completely randomized design with a triple factorial scheme (2 x 2 x 4) plus two additional treatments, and four replications. Two lime doses were applied (1x and 10x the recommended rate) along with two P sources: monoammonium phosphate (MAP) and triple superphosphate (TSP). Each source was applied at four doses (50, 100, 200, and 400 mg dm⁻³ of P). Additionally, two control treatments without P were included, one for each pH value. The successive soybean and maize crops were carried out in pots containing 3 kg of air-dried soil under greenhouse conditions. At the end of each 50-day cycle, plants were harvested and oven-dried to determine dry mass and nutrient accumulation in the shoots. Soil samples were collected at the end of the experiment to determine soil pH. MAP was more efficient than TSP in early plant growth and was more impacted by excessive lime application in relation to biomass production and nutrient uptake. The results also allowed us to define the dose of 100 mg kg⁻¹ of P as the ideal dose to be applied to the Oxisol used, under the experimental conditions adopted.

Keyword: Triple superphosphate, monoammonium phosphate, soil pH, soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

O domínio fitogeográfico do Cerrado apresenta, em sua maior extensão, solos de baixa fertilidade natural, caracterizados pelos baixos teores de bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), elevada acidez, teores tóxicos de alumínio (Al^{3+}) e escassez de fósforo (P). Além disso, as argilas predominantes nestes solos são capazes de adsorver P em sua superfície, de maneira tão estável, que este elemento passa a se tornar menos disponível para as plantas (Alovisi *et al.*, 2020).

Para contornar as limitações químicas destes solos, práticas corretivas foram propostas e implementadas, ao longo dos anos, como é o caso da calagem. Os materiais empregados neste processo consistem, em sua maioria, de óxidos, carbonatos e silicatos de cálcio (Ca) e magnésio (Mg). A aplicação destes materiais pode diminuir a acidez do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, diminuir a adsorção específica de P pelas argilas e reduzir a solubilidade de Al e manganês (Mn) (Enesi *et al.*, 2023).

Em sistemas em que não há revolvimento do solo, a exemplo do sistema de plantio direto (SPD), à aplicação de calcário ocorre em superfície, sem incorporação. Esse material tem baixa solubilidade e sua translocação se dá em pequenas profundidades ao longo do perfil do solo, podendo chegar a, no máximo, 10 cm de profundidade. Em estudo realizado por Fidalski e Tormena (2005), o calcário aplicado em superfície necessitou de um período de três anos para corrigir o pH do solo, em até uma profundidade de 10 cm. Sousa *et al.* (2016), reiteram que o pH em água na camada superficial de um solo que recebeu aplicação recente de calcário no SPD chegou a valores próximos a sete, nos primeiros dois anos, o que pode reduzir a solubilização do fertilizante fosfatado aplicado no período.

Apesar de seus graves impactos, a ocorrência de supercalagem tem sido frequentemente observada na prática no campo, muitas vezes decorrente de falhas na amostragem de solo, erros de cálculo da necessidade de corretivo ou má regulagem dos equipamentos de aplicação (Molin *et al.*, 2015). Essa calagem excessiva é tão nociva ao desenvolvimento das espécies vegetais quanto a acidez elevada, sendo ainda mais difícil de corrigir, pois a condição de pH elevado resulta na precipitação de vários nutrientes do solo, a exemplo do P, zinco (Zn), cobre (Cu), Mn e indisponibilidade de boro (B), além de reduzir a produtividade, e aumentar a suscetibilidade a danos nas propriedades físicas do solo (Sanchez, 2019; Sousa; Lobato, 2004; Alvarez; Ribeiro, 1999).

Portanto, havendo o mal dimensionamento da calagem nestes sistemas, especialmente para atingir pH próximos à neutralidade ou superior a 5,5-6,5 em solos tropicais ácidos, a disponibilidade de P pode ser afetada negativamente pela elevação demasiada do pH na camada superficial do solo, ao promover a formação e precipitação de fosfatos de cálcio insolúveis (Havlin *et al.*, 2014), além de aumentar a fixação de P por novas formas de hidróxi-Al, resultando em deficiência de P e menor produtividade da cultura.

O superfosfato triplo (TSP) é uma das fontes de P mais utilizadas na agricultura brasileira. Em sua composição, o TSP ($\text{CaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem aproximadamente 14% de Ca, garantia mínima de 41% de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio (CNA + H_2O) e, destes, mais de 90% é solúvel em água. Elevar os valores de pH do solo até aproximadamente $\text{pH} = 6,0$, aumenta a eficiência da adubação com superfosfato triplo, visto que o P adsorvido reduz linearmente com essa prática (Miranda; Li, 2023). Entretanto, devido a presença de Ca em sua composição, sua solubilidade em solos alcalinos, especialmente aqueles ricos em Ca, pode ser comprometida (Fontoura *et al.*, 2010).

O fosfato monoamônico (MAP) é um fertilizante altamente solúvel e eficaz em fornecer P e nitrogênio (N) às plantas. Ele é sintetizado a partir da reação entre amônia anidra e ácido fosfórico — este último obtido pelo tratamento da rocha fosfática apatita com ácido sulfúrico. Com fórmula química $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, o MAP é utilizado em culturas de leguminosas por sua alta solubilidade e rápida disponibilidade de nutrientes. A aplicação de calcário deve ser equilibrada para evitar excessos que comprometam a eficiência do MAP (Raij, 2011), já que a calagem aumenta os teores de Ca no solo podendo levar à formação de fosfatos de Ca insolúveis, reduzindo a disponibilidade de P (Haynes, 1982).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da super calagem sobre a adubação, com dois fertilizantes fosfatados solúveis na sucessão soja-milho, obtendo uma curva de resposta à aplicação de doses crescentes de P.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido entre os meses de maio até setembro de 2024, em casa de vegetação, com cobertura plástica difusora, localizada no município de Rio Verde, Goiás, nas

instalações da Universidade de Rio Verde (UniRV). Durante o período experimental, as condições ambientais internas foram controladas por um sistema de resfriamento evaporativo do tipo *Pad-Fan*. O acionamento foi automatizado por um controlador digital acoplado a um termo-higrômetro, programado para manter a temperatura do ar abaixo de 32,5 °C e a umidade relativa inferior a 80 %.

As unidades experimentais consistiram em vasos plásticos contendo 3 kg de solo seco. O solo foi coletado na camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, com baixo teor de fósforo disponível (Tabela 1), proveniente de área de vegetação nativa no Campus Rio Verde da UniRV (17°47'11" S; 50°57'58" W), caracterizado química e texturalmente seguindo recomendações descritas por Teixeira *et al.* (2017). Após a coleta, o solo foi seco ao ar, passado em peneira com abertura de malha de 4 mm e incubado com calcário (240 g kg⁻¹ de Ca e 110 g kg⁻¹ de Mg), para ajuste do pH segundo os tratamentos experimentais.

TABELA 1 - Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico antes da aplicação de calcário

pH	M.O.	P^{1/}	K^{2/}	Ca^{2/}	Mg^{2/}	H+Al	Al^{2/}	S.B.	T
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----cmolc dm ⁻³ -----						
4,3	27	4	0,13	0,7	0,2	4,1	0,2	1,03	5,13
V	B^{3/}	Cu^{4/}	Fe^{4/}	Mn^{4/}	Zn^{4/}	S^{5/}	Areia	Silte	Argila
%	-----mg dm ⁻³ -----						-----g kg ⁻¹ -----		
20	0,29	0,9	39	18,9	0,7	2	530	100	370

^{1/} Resina; ^{2/} NH₄Cl; ^{3/} Água quente; ^{4/} DTPA; ^{5/} Fosf. de cálcio.

Foi utilizado delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial do tipo 2x2x4+2, com quatro repetições, cada uma representada por um vaso. Os tratamentos consistiram em dois níveis de calagem, ajustados por 1 vez e 10 vezes a dose recomendada de calcário (1,28 e 12,83 g por kg⁻¹ de solo, respectivamente) calculadas pelo método da saturação por bases para elevar esse índice a 70% (Raij *et al.*, 1996), duas fontes de P (monoamônio fosfato e superfosfato triplo), aplicadas em quatro doses (50, 100, 200, e 400 mg dm⁻³), além de dois tratamentos adicionais sem a aplicação de P, um para cada valor de pH.

TABELA 2 - Teores de macro e micronutrientes nas amostras de fertilizantes

Fertilizante	N ^{total}	P ₂ O ₅ ^{1/}	K ^{2/}	Ca ^{3/}	Mg ^{3/total}	S ^{2/}	Na ^{3/total}
	-----%-----						
MAP	11,62	52,76	0,14	0,45	0,97	1,48	0,61
TSP	1,78	45,38	0,16	14,24	0,55	1,94	0,26
	Cu ^{3/total}	Fe ^{3/total}	Mn ^{3/total}	Zn ^{3/total}	Al ^{3/total}	B ^{4/}	
	-----%-----						
MAP	-	0,36	-	0,05	0,22	0,02	
TSP	0,01	1,69	0,09	0,03	0,25	0,04	

^{1/}CNA + Água; ^{2/}Água; ^{3/}HCl; ^{4/}Azometina-H.

Antes da semeadura, os fertilizantes fosfatados foram aplicados e incorporados ao solo de forma homogênea. A aplicação de P via fertilizantes foi realizada apenas no primeiro ciclo; o cultivo subsequente foi conduzido para avaliação do efeito residual de P no solo. Foram realizados dois cultivos sucessivos, tendo como plantas indicadoras: soja (cultivar NEO 720 IPRO, Neogen) no primeiro ciclo, e milho (híbrido 9602-20 VIP3, Stine) no segundo. A umidade do solo foi mantida a 60% da capacidade de campo, por meio de controle gravimétrico com pesagens periódicas e reposição com água deionizada.

No primeiro cultivo, foram semeadas cinco sementes de soja por vaso, com desbaste cinco dias após a emergência das plântulas, remanescendo uma plântula por vaso. Simultaneamente, foi adicionada a cada unidade experimental solução (0,1 L por vaso) contendo todos os nutrientes, exceto fósforo (fornecido via tratamentos), cálcio e magnésio, (fornecidos via corretivo de solo). As doses dos nutrientes por quilograma de solo seco foram: 130 mg kg⁻¹ de nitrogênio (CH₄N₂O), 160 mg kg⁻¹ de potássio (KCl), 40 mg kg⁻¹ de enxofre (MgSO₄·7H₂O), 4 mg kg⁻¹ de zinco (ZnSO₄·7H₂O), 3,6 mg kg⁻¹ de manganês (MnSO₄·H₂O), 1,5 mg kg⁻¹ de ferro (FeCl₃), 1,3 mg kg⁻¹ de cobre (CuSO₄·5H₂O), 0,8 mg kg⁻¹ de boro (H₃BO₃) e 0,15 mg kg⁻¹ de molibdênio (Na₂MoO₄·2H₂O) (Dias *et al.*, 2022).

A solução aplicada à soja foi isenta de N devido à inoculação das sementes imediatamente antes da semeadura com produto comercial turfoso contendo uma associação das estirpes *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079) e *Bradyrhizobium diazoefficiens* (SEMIA 5080). A aplicação seguiu a dose recomendada para a cultura, assegurando a concentração mínima de 1 x 10⁹ UFC g⁻¹, visando maximizar a nodulação e a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN), reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (Costa, 2023).

Aos 50 dias de cultivo, com a soja em estágio fenológico entre R4 e R5.1 (Imagens 1 e 2 – Anexo 1), a parte aérea das plantas foi coletada, acondicionada em sacos de papel e seca em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante. Determinou-se a produção de

massa seca da parte aérea (MSPA) por meio de balança analítica com precisão de $\pm 0,001$ g. As amostras foram moídas, digeridas em meio ácido (Tedesco *et al.*, 1995) e analisadas para quantificação de P e demais macro e micronutrientes. O acúmulo de P (mg vaso^{-1}) foi calculado através da multiplicação da massa seca (g vaso^{-1}) pela concentração de P no tecido vegetal (mg g^{-1}).

Concluído o cultivo da soja, a solução supracitada (incluindo N) foi reaplicada e procedeu-se à semeadura do milho com cinco sementes por vaso, com desbaste aos cinco dias da emergência permanecendo uma planta por vaso. O cultivo foi conduzido por 50 dias, com estágio das plantas em média V7/V8 (Imagens 3 e 4 – Anexo 1), e os procedimentos de coleta, secagem, determinação de massa seca, moagem, digestão e análise nutricional seguiram o mesmo protocolo da soja. Amostras de solo foram coletadas ao final do experimento para determinação do pH do solo, segundo Teixeira *et al.* (2017).

2.2 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Bartlett e de Shapiro-Wilk para a avaliação da homoscedasticidade das variâncias e normalidade da distribuição dos resíduos, respectivamente. Atendidos os pressupostos, foi realizada a análise de variância por meio do teste F. Constatada diferença entre os tratamentos qualitativos, os dados foram submetidos ao teste de Tukey. Tendo diferença entre os tratamentos quantitativos, foi realizado o ajuste de modelos de regressão.

Foram avaliadas diferentes modelagens da curva de resposta ao fósforo para duas variáveis dependentes: a produção de massa seca da parte aérea e acúmulo de fósforo nas plantas. As análises foram conduzidas separadamente para as culturas de soja e milho. Para cada combinação entre cultura e variável avaliada, foram ajustados seis modelos estatísticos: linear, quadrático, quadrático com transformação de raiz quadrada, *Mitscherlich*, *Piecewise* (com ponto de quebra estimado), *Vega-Galvez*, e *Michaelis-Menten*. O desempenho dos modelos foi comparado com base nos critérios estatísticos de qualidade de ajuste, como o coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrática do erro médio (RQEM), e critérios de informação Bayesiano (BIC) e Akaike (AIC), visando identificar a modelagem mais adequada para descrever a resposta das culturas às doses aplicadas de fósforo. Em todos os testes estatísticos, foi utilizado o nível de significância de 0,05.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelos de resposta de biomassa e absorção de fósforo por soja e milho em função das doses de fósforo

De modo geral, independentemente da fonte de P utilizada e condições de calagem, ambas as culturas tiveram resposta positiva à adubação com P. Os tratamentos com aplicação do nutriente diferiram do controle (sem P), evidenciando a responsividade dos solos à fertilização fosfatada. A magnitude e padrão dessas respostas variaram conforme a cultura e dose aplicada, sendo modelados por funções estatísticas específicas.

A análise de ajuste indicou que determinados modelos tiveram melhor desempenho para representar a dinâmica de resposta das culturas ao P, refletindo nos aspectos de biomassa e acúmulo de P em cada espécie. Dentre os modelos avaliados, o quadrático com transformação de raiz quadrada se destacou por obter os melhores ajustes nas combinações entre cultura e variável, com altos R^2 ($\geq 0,99$) e baixos AIC, BIC e RQEM, proporcionando o melhor ajuste para a biomassa e acúmulo de P na parte aérea de soja e milho em função das doses de P (Figura 1 A). Esse modelo foi mais eficiente em representar o comportamento não linear observado entre o aumento das doses de P e respostas de crescimento das plantas, especialmente nos casos em que houve tendência de estabilização da resposta após determinado nível de adubação.

Para o acúmulo de P, o modelo de *Vega-Gálvez* foi similar ao quadrático com raiz (Figura 1 B), sugerindo que também possa ser usado para capturar de forma mais realista os processos de absorção e aproveitamento do fósforo pelas culturas estudadas. O modelo quadrático com raiz ou *Square Root model* tem sido utilizado para descrever a resposta de culturas como milho e soja à fertilização fosfatada. Este modelo é muitas vezes preferido ao quadrático padrão pois descreve melhor a ascensão rápida da produtividade em baixas doses e o platô mais estável em altas doses, sem a queda acentuada típica da parábola quadrática (Colwell, 1963; Colwell; Goedert, 1988; Mallarino; Blackmer, 1992). Por sua vez, o *Vega-Gálvez* é um dos modelos empíricos propostos por Vega-Gálvez *et al.* (2010), muito usados em processos de secagem de produtos agrícolas, mas não tem ampla fundamentação em estudos de absorção de fósforo por plantas.

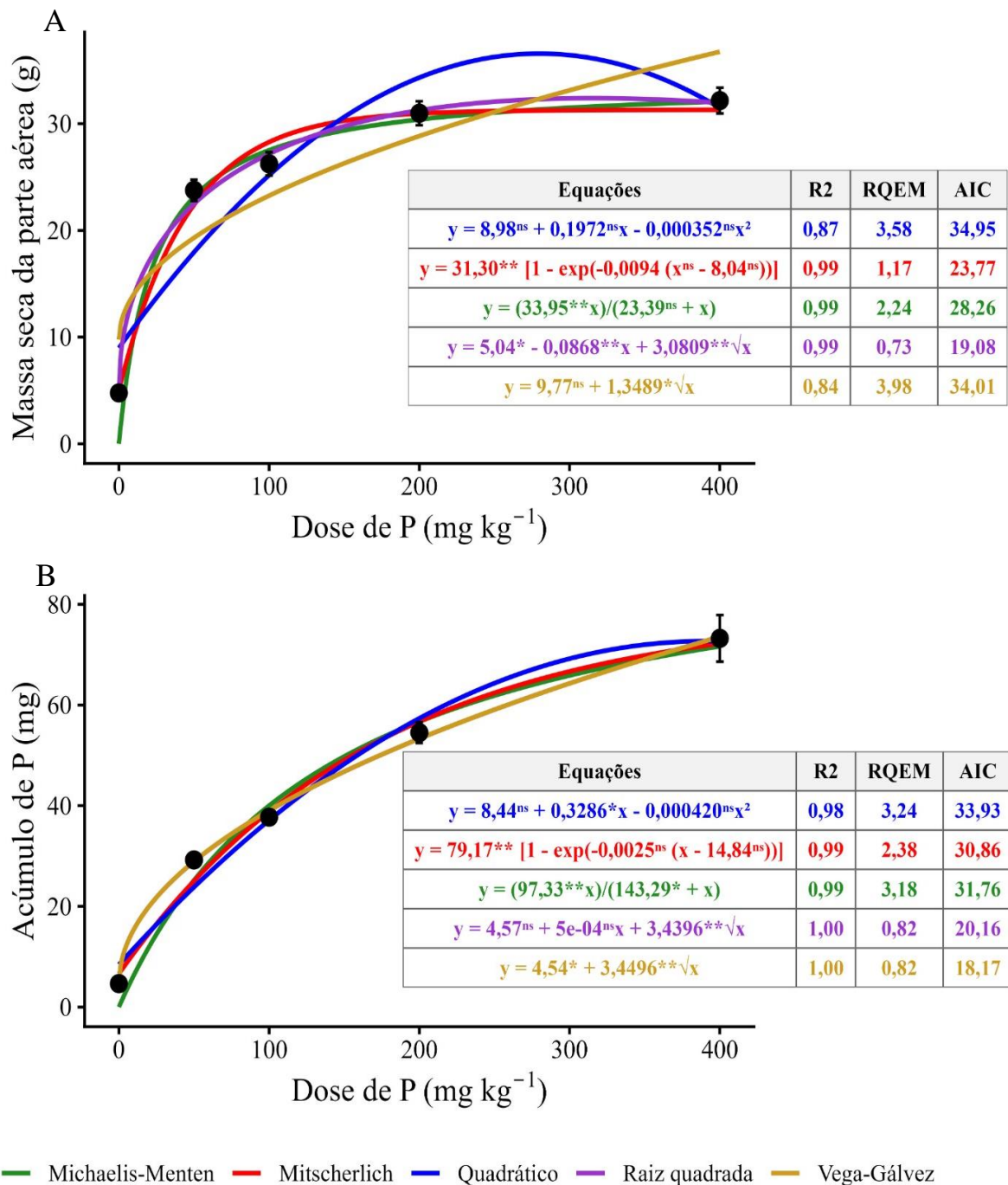


FIGURA 1 - Modelos da curva de resposta ao fósforo para as variáveis dependentes: (A) massa seca da parte aérea e (B) acúmulo de fósforo na parte aérea das culturas. AIC, critério de informação Akaike; R², coeficiente de determinação; RQEM, raiz quadrática do erro médio. Barras verticais representam o erro padrão da média.
 **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo

Hu *et al.* (2021), aplicaram o modelo exponencial de *Mitscherlich* em trigo cultivado em solos calcários arenosos, estimando níveis críticos de P no solo e na planta, e concluíram que ele gera valores críticos superiores aos de modelos lineares, auxiliando na otimização da eficiência de uso e redução de riscos ambientais. Os estudos mostraram que o modelo mais

adequado variou conforme o conjunto de dados e fisiologia da planta, muitas vezes favorecendo abordagens não lineares. Esses trabalhos reforçam a necessidade de testar diferentes funções para cada combinação cultura-variável, para garantir maior precisão na interpretação da resposta ao nutriente.

3.2 Efeito da calagem e das fontes de fósforo sobre o solo

A calagem na dose recomendada elevou o pH em CaCl₂ de 4,3 para 5,8, corrigindo a acidez ao adicionar Ca e Mg e reduzir a concentração de Al e a acidez trocável (H+Al), o que, por sua vez, melhorou os níveis de enxofre (S) e micronutrientes devido ao estímulo à mineralização da matéria orgânica. Contudo, a supercalagem, ao elevar o pH para valores próximos à neutralidade, reduziu a concentração de P – sugerindo possível precipitação como fosfato de cálcio, corroborando estudos de Sarker *et al.* (2014), Haynes (1982), Fageria e Baligar (2008), e Moreira *et al.* (2007) – e aumentou consideravelmente o teor de S (Tabela 3).

O aumento expressivo de S é atribuído principalmente ao estímulo à mineralização da matéria orgânica, visto que a calagem cria o pH ideal para que microrganismos liberem o S orgânico na forma de sulfato SO₄²⁻, um mecanismo suportado por Fontes *et al.* (2020) e Oliveira *et al.* (1998), que confirmam o aumento da atividade biológica e da taxa de mineralização do S orgânico.

TABELA 3 - Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico utilizado no experimento após correção com calcário (1x e 10x a recomendação)

	pH		M.O.	P ^{I/}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	T
	H ₂ O	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----cmolc dm ⁻³ -----						
1x	6,19	5,80	18,02	4,23	0,16	2,44	1,45	2,11	0,05	4,1	6,21
10x	6,98	6,52	20,52	3,01	0,15	3,92	1,35	1,31	0,05	5,4	6,71
	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S	Areia	Silte	Argila	
	%		-----mg dm ⁻³ -----					-----g kg ⁻¹ -----			
1x	65,75	0,35	1,43	75,26	37,27	1,51	8,52	523	72	405	
10x	80,53	0,31	1,18	48,97	39,28	1,53	13,61	531	95	374	

^{I/} Mehlich⁻¹.

3.3 Produção de massa seca

A interação entre fontes de P e níveis de calagem (Figura 2) evidenciou que a máxima produção de biomassa para ambas as culturas foi obtida com a aplicação de MAP sob a dose recomendada de calcário (1x). Nessa condição, a superioridade agrônômica do MAP sobre o

TSP pode ser atribuída ao efeito sinérgico entre N e P, característico de fontes amoniacais. A presença do íon amônio (NH_4^+) no grânulo do MAP promoveu a acidificação da rizosfera e estimulando a proliferação radicular para manutenção do balanço eletroquímico (Marschner, 2012; Jing *et al.*, 2010; Bloom *et al.*, 2002).

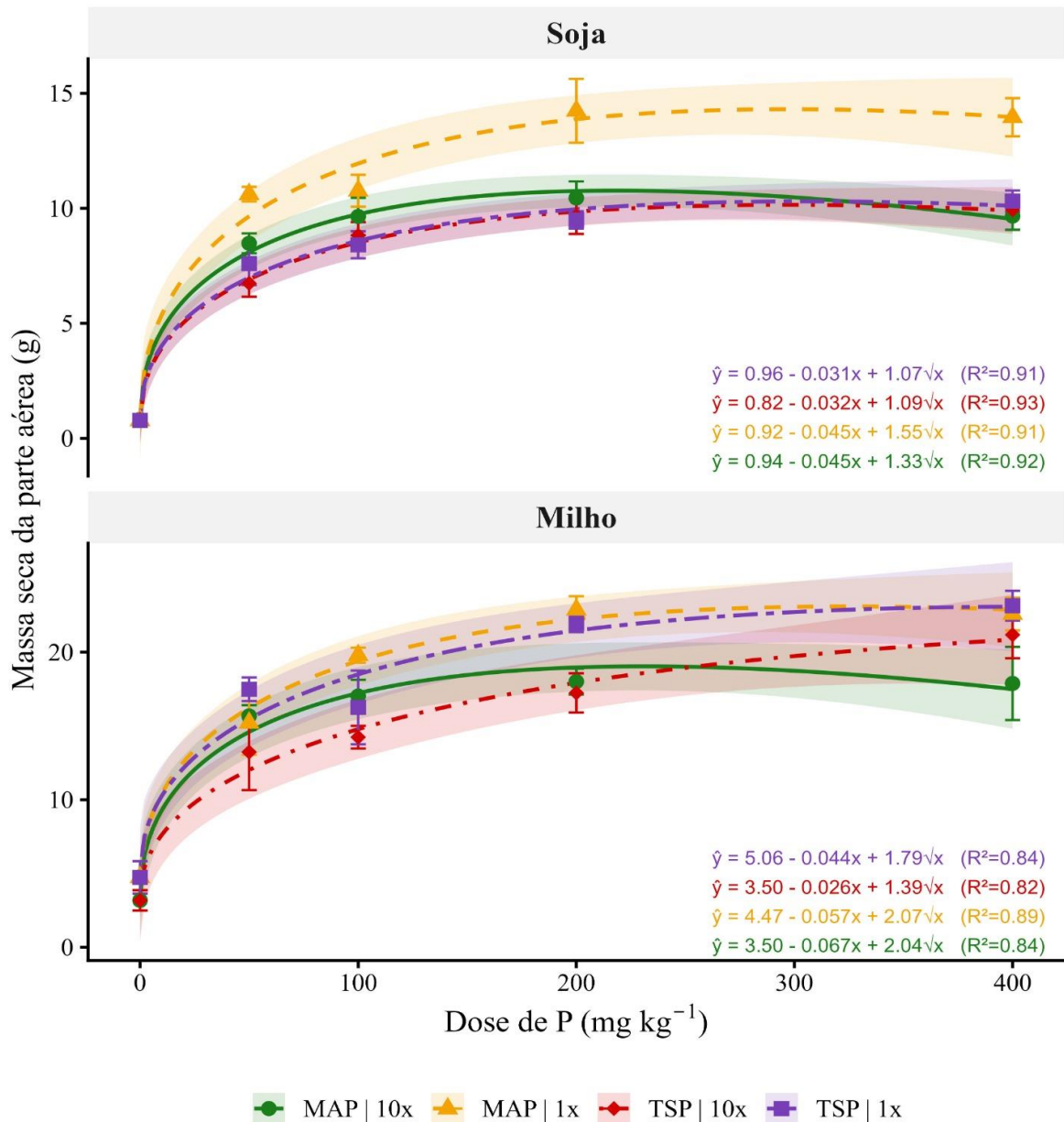


FIGURA 2 – Produção de massa seca da parte aérea (g), em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg^{-1}), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada), em cultivo sucessivo de soja e milho. Barras verticais representam o erro padrão da média

Contudo, o benefício que o MAP trouxe para o sistema pelo N presente em sua composição não se repetiu em condições de alta calagem, reduzindo a eficiência do MAP. As fontes foram equivalentes em solo com supercalagem. Esse nivelamento indicou que o excesso de corretivo suprimiu os mecanismos físico-químicos que favorecem a fonte amoniacal. O elevado poder tampão gerado pela aplicação excessiva de calcário provavelmente neutralizou a acidez localizada do MAP antes que esta pudesse proteger o fósforo, além de potencialmente favorecer a volatilização de amônia. Assim, ao falhar a barreira ácida, o P do MAP tornou-se tão suscetível à precipitação por fosfatos de cálcio insolúveis quanto o P do TSP (Devau *et al.*, 2011; Chien *et al.*, 2011). O efeito depressivo é exacerbado pela alta concentração de Ca^{2+} , que promove a precipitação de P, e pela possível formação de polímeros de hidróxi-Al em solos intemperizados, gerando novas superfícies de adsorção de alta afinidade (Haynes, 1982; Olego *et al.*, 2022; Penn; Camberato, 2019; Amarasiri; Olsen, 1973).

Embora o MAP tenha se sobressaído ao TSP em condições normais de calagem, a drástica inversão desse desempenho sob supercalagem sugeriu que a vantagem da fonte amoniacal não residiu exclusivamente na acidificação da rizosfera, mas sim, no aporte nutricional de N, desafiando o consenso de que a solubilização de P induzida pela acidez localizada é o único *driver* de eficiência do MAP nos solos corrigidos, indicando que o "efeito *starter*" do amônio (NH_4^+) desempenhou papel determinante no vigor da parte aérea observado aos 50 dias (estádios R4 a R5.1) nos solos com calagem ideal (Marschner, 2012; Chien *et al.*, 2011).

Entretanto, a interpretação desse vigor requer cautela. A literatura estabeleceu que a disponibilidade de N mineral no solo atua como um regulador negativo da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), inibindo a formação de nódulos e a atividade da nitrogenase em leguminosas, um fenômeno descrito como *feedback* negativo para conservação de energia pela planta (Salvagiotti *et al.*, 2008; Tamagno *et al.*, 2018). Consequentemente, o ganho de biomassa promovido pelo N do MAP nesta fase da planta pode não se traduzir em produtividade final, caso tenha havido supressão da simbiose com *Bradyrhizobium* sp., essencial para as fases reprodutivas subsequentes (enchimento de grãos).

Dessa forma, a ausência de avaliação da nodulação radicular da soja ou rendimento de grãos constitui uma limitação deste estudo experimental em vasos. O maior crescimento vegetativo impulsionado pelo N mineral pode mascarar uma deficiência latente no estabelecimento da FBN da leguminosa, o que resultaria em menor aporte de N na fase de enchimento de grãos. Futuras investigações devem contemplar o ciclo completo da cultura para determinar se o sinergismo inicial N-P do MAP compensou o risco de inibição da nodulação

em comparação às fontes exclusivamente fosfatadas como o TSP (Hungria *et al.*, 2006; Cassman *et al.*, 1981).

A análise de regressão demonstrou resposta às doses de P (Figura 2). A produção máxima de biomassa da soja, estimada a partir do modelo quadrático com raiz quadrada, foi de 14,27 g vaso⁻¹, com o MAP, na dose de 297 mg kg⁻¹ de P, enquanto o milho alcançou 23,26 g vaso⁻¹ com 330 mg kg⁻¹ de P (MAP) ou 400 mg kg⁻¹ de P (TSP). Esse comportamento corrobora a lei dos incrementos decrescentes de Mitscherlich. Embora as culturas respondam à adição de P em solos de baixa fertilidade, os ganhos tendem a se estabilizar à medida que o potencial genético ou a capacidade de absorção radicular são atingidos (Rajj, 2011; Marschner, 2012).

A dose de 100 mg kg⁻¹ de P foi selecionada como nível ótimo para as condições do experimento, pois proporcionou rendimento de massa seca equivalente a cerca de 83,5% do rendimento máximo estimado pela curva de resposta (11,92 g planta⁻¹ em relação a 14,27 g planta⁻¹ máxima). A escolha de doses que atingem entre 80% e 90% do rendimento máximo é prática consolidada na literatura agrônômica, pois equilibra alta eficiência de utilização do nutriente, redução de custos e minimização do risco de consumo de luxo e desbalanço iônico, conforme recomendado por Rajj (2011) e Novais *et al.* (2007) para condições de Latossolos do Cerrado. Vale lembrar que o cultivo do milho no presente trabalho foi realizado apenas com o efeito residual de P dos fertilizantes fosfatados aplicados para a soja, o que superestima o resultado da dose ideal de P necessária para a maior biomassa do milho neste caso (Novais; Smyth, 1999; Sousa; Lobato, 2004).

3.4 Acúmulo de fósforo

A aplicação de supercalagem diminuiu o acúmulo total de P no tecido vegetal nas culturas avaliadas (Figura 3). Esse impacto foi particularmente deletério para o MAP, cuja eficiência foi prejudicada pela neutralidade do pH e excesso de Ca²⁺ no solo. Em contrapartida, na condição normal de calagem, o MAP promoveu acúmulo de P superior ao TSP. Nesse cenário, o acúmulo de P na planta atuou como bioindicador da intensa precipitação química: o excesso de íons Ca²⁺ na solução reagiu rapidamente com o ortofosfato liberado, formando compostos insolúveis (fosfatos de cálcio) e transformando o solo em dreno químico superior à capacidade de absorção radicular (Penn; Camberato, 2019).

Paralelamente, o aumento das doses de P resultou em incremento substancial no acúmulo do nutriente na parte aérea, evidenciando a alta capacidade de resposta de soja e milho à disponibilidade do elemento. Mesmo na dose onde não há mais resposta à produção de

biomassa, a planta continua absorvendo P (“consumo de luxo”), ou seja, há excesso do nutriente que foi absorvido pela planta, mas não foi traduzido em biomassa. Contudo, a magnitude desse acúmulo revelou distinção interespecífica: a soja teve maior eficiência na absorção e estoque de P em seu vacúolo em comparação ao milho. Tal comportamento pode ser atribuído à maior Capacidade de Troca Catiônica (CTC) radicular das leguminosas que, ao favorecer a absorção de cátions divalentes (como o Ca^{2+}), estimula o influxo compensatório de ânions fosfato para manutenção do equilíbrio eletroquímico (Hinsinger, 2001). Adicionalmente, a elevada demanda energética exigida pelo processo de fixação biológica de nitrogênio na soja constituiu um dreno metabólico ativo, intensificando a absorção de P (Marschner, 2012).

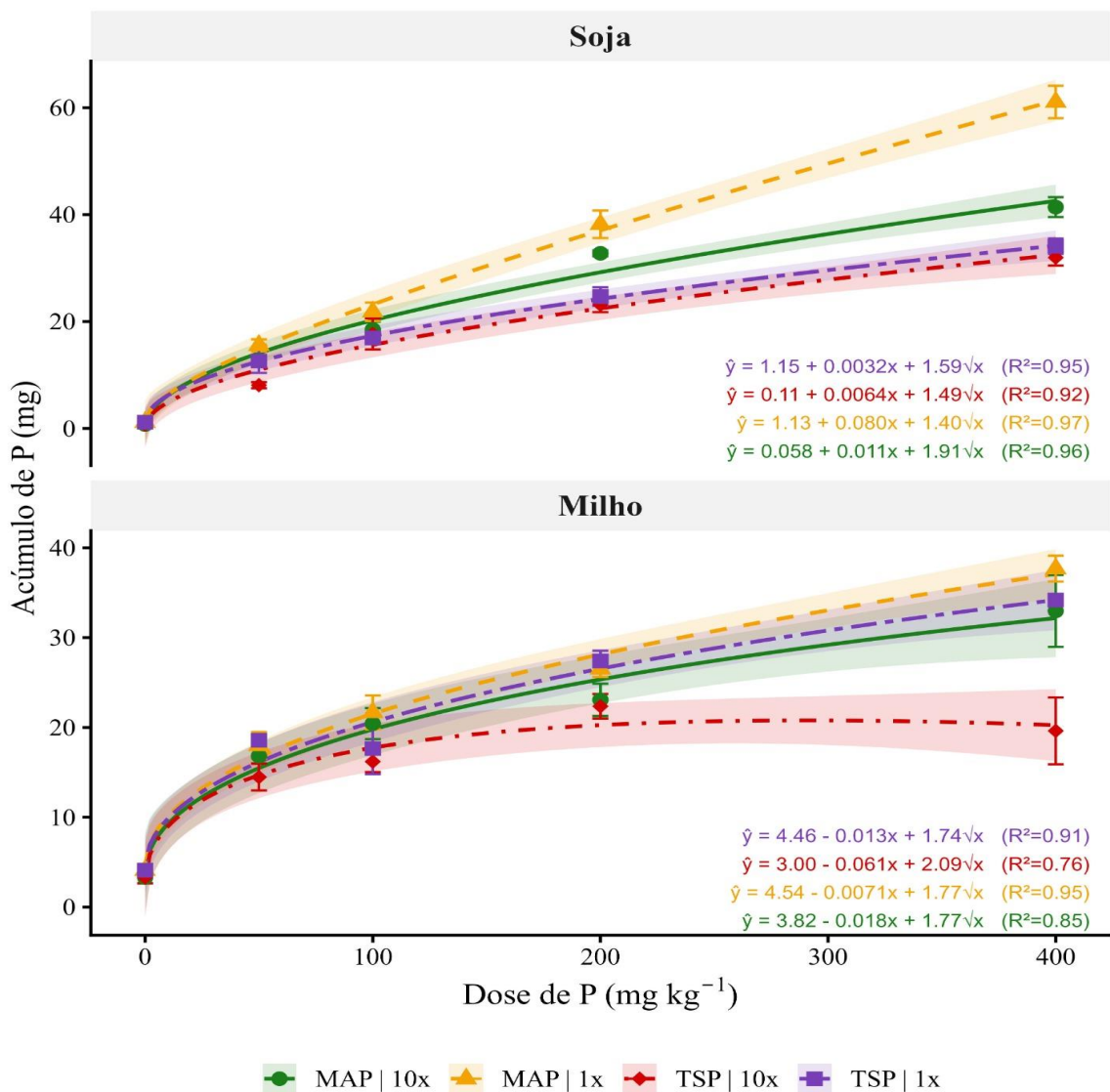


FIGURA 3 - Acúmulo de P na parte aérea (mg) em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg^{-1}), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada), em cultivo sucessivo de soja e milho. As barras verticais representam o erro padrão da média.

3.5 Absorção de nutrientes

A variação nas doses de calcário teve impacto nos conteúdos foliares de macro e micronutrientes (Figuras 4 e 5). Os acúmulos de N, Mg, Zn, Mn e B foram prejudicados pela supercalagem, independentemente da fonte de P utilizada, com exceção do N acumulado no milho com MAP, e do Mg na soja com TSP, que mantiveram o patamar nas duas condições de calagem. Por outro lado, houve aumento na absorção de S no milho sob alta calagem, enquanto a soja do cultivo anterior reduziu a absorção do nutriente na mesma condição de pH.

A redução na absorção de Zn e Mn corrobora a dinâmica inorgânica clássica de solos tropicais, em que a elevação excessiva do pH induz a rápida precipitação desses elementos na forma de hidróxidos e carbonatos insolúveis, além de aumentar a adsorção específica aos óxidos de Fe e Al (Novais *et al.*, 2007; Fageria; Baligar, 2008).

A manutenção dos teores foliares de cobre (Cu) sob a mesma condição pode ser explicada por uma atuação conjunta de fatores. No solo, o Cu possui altíssima afinidade, descrita pela Série de Irving-Williams, para formar complexos estáveis com a matéria orgânica nativa (McBride, 1994; Stevenson, 1994). A elevação do pH promove a dispersão e solubilização parcial da matéria orgânica preexistente no solo, aumentando as concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) na solução, que atua como um poderoso quelante natural, blindando parte do Cu contra a precipitação alcalina (Laurent *et al.*, 2020; Olego *et al.*, 2021). Simultaneamente, no ambiente rizosférico, a drástica insolubilização de Zn e Mn alivia o antagonismo iônico nos sítios carreadores das membranas radiculares, reduzindo a competição e otimizando a eficiência de absorção do Cu remanescente (Chia *et al.*, 2025). Como este é o micronutriente metálico exigido em menores quantidades relativas pelas culturas, a fração lábil preservada no solo aliada à facilitação fisiológica na absorção torna-se suficiente para suprir a demanda da planta, mascarando o efeito restritivo do pH no tecido foliar (Marschner, 2012).

A fonte de P também influenciou o acúmulo tecidual de nutrientes nas plantas de soja e milho. Nos vasos em que foi aplicado o MAP, a absorção de nutrientes foi superior ou equivalente às parcelas em que foi aplicado o TSP, sobretudo para N e Mg, onde a superioridade foi absoluta. A absorção de potássio (K), S e Cu na parte aérea do milho foi expressiva, enquanto na soja teve valores menores de absorção. Em contrapartida, o acúmulo de Ca na soja foi alto, ocorrendo menor acúmulo no milho, já que o segundo ciclo do experimento contou apenas com o efeito residual desse nutriente fornecido via calcário antes do 1º ciclo. O somatório dos acúmulos nutricionais de soja e milho (acúmulo total) evidenciou a superioridade do MAP em sistema com calagem adequada para promover uma maior absorção de nutrientes pelas plantas.

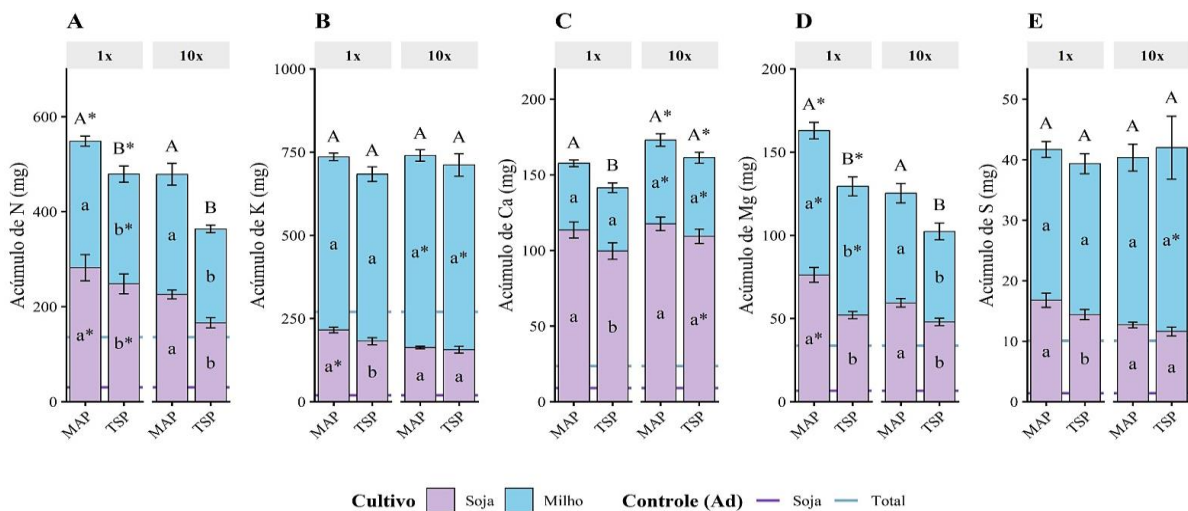


FIGURA 4 - Acúmulo de nitrogênio (A), potássio (B), cálcio (C), magnésio (D) e enxofre (E) na parte aérea de soja e milho em função da aplicação de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP), sob duas condições de calagem (1× e 10× a dose recomendada). Letras maiúsculas comparam fontes de P dentro de cada condição de calagem, considerando o acúmulo total; letras minúsculas comparam fontes de P dentro de cada condição de calagem, para cada cultivo. O asterisco (*) indica diferença significativa entre condições de calagem, dentro de cada fonte de P. Barras verticais representam o erro padrão da média.

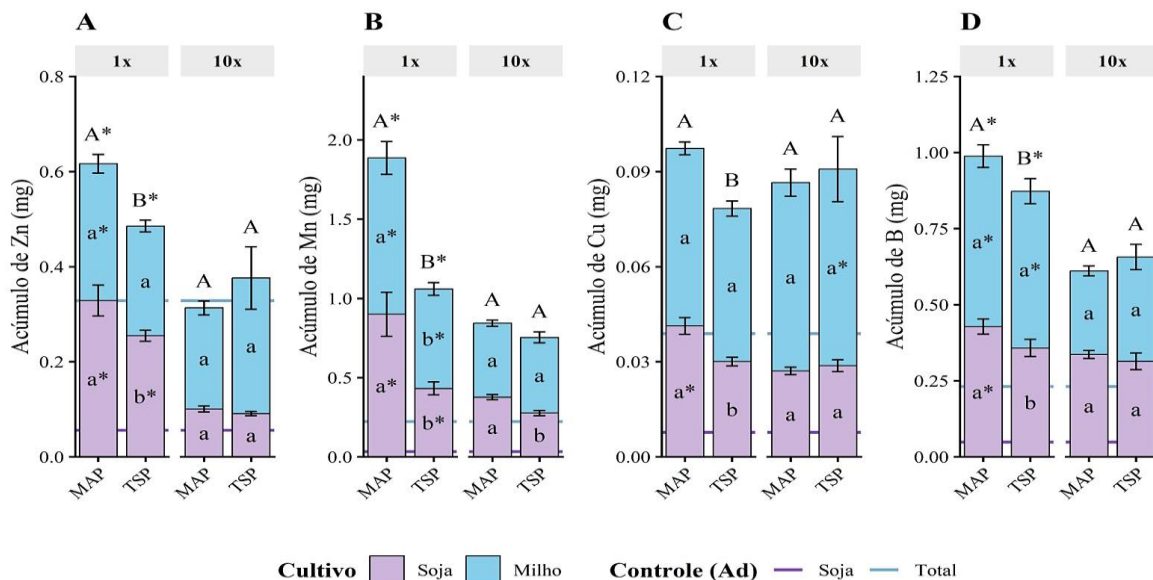


FIGURA 5 - Acúmulo de zinco (A), manganês (B), cobre (C) e boro (D) na parte aérea de soja e milho em função da aplicação de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP), sob duas condições de calagem (1× e 10× a dose recomendada). Letras maiúsculas comparam fontes de P dentro de cada condição de calagem, considerando o acúmulo total; letras minúsculas comparam fontes de P dentro de cada condição de calagem, para cada cultivo. O asterisco (*) indica diferença significativa entre condições de calagem, dentro de cada fonte de P. Barras verticais representam o erro padrão da média

3.6 Análise discriminante canônica

A Análise Discriminante Canônica demonstrou eficácia na distinção dos tratamentos para a soja, com as variáveis canônicas Can1 e Can2, explicando, conjuntamente, 93,2% da variância total acumulada (56,2% e 37,0%, respectivamente) (Figura 6). O primeiro eixo (Can1) foi definido predominantemente por macronutrientes catiônicos (Ca, Mg e K), atuando como um indicador do status de bases trocáveis, enquanto o segundo eixo (Can2) teve forte correlação com os micronutrientes (B, Mn, Zn), além de N, P e a biomassa. A distribuição espacial dos escores evidenciou que o manejo da calagem foi o fator determinante na separação dos grupos, sobrepondo-se ao efeito das fontes de P.

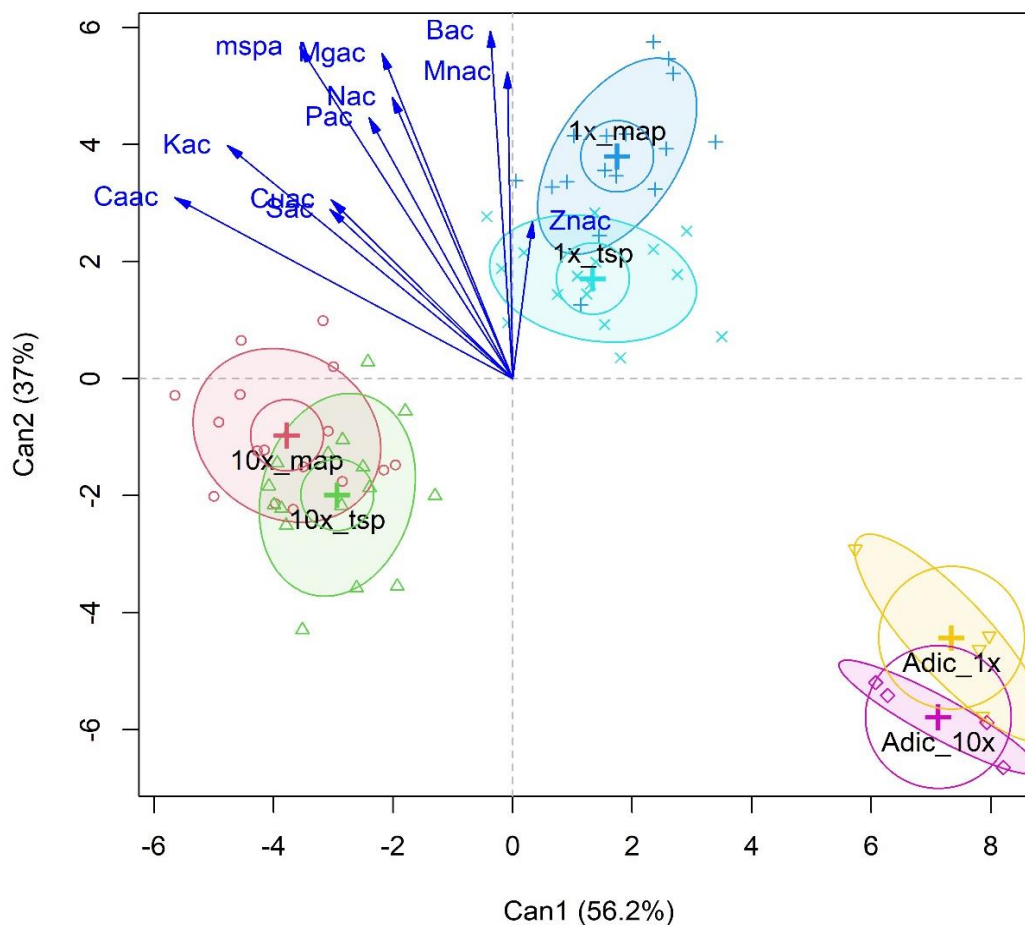


FIGURA 6 - Biplot da análise discriminante canônica mostrando escores de tratamento associados a fontes de fósforo, fosfato monoamônico (MAP) e superfosfato triplo (TSP), sob dois níveis de calagem (1x e 10x dose recomendada). Controle sem aplicação de fósforo (Cont) é demonstrado para ambas as condições de calagem. Setas representam cargas canônicas de variáveis de resposta da soja, incluindo massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Cu e Zn). Elipses indicam dispersão dos tratamentos, destacando a separação de grupos pela fonte de fertilização e nível de calagem.

O quadrante inferior direito, que agrupou os tratamentos controle (sem P), caracterizou-se pela baixa disponibilidade geral de nutrientes, reforçando que a ausência de P, independentemente do nível de calagem, afetou negativamente a interceptação e o perfil nutricional (Novais *et al.*, 2007; Whitters *et al.*, 2018; Pavinato *et al.*, 2024). Em oposição, os tratamentos com calagem situaram-se nos quadrantes de maior fertilidade, porém com distinções qualitativas. O quadrante associado à calagem recomendada correlacionou-se positivamente com os vetores de B, Mn, Mg, N e com a MSPA, indicando que o equilíbrio nutricional proporcionado pela correção adequada foi o principal propulsor da produção de biomassa (Fageria; Baligar, 2008).

Já a condição de supercalagem isolou-se em direção aos vetores de Ca, K, Cu e S. Isso sugere que mecanismos químicos distintos governaram a disponibilidade de elementos. No grupo da supercalagem, o acúmulo de K corrobora a hipótese de deslocamento deste cátion da CTC para a solução do solo, impulsionado pela entrada massiva de Ca através de trocas iônicas governadas pela lei de ação das massas (Havlin *et al.*, 2014). Contudo, a projeção vetorial oposta dos micronutrientes (B, Mn, Zn) em relação à supercalagem evidencia o efeito depressor do pH elevado (6,98) sobre a solubilidade destes elementos (Olego *et al.*, 2021). Embora a supercalagem tenha elevado o status de bases (Can1), ela comprometeu a disponibilidade de micronutrientes (Can2), restringindo o potencial produtivo observado na dose recomendada.

A similaridade entre MAP e TSP dentro de cada nível de calagem (elipses sobrepostas nos grupos 1x e 10x) indica que, sob as condições estudadas, as duas fontes solúveis de P promoveram padrões nutricionais comparáveis. Esses resultados corroboram com o clássico efeito negativo da calagem excessiva sobre a disponibilidade e o aproveitamento de P em solos tropicais ácidos (Amarasiri; Olsen, 1973; Novais *et al.*, 2007; Raij, 2011), demonstrando que o excesso de Ca^{2+} e aumento do pH induzem precipitação de fosfatos de cálcio, reduzindo o acúmulo de nutrientes na cultura.

3.7 Balanço de fósforo

A recuperação de P pelas plantas (Figura 7) seguiu o padrão de declínio acentuado da eficiência agrônômica com o aumento da dose aplicada. Consequentemente, mais de 70% do P aplicado foi retido no solo, como P residual (Roy *et al.*, 2016; Withers *et al.*, 2014). Na menor dose, de 150 mg P vaso⁻¹, a recuperação variou de 19,5 a 23 %, independentemente da fonte (MAP ou TSP) e nível de calagem.

À medida que a dose aumentou, a porcentagem recuperada caiu, atingindo apenas 5 a 8 % na maior dose testada. Esse comportamento é amplamente documentado em solos tropicais como os Latossolos do Cerrado, onde a adsorção específica e precipitação de fosfatos de cálcio e ferro-alumínio limitam a disponibilidade do P aplicado (Syers *et al.*, 2008; Chien *et al.*, 2011; Novais *et al.*, 2007; Raij, 2011).

A calagem excessiva não produziu diferença na porcentagem de recuperação em relação à dose recomendada, indicando que o principal fator limitante foi a própria quantidade de P aplicada, e não o excesso de Ca^{2+} ou pH mais elevado. Mesmo que ainda não fitotóxica, a oferta acentuada de P não se traduz em ganho de biomassa ou absorção adicional, resultando apenas no acúmulo do nutriente no solo devido à incapacidade dos transportadores radiculares e demanda metabólica da planta em processar o excedente (Marschner, 2012).

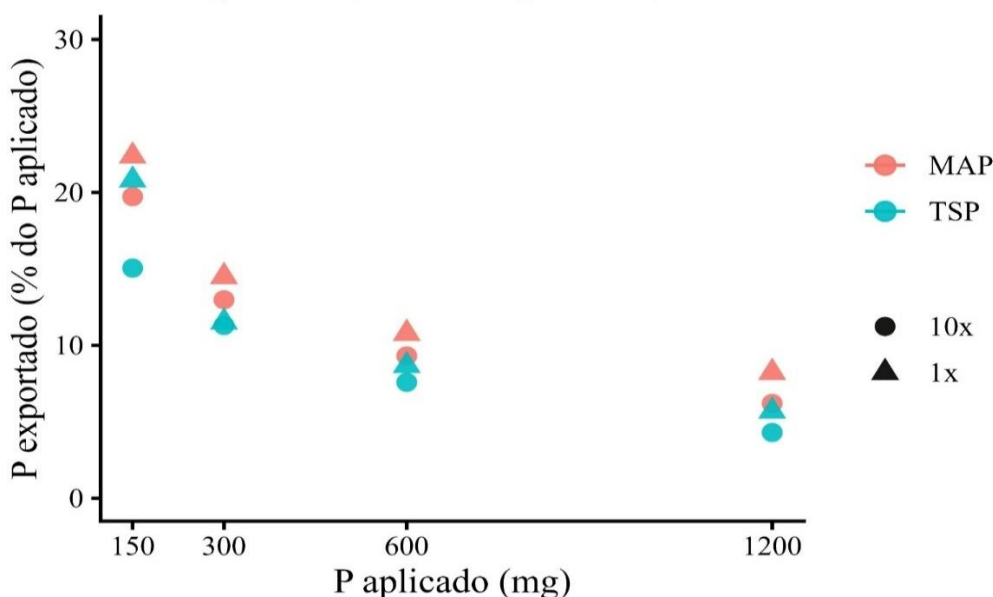


FIGURA 7 - Recuperação de fósforo a partir da porcentagem de P exportado para as plantas (soma dos totais de soja e milho) em função das doses de P (mg) aplicadas por vaso.

Observa-se ainda uma tendência de ligeira superioridade do MAP sobre o TSP nas doses de P mais elevadas. Esses resultados corroboram com estudos recentes que mostram eficiências médias de recuperação de P em solos tropicais inferiores a 15–20 % quando doses elevadas são utilizadas (Menezes-Blackburn *et al.*, 2018; Pavinato *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2025), reforçando a necessidade de estratégias, que priorizem doses moderadas, fontes com maior eficiência inicial e manejo integrado para aumentar a sustentabilidade do uso de P na agricultura tropical (Doydora *et al.*, 2020).

Hipotetiza-se que o efeito acidificante localizado do NH_4^+ tenha retardado a fixação do P. A dinâmica de disponibilidade de P no solo difere substancialmente entre as fontes minerais devido às características do microssítio de dissolução. A aplicação de TSP promove uma drástica redução do pH local (frequentemente inferior a 1,5) e a liberação de íons Ca^{2+} , fenômenos que favorecem a precipitação inicial de fosfatos de cálcio e intensificam a dissolução de Fe e Al da matriz do solo, acelerando os processos de fixação do nutriente. Em contraste, embora o MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) também possua caráter acidificante, sua dissolução gera um ambiente apenas moderadamente ácido (pH \sim 3,5) e cria um microssítio de alta concentração de íons fosfato que satura os sítios de adsorção locais, favorecendo a formação de compostos metaestáveis (como as taranakitas) e mantendo o P lábil.

Além dessa vantagem, a co-localização do íon NH_4^+ induz a proliferação de raízes finas exatamente nessa zona de disponibilidade temporária (Hunter *et al.*, 2024). Esse sinergismo radicular otimiza a interceptação inicial do nutriente, conferindo uma nítida vantagem na absorção de P por culturas de rápido crescimento vegetativo, como a soja e o milho (Chien *et al.*, 2011; Rosolem *et al.*, 2022; Simms *et al.*, 2024; Chatterjee *et al.*, 2024).

Independentemente da fonte fosfatada utilizada, o pH do solo não sofreu alteração em função das doses crescentes de P quando houve excesso de calagem, mantendo-se em valores próximos a 7,5, devido a um forte tamponamento criado pelo excesso de calcário (Figura 8). Já na condição de calagem normal, o solo com aplicação de MAP apresentou redução expressiva do pH em função do aumento das doses de P, com declínio aproximado de 6,7 para 5,7. Esse resultado ocorreu pela presença de NH_4^+ no ambiente de dissolução do MAP, que contribuiu para a acidificação do solo via nitrificação, mostrando a necessidade de um manejo que equilibre o sistema, com otimização entre doses de fertilizantes e calagem (Novais *et al.*, 2007; Raij, 2011; Zhang *et al.*, 2024).

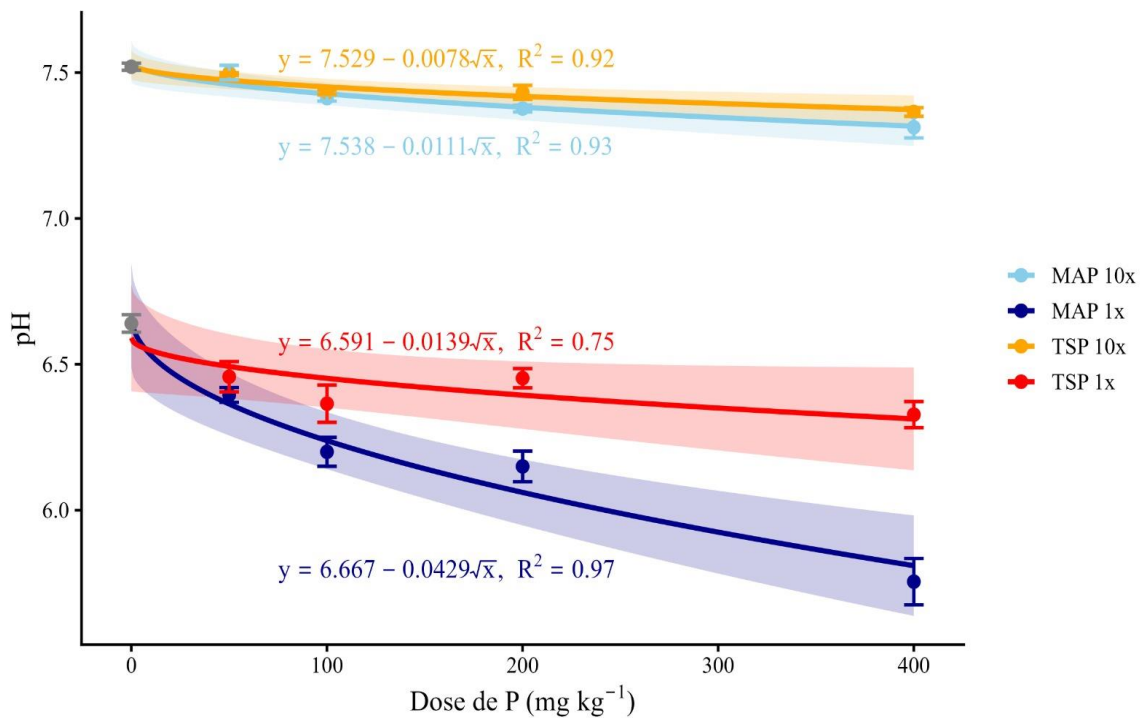


FIGURA 8 - pH do solo após a realização do experimento, em função das doses de P (50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹), aplicadas como superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monoamônico (MAP), sob duas condições de calagem (1x e 10x a dose recomendada). As barras verticais representam o erro padrão da média.

4 CONCLUSÕES

O fosfato monoamônico foi uma fonte de fósforo mais eficiente do que o superfosfato triplo no crescimento inicial da planta.

A dose de máxima responsividade de fósforo para a produção de biomassa de soja foi de 297 mg kg⁻¹ de P, com a aplicação do fosfato monoamônico. Este resultado permitiu escolher a dose de 100 mg kg⁻¹ de P como a ideal para ser aplicada ao Latossolo Vermelho distroférrico utilizado.

A calagem excessiva atuou como um fator limitante, comprometendo a eficiência do fosfato monoamônico e reduzindo a biomassa e absorção de nutrientes pelas culturas.

O modelo quadrático com raiz quadrada demonstrou ser o ajuste estatístico mais adequado dentre os modelos testados para descrever a curva de resposta das culturas à fertilização fosfatada nas condições experimentais de casa de vegetação avaliadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOVISI, A.M.T. *et al.* Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v.22, e.00298, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020918-932>. Acesso em: 28 mai. 2024.

ALVAREZ, V. *et al.* **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª ed. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

AMARASIRI, S. L.; OLSEN, S. R. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 37, n. 5, p. 716-721, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700050026x>. Acesso em: 28 mai. 2024.

BLOOM, A. J. *et al.* Nitrogen assimilation and yield of maize and grain sorghum, **Crop Science**, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000012>. Acesso em: 28 mai. 2024.

CASSMAN, K. G.; WHITNEY, A. S.; STOCKINGER, K. R. Nitrogen nutrition of soybean: I. Effect of N supply on plant growth and nitrogen fixation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1157-1164, nov./dec. 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060028x>. Acesso em: 28 mai. 2024.

CHATTERJEE, N.; LI, C.; MARGENOT, A. J. 33P-isotope labelling ammonium phosphate fertilizers reveals majority of early growth maize phosphorus is soil-derived. **European Journal of Soil Science**, 75(5), e13578, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.13578>. Acesso em: 28 mai. 2024.

CHIA, J. C. *et al.* Copper connections: coordinating transport, sensing and systemic signalling in plants. **Quant Plant Biol**. 2025. Nov 18;6:e36. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/qpb.2025.10027>. Acesso em: 28 mai. 2024.

CHIEN, S. H., PROCHNOW, L. I., TU, S., & SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 89(2), 229-255. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>. Acesso em: 28 mai. 2024.

COSTA, M. M. M. N. Fixação biológica de nitrogênio: uma revisão. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2023. **Documentos / Embrapa Algodão**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1145149>. Acesso em: 28 mai. 2024.

COLWELL, J. D.; GOEDERT, W. J. Substitution rates as measures of the relative effectiveness of alternative phosphorus fertilizer. **Fertilizer Research**. 15, 163–172. 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01050678>. Acesso em: 28 mai. 2024.

COLWELL, J. D. The estimation of phosphorus fertilizer requirements of wheat in southern New South Wales by soil analysis. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 3(10), 190–197, 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/EA9630190>. Acesso em: 28 mai. 2024.

- DIAS, R. C. *et al.* Curvas de resposta do milho à adubação potássica obtidas através de experimento fatorial. **Revista Agrária Acadêmica**, v.5, n.2, 2022 Disponível em: <https://doi.org/10.32406/v5n2/2022/35-49/agrariacad>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- DEVAU, N. *et al.* Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 75, n. 10, p. 2980-2996, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.034>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- DOYDORA, S. *et al.* Accessing Legacy Phosphorus in Soils. **Soil Systems**, 4, 74, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040074>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- ENESI, R.O. *et al.* Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability – a meta-analysis. REVIEW article. **Frontiers in Agronomy**, Sec. Plant-Soil Interactions. v.05, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming for Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**, v. 99, p. 345-399, 2008. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0). Acesso em: 28 mai. 2024.
- FIDALSKI, J; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.235-247, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200009>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- FONTES, J. R. A. *et al.* O enxofre no solo. In: **Fertilidade do Solo**. 4^a ed. Viçosa, MG: SBCS, 2020.
- FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em latossolos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1907-1914, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600015>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- HAVLIN, J. L. *et al.* **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**. 8^a ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014.
- HAYNES, R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils: a critical review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 68, n. 3, p. 289-308, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02197935>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1013351617532> . Acesso em: 28 mai. 2024.
- HU, Z. *et al.* Modeling of Phosphorus Nutrition to Obtain Maximum Yield, High P Use Efficiency and Low P-Loss Risk for Wheat Grown in Sandy Calcareous Soils. **Agronomy**, v. 11, n. 10, 1950, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11101950>. Acesso em: 28 mai. 2024.

HUNGRIA, M. *et al.* Nitrogen fertilisation in soybean: a meta-analysis of field studies in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, n. 2-3, p. 155-166, Aug. 2006. Disponível em: <https://doi: 10.1016/j.fcr.2006.01.005>. Acesso em: 28 mai. 2024.

HUNTER, M. A. *et al.* The spatial distribution of soil nitrogen determines responses of Sorghum bicolor to banded phosphorus fertiliser. **Crop & Pasture Science**, 75, CP24256, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/CP24256>. Acesso em: 28 mai. 2024.

JING, J. *et al.* Localized application of phosphorus and ammonium improves growth and phosphorus uptake of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. **Field Crops Research**, 119(2-3), 355-364. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.005>. Acesso em: 28 mai. 2024.

LAURENT, C. *et al.* Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. **Science of The Total Environment**, v. 709, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135927>. Acesso em: 28 mai. 2024.

LIU, J., WANG, H., PENUELAS, J. *et al.* Global-scale prevalence of low nutrient use efficiency across major crops. **Nature Communications**, 16, 11036, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66019-w>. Acesso em: 28 mai. 2024.

MALLARINO, A. P.; BLACKMER, A. M. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, 84(5), 850-856, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400050017x>. Acesso em: 28 mai. 2024.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants** 3^a ed. New York: Academic press, 2012.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994.

MENEZES-BLACKBURN, D. *et al.* Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. **Plant and Soil**, v. 427, p. 5-16, 2018. Disponível em: <https://10.1007/s11104-017-3362-2>. Acesso em: 28 mai. 2024.

MIRANDA, V.; LI, C. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Diamantina, 2024. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) -- Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Programa de PósGraduação em Produção Vegetal, Diamantina, 2023.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOREIRA, S. G.; DE LIMA, E. V.; MORAES, L. A. C.; FONSECA, S. E. D.; FONTES, J. R. A. Calagem na superfície em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, e0160241, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100008>. Acesso em: 28 mai. 2024.

NOVAIS, R. F., & SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/2024/01/30/fertilidade-do-solo-sociedade-brasileira-de-ciencia-do-solo/>. Acesso em: 28 mai. 2024

OLEGO, M. Á. et al. Laboratory Extractions of Soil Phosphorus Do Not Reflect the Fact That Liming Increases Rye Phosphorus Content and Yield in an Acidic Soil. **Plants**, *11*, 2871, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11212871>. Acesso em: 28 mai. 2024.

OLEGO, M. A. *et al.* Effects of overliming on the nutritional status of grapevines with special reference to micronutrient content. **Oeno One**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 57–73, 2021. DOI: 10.20870/oenone.2021.55.2.4081. Disponível em: <https://oenone.eu/article/view/4081> . Acesso em: 13 mar. 2026.

OLIVEIRA, E. de L. *et al.* Mineralização e imobilização do enxofre em Latossolos e Podzólicos sob diferentes tratamentos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 617-624, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900019>. Acesso em: 28 mai. 2024.

PAVINATO, P. S. *et al.* Legacy soil phosphorus bioavailability in tropical and temperate soils: Implications for sustainable crop production. **Soil and Tillage Research**, vol 244, December 2024, 106228. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106228>. Acesso em: 28 mai. 2024.

PENN, C. J., & CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability. *Soil Science Society of America Journal*, **Agriculture**, 83(6), 1514-1528, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>. Acesso em: 28 mai. 2024.

RAIJ, B. Van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2^a ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute. 2^a ed, 2011.

RAIJ, B. Van, *et al.* Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e compostado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, *33*, 355-360. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.1021>. Acesso em: 28 mai. 2024.

ROSOLEM, C.A. *et al.* The Joint Application of Phosphorus and Ammonium Enhances Soybean Root Growth and P Uptake. **Agriculture**, *12*, 880, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12060880>. Acesso em: 28 mai. 2024.

ROY, E. D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, *2*(5), 16043, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.43>. Acesso em: 28 mai. 2024.

SALVAGIOTTI, F., *et al.* Nitrogen fixation in high-yielding soybean: potential and limitations. **Field Crops Research**, Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280149651_Nitrogen_fixation_in_high_yielding_soybean_Glycine_max_L_Merr. Acesso em: 25 jul. 2025.

SANCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the tropics**. 6^a ed. New York: Cambridge University Press, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781316809785>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SANTNER, J.; KOSCHIN, D. J.; SCHWAB, A. P. Phosphorus forms in the rhizosphere and their availability to plants. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 5, p. 1150–1157, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0496>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SARKER, A. *et al.* Evaluation of Available Phosphorus by Soil Test Methods in an Acidic Soil Incubated with Different Levels of Lime and Phosphorus. **Open Journal of Soil Science**, v. 4, p. 103-108, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ojss.2014.43014>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SIMMS, T. *et al.* Soil profile distribution of nutrients in contrasting soils amended with struvite and other conventional phosphorus fertilizers. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, 7, e20524, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20524>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2^a ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUSA, D. M. G. de. *et al.* Manejo do fósforo na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. da (Ed.). **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado**. Goiânia: UFG, 2016. p. 291-358. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1061419/1/CT33.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Rome: FAO, 2008. **Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18**. Disponível em: <https://www.fao.org/4/a1595e/a1595e00.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TAMAGNO, S. *et al.* Nitrogen fertilizer application rates, timing, and sources affect soybean yield and nitrogen biological fixation. **European Journal of Agronomy**, 101, 10-18. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57008-y>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2^a ed. rev. e ampliada. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a ed. revista e ampliada. Brasília: Embrapa, 2017.

VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 90, n. 15, p. 2541-2547, dez. 2010. Disponível em: [https://doi: 10.1002/jsfa.4158](https://doi.org/10.1002/jsfa.4158). Acesso em: 25 jul. 2025.

WITHERS, P. J. *et al.* Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. **Environmental Science & Technology**, 48(12), 6523-6530, 2014. Disponível em: [https://doi: 10.1021/es501670j](https://doi.org/10.1021/es501670j). Acesso em: 25 jul. 2025.

ZHANG, L. *et al.* Effects of Long-Term Application of Nitrogen Fertilizer on Soil Acidification and Biological Properties in China: A Meta-Analysis. **Microorganisms**, 12, 1683, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081683>. Acesso em: 25 jul. 2025.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DA ACIDULAÇÃO E ADIÇÃO DE ENXOFRE ELEMENTAR SOBRE A EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS ORGANOMINERAIS À PARTIR DE CAMA DE AVIÁRIO

RESUMO

A agricultura brasileira enfrenta o desafio da dependência de fertilizantes importados, exigindo tecnologias mais eficientes e alternativas sustentáveis, como os fertilizantes organominerais (OMF), que permitem fazer a destinação ambientalmente adequada de resíduos potencialmente poluidores. Este estudo avaliou os efeitos da acidulação e adição de enxofre elementar (S^0) em OMF formulados com cama de aviário e fertilizantes fosfatados minerais solúveis sobre a produção de biomassa e acúmulo de nutrientes na parte aérea de plantas de soja e milho, além de investigar o efeito residual desses fertilizantes e mudanças na microbiota do solo. Conduziu-se um ensaio em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com 9 tratamentos e 4 repetições, em cultivo sequencial de soja, milho e *Urochloa*, com duração de 50 dias cada. Os tratamentos incluíram OMF formulados com monoamônio fosfato (MAP), acidulados com 0, 20 e 50g de ácido sulfúrico; OMF com superfosfato triplo (TSP), acidulados com 0, 30 e 80 g de ácido sulfúrico; um OMF com MAP + S^0 ; um fertilizante mineral puro (TSP); e um controle sem fósforo. A aplicação de fertilizantes fosfatados foi apenas prévia ao primeiro ciclo, para a avaliação do efeito residual dos tratamentos no segundo e terceiro cultivos. Além de peso seco e acúmulo nutricional, após o terceiro ciclo foram analisadas as propriedades químicas do solo por análises técnicas de rotina, e microbiota da rizosfera de *Urochloa* via PCR em tempo real. Os resultados mostraram que os OMF com menor acidulação ou com adição de S^0 , e o organomineral com TSP não acidulado, promoveram maior biomassa, enquanto os OMF com MAP que tiveram acidulação ou adição de S^0 e o OMF com TSP não acidulado resultaram em maior acúmulo de fósforo. Os organominerais tiveram desempenho equivalente ou superior ao mineral, destacando a eficácia da acidulação com ácido sulfúrico e adição de enxofre, e não afetaram a população de microrganismos relacionados à oxidação de amônia e resistência aos antibióticos testados, indicando serem fontes seguras para uso agrícola.

Palavras-chave: S^0 ; S-sulfato; Adubação fosfatada; *Glycine max* L.; *Zea mays*.

INFLUENCE OF ACIDULATION AND ELEMENTAL SULFUR ADDITION ON THE EFFICIENCY OF ORGANOMINERAL PHOSPHATE FERTILIZERS FROM POULTRY LITTER

ABSTRACT

Brazilian agriculture faces the challenge of dependence on imported fertilizers, requiring more efficient technologies and sustainable alternatives, such as organomineral fertilizers (OMF), which enable the environmentally appropriate disposal of potentially polluting waste. This study evaluated the effects of acidulation and the addition of elemental sulfur (S^0) in OMFs formulated with poultry litter and soluble mineral fertilizers on biomass production and nutrient accumulation in the shoots of soybean and maize plants, in addition to investigating the residual effect of these fertilizers and changes in the soil microbiota. A greenhouse trial was carried out, in a completely randomized design, with 9 treatments and 4 replications, in sequential crops of soybean, maize and *Urochloa*, each lasting 50 days. Treatments included OMFs formulated with monoammonium phosphate (MAP), acidulated with 0, 20 and 50g of sulfuric acid; OMFs with triple superphosphate (TSP), acidulated with 0, 30 and 80 g of sulfuric acid; an OMF with MAP + S^0 ; a pure mineral fertilizer (TSP); and a control without phosphorus. Phosphate fertilizers application occurred only prior to the first cycle, to evaluate the residual effect of the treatments on the second and third crops. In addition to dry weight and nutritional accumulation, soil chemical properties and the rhizosphere microbiota of *Urochloa* were analyzed after the third cycle. Soil chemical properties were measured using conventional analytical techniques, whereas the rhizosphere microbiota was analyzed by real-time PCR. The results showed that OMFs with lower acidulation or with the addition of S^0 , and the non-acidulated organomineral with TSP, promoted higher biomass, while OMFs with MAP that had acidulation or addition of S^0 , and non-acidulated OMF with TSP resulted in greater phosphorus accumulation. Organominerals performed equivalently or superiorly to mineral fertilizer, highlighting the effectiveness of acidulation with sulfuric acid and sulfur addition, and did not affect the population of microorganisms related to ammonia oxidation and resistance to the tested antibiotics, indicating they are safe sources for agricultural use.

Keywords: S^0 ; S-sulfate; phosphate fertilization; *Glycine max* L.; *Zea mays*.

1 INTRODUÇÃO

Assim como ocorre em grande parte do mundo, a maior parte do fósforo (P) utilizado na agricultura brasileira é aplicado na forma de monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (TSP) (IFA, 2021). Muitas tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes minerais e viabilizar a utilização de novas fontes de nutrientes, atrelando ao enfoque ambiental. Como exemplo, tem-se os fertilizantes organominerais (OMF) que podem melhorar a eficiência de uso de P e utilizar como matéria-prima fontes potencialmente poluidoras, como a cama de aviário (Vieira *et al.*, 2023; Benites *et al.*, 2022).

A agricultura e o escoamento urbano são fontes de resíduos não pontuais que causam uma série de impactos ambientais como a poluição das águas, a emissão de metano (CH₄) e de outros gases tóxicos. Nos Estados Unidos (EUA), mais de 70 % da poluição dos cursos d'água provém dessa origem (United States Environmental Protection Agency, 2024). No Brasil esse tipo de resíduo também gera um grande desafio ambiental, mais difícil de rastrear e tratar do que a poluição industrial.

A produção mundial de carne de aves é de 142 milhões de toneladas, sendo China, EUA e Brasil os maiores produtores, respondendo juntos por aproximadamente 45% do total, de acordo com a FAO (Ritchie *et al.*, 2023). Como um dos expoentes nesse segmento, o Brasil produz cerca de 14,97 milhões de toneladas de carne aviária, gerando milhares de toneladas de cama de aviário anualmente, rica em nutrientes, sobretudo N, P e K. Assim, esse material tem sido estudado e utilizado na produção de fertilizantes, para trazer não apenas o benefício nutricional para a planta e melhoria potencial da saúde do solo, mas também fazer a destinação correta de resíduo orgânico poluente, prestando um serviço ambiental.

O Plano Nacional de Fertilizantes estabelecido pelo Decreto n. 10.991 de 2022, com alterações realizadas pelo Decreto n. 11.518, de 2023, teve como o objetivo reduzir a dependência brasileira de importações de insumos, que ultrapassa 85% do consumo nacional, através do fortalecimento de políticas de incremento da competitividade da produção e distribuição de fertilizantes no país, visando atender às demandas agrícolas de forma sustentável até 2050. Dentre as diretrizes do plano, tem-se o estímulo ao ambiente de inovação para novos produtos e tecnologias usando novas fontes de nutrientes para as plantas de maneira diversa, competitiva e sustentável (BRASIL, 2023). Em solos com elevada capacidade de adsorção de P, uma das vantagens dos fertilizantes organominerais sobre as fontes minerais reside na maior eficiência de uso do nutriente pelas plantas. Os compostos orgânicos presentes na formulação

podem atuar reduzindo a fixação do P na fase mineral do solo, o que amplia sua disponibilidade para absorção, sobretudo nos estádios iniciais de desenvolvimento das culturas (Fernandes *et al.*, 2015). Além disto, o P contido na fração orgânica do OMF necessita ser mineralizado para se tornar disponível às plantas. A mineralização, em condições naturais, ocorre mais lentamente, compatível ao acréscimo da demanda de fósforo pela cultura (Vieira *et al.*, 2023). Estudos reportaram o aumento no conteúdo de P na massa seca de milho através da adubação com organominerais (Kiehl, 2010; Sakurada *et al.*, 2016, Benites *et al.*, 2020).

A adição de enxofre elementar (S^0) ou ácido sulfúrico (H_2SO_4) em fertilizantes organominerais fosfatados constitui estratégia tecnológica que pode aumentar a solubilidade de nutrientes, mas exige investigação para equilibrar a eficiência agrônômica com a sustentabilidade do solo. O S^0 é oxidado no solo por bactérias, formando H_2SO_4 que acidifica a região próxima ao grânulo e diminui a fixação do P em solos tropicais ácidos (Degryse *et al.*, 2020). Já o H_2SO_4 adicionado diretamente aumenta a solubilidade imediata do P e acelera a liberação do nutriente da parte orgânica da cama de aviário (Castro *et al.*, 2026; Kopp *et al.*, 2023).

Essas mudanças podem elevar a eficiência do uso de P, fornecer enxofre, além de mobilizar micronutrientes (Taskin *et al.*, 2025), e podem beneficiar a microbiota do solo, resultando em maior produção de biomassa e melhor efeito residual. Por isso, estudar essas adições em fertilizantes organominerais à base de cama de aviário é importante para desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis, alinhadas ao Plano Nacional de Fertilizantes.

Objetivou-se com este trabalho avaliar a influência da acidificação e adição de S^0 em OMF à base de fertilizantes fosfatados minerais solúveis e cama de aviário, sobre a produção de biomassa e acúmulo de nutrientes na parte aérea de plantas de soja e milho, bem como verificar o efeito residual dos fertilizantes e mudanças na microbiota do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no município de Rio Verde – Goiás, em casa de vegetação da Universidade de Rio Verde (UniRV), entre os meses de outubro de 2024 até junho de 2025. Durante o período experimental, as condições ambientais internas foram controladas por um sistema de resfriamento evaporativo do tipo *Pad-Fan*. O acionamento foi automatizado por um

controlador digital acoplado a um termo-higrômetro, programado para manter a temperatura do ar abaixo de 32,5 °C e a umidade relativa inferior a 80 %.

Vasos plásticos, com capacidade de 4 L, contendo 3 kg de solo seco ao ar foram utilizados como unidades experimentais. O solo foi coletado na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, com baixo teor de fósforo disponível, provenientes de área de mata nativa no Campus Rio Verde da UniRV, com as seguintes coordenadas geográficas: 17°47'11'' S e 50°57'58'' W. Após coletado, o solo foi seco ao ar, tamizado com peneira de abertura de malha de 4 mm e incubado com calcário na dose de 1,28 g dm⁻³, calculado pelo método da saturação por bases para elevar esse índice a 70 % (Raij *et al.*, 1996), para a correção do pH (Tabela 4).

TABELA 4 - Análise textural e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distroférico

pH		M.O.	P ^{1/}	K ^{2/}	Ca ^{2/}	Mg ^{2/}	H+Al	Al ^{2/}	S.B.	T
CaCl ₂	H ₂ O	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----						
5,8	6,2	18,0	4,2	0,16	2,44	1,45	2,11	0,05	4,1	6,21
V	B ^{3/}	Cu ^{4/}	Fe ^{4/}	Mn ^{4/}	Zn ^{4/}	S ^{5/}	Areia	Silte	Argila	
%		-----mg dm ⁻³ -----							-----g kg ⁻¹ -----	
65,8	0,35	1,4	75,3	37,3	1,5	8,5	530	100	370	

^{1/} Mehlich 1; ^{2/} NH₄Cl; ^{3/} Água quente; ^{4/} DTPA; ^{5/} Fosf. de cálcio.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por nove tratamentos e quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em seis formulações organominerais à base de cama de aviário, associadas a MAP (OM) ou TSP (OT), sob três níveis distintos de acidulação para cada fonte fosfatada, além de uma formulação específica com cama de aviário e MAP enriquecida com enxofre elementar (OMS⁰) (Tabela 5). Para fins de comparação, foram adicionados um controle mineral (TSP) e uma testemunha absoluta (sem adubação).

TABELA 5 - Composição dos fertilizantes organominerais testados

	OM1	OM2	OM3	OT1	OT2	OT3	OMS ⁰
	-----g kg ⁻¹ -----						
Cama de frango (peso seco)	670	650	620	630	600	550	620
Fosfato monoamônico	300	300	300	0	0	0	300
Superfosfato triplo	0	0	0	340	340	340	0
Óxido de magnésio	30	30	30	30	30	30	30
Ácido sulfúrico	0	20	50	0	30	80	0
Enxofre elementar	0	0	0	0	0	0	50
Água	280	260	230	300	250	20	150

Os fertilizantes organominerais foram produzidos no laboratório da Embrapa Solos. A cama de frango foi seca em estufa a 60°C até peso constante, moída em misturador industrial e peneirada (60 mesh). Após a secagem, determinou-se a umidade da cama de frango a 105°C, esta foi seca e homogeneamente misturada com fertilizante fosfatado solúvel (MAP ou TSP) e óxido de magnésio. Os fertilizantes granulados foram obtidos em disco peletizador com diâmetro de 40 cm e rotação de 20 rpm em ângulo de 38,2° com adição manual de spray de água. Nos tratamentos em que aplicou-se ácido sulfúrico (H₂SO₄), este que foi diluído em água aspergida. Após a granulação os OMF foram secos a 60°C em estufa de circulação forçada de ar por 24 h e peneirados entre 2 e 4 mm. Os fertilizantes obtidos foram avaliados quimicamente de acordo com a concentração de nutrientes em sua composição e pH (Tabela 6).

TABELA 6 - Teor de nutrientes e pH dos fertilizantes

Fertiliz.	N	P _{total}	K ^{1/}	Ca ^{1/}	Mg ^{1/}	g kg ⁻¹						pH
						S ^{2/}	Mn ^{1/}	Zn ^{1/}	Cu ^{1/}	B	Fe ^{1/}	
TSP	17,8	198,2*	1,3	142,4	5,5	19,4	0,9	0,3	0,1	0,4	16,9	3,0
OM1	49,9	90,4	22,6	24,6	16,1	9,3	0,7	0,3	0,2	0,2	2,9	5,9
OM2	52,5	84,0	22,1	23,7	17,6	15,3	0,6	0,3	0,2	0,2	2,8	5,6
OM3	49,7	81,6	21,9	23,0	16,9	31,2	0,6	0,3	0,2	0,3	2,8	5,0
OT1	48,0	85,1	22,5	24,5	17,1	7,6	0,6	0,3	0,2	0,3	2,3	5,7
OT2	49,2	85,1	21,0	23,8	16,3	14,3	0,5	0,3	0,2	0,3	2,5	5,2
OT3	49,2	79,5	21,7	23,5	16,2	29,5	0,5	0,3	0,2	0,2	2,5	4,9
OMS ⁰	45,3	81,9	21,7	21,6	16,6	68,2	0,5	0,3	0,2	0,3	2,3	5,8

^{1/}HNO₃ + HClO₄; ^{2/} sol. em Água. * P sol. em CNA+Água.

Realizou-se cultivo sucessivo utilizando como plantas indicadoras: soja (cultivar Aporé – HO), milho (híbrido K7510 – KWS) e *Urochloa ruziziensis*. Os fertilizantes fosfatados foram incorporados uniformemente ao solo antes da semeadura da soja, com rega após à aplicação, sem reaplicar os tratamentos no segundo e terceiro ciclo de cultivo, para verificar o efeito residual. A *Urochloa* foi cultivada com a finalidade de promover o esgotamento de P, permitindo avaliar a extração do nutriente remanescente no solo após os cultivos anteriores. A etapa também permitiu a amostragem da rizosfera para investigar o efeito residual dos tratamentos sobre a microbiota do solo após o ciclo da *Urochloa*. As doses dos fertilizantes foram calculadas para o fornecimento de 100 mg kg⁻¹ de P, a partir dos valores de P total das amostras, segundo Tabela 3.

Foram semeadas cinco sementes por vaso no 1º e 2º ciclo de cultivo (soja e milho) e quinze no 3º ciclo (*Urochloa*). As sementes de soja foram previamente inoculadas com produto comercial turfoso contendo uma associação das estirpes *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079) e *Bradyrhizobium diazoefficiens* (SEMIA 5080). A aplicação seguiu a dose recomendada para a cultura, assegurando a concentração mínima de 1×10^9 UFC g^{-1} , visando maximizar a nodulação e a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN), reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (Costa, 2023).

Cinco dias após a emergência das plântulas nos cultivos, realizou-se o desbaste – restando uma plântula por vaso no cultivo da soja e milho e quatro no cultivo da *Urochloa* – bem como aplicou-se 0,1 L por vaso de solução contendo todos os nutrientes, exceto fósforo, fornecido via tratamentos; e cálcio e magnésio, fornecidos via corretivo de solo.

As doses dos nutrientes por quilograma de solo seco foram: 130 mg kg^{-1} de nitrogênio (CH_4N_2O), 160 mg kg^{-1} de potássio (KCl), 40 mg kg^{-1} de enxofre ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), 4 mg kg^{-1} de zinco ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), 3,6 mg kg^{-1} de manganês ($MnSO_4 \cdot H_2O$), 1,5 mg kg^{-1} de ferro ($FeCl_3$), 1,3 mg kg^{-1} de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), 0,8 mg kg^{-1} de boro (H_3BO_3) e 0,15 mg kg^{-1} de molibdênio ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$) (Dias *et al.*, 2022). Durante todos os ciclos, a umidade do solo foi mantida entre 45 e 65% da porosidade total do solo, com pesagem dos vasos a cada dois dias.

Em todos os ciclos, após 50 dias de cultivo, a parte aérea das plantas foi coletada, armazenada em sacos de papel e transferida para estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingir peso constante. Determinou-se a produção de massa seca da parte aérea por meio de balança com precisão de $\pm 0,001$ g. As amostras foram moídas, digeridas em meio ácido (Tedesco *et al.*, 1995), e analisadas quanto à concentração de P e demais nutrientes no tecido vegetal. O acúmulo de cada nutriente (mg) foi calculado através da multiplicação da massa seca (g) pela concentração do nutriente ($mg\ g^{-1}$).

Concluído o último ciclo de cultivo com a *Urochloa*, amostras de solo foram coletadas para determinação do P residual (Teixeira *et al.*, 2017). Foi realizada a extração de DNA total do solo rizosférico da *Urochloa*, seguida da quantificação de genes microbianos específicos por PCR em tempo real (qPCR), feita com 2 réplicas técnicas por amostra biológica.

Para viabilizar a extração intacta do sistema radicular e a adequada adesão do solo rizosférico, os vasos foram previamente umedecidos com água deionizada no dia anterior à amostragem. Durante o procedimento de coleta, as plantas de *Urochloa* foram cuidadosamente removidas dos vasos e o solo não aderente às raízes foi descartado por meio de agitação manual suave. O solo firmemente aderido ao sistema radicular, em espessura de cerca de 1 a 5 mm,

considerado como solo rizosférico, foi então coletado. Para assegurar a assepsia e prevenir qualquer contaminação cruzada entre os tratamentos, todo o procedimento foi realizado utilizando-se luvas e materiais descartáveis, substituídos a cada amostra. Foram coletadas alíquotas de aproximadamente 10 mL de solo rizosférico por unidade experimental, acondicionadas em tubos tipo Falcon estéreis. As amostras foram dispostas em caixa térmica contendo gelo seco, imediatamente após cada coleta, visando interromper o metabolismo microbiano e evitar a degradação do material pela exposição à luz e variações de temperatura. Posteriormente, o material foi transportado e armazenado em ultrafreezer a -80 °C até a realização das análises. (Imagens 6 e 7 – Anexo 1).

O DNA total de cada amostra foi extraído de 500 mg de solo utilizando os kits DNeasy® PowerSoil® Pro Kit (QIAGEN) e MagicPure Soil Genomic DNA kit. Um total de 1.200 reações foram realizadas por qPCR para a quantificação do número de cópias de cada gene.

A eficiência agronômica relativa (EAR) foi calculada baseada nas médias da produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e para os acúmulos de macronutrientes dos cultivos de soja e milho, utilizando-se a seguinte fórmula como exemplo de cálculo baseado na biomassa para o tratamento com OM1: $EAR = [(Biomassa\ da\ soja\ OM1 - Biomassa\ da\ soja\ Controle) / (Biomassa\ da\ soja\ TSP - Biomassa\ da\ soja\ Controle)] * 100$. A eficiência relativa foi calculada somente quando as médias da biomassa ou acúmulo de nutrientes foram estatisticamente significativas.

2.1 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos aos testes de Bartlett e Shapiro-Wilk para à avaliação da homoscedasticidade das variâncias e normalidade da distribuição dos resíduos, respectivamente. Atendidos os pressupostos, foi realizada a análise de variância por meio do teste F. Constatada diferença entre os tratamentos qualitativos, os dados foram submetidos ao teste de Scott-Knott. Foi realizada a análise discriminante canônica para se ter uma figura comparativa que representasse todas as respostas das avaliações e suas interações entre si, unindo resultados de biomassa e acúmulo de nutrientes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Biomassa e acúmulo de nutrientes em soja e milho

O solo se mostrou responsivo ao fósforo, com produção de biomassa inferior no tratamento controle negativo em comparação aos demais (Figura 9). A natureza da fonte fosfatada (MAP ou TSP) utilizada na matriz não alterou a eficiência agrônômica relativa (EAR) dos fertilizantes organominerais e biomassa das culturas. Em média, os organominerais superaram o controle mineral, em produção de biomassa no cultivo de soja, com EAR em torno de 20% superior.

Essa superioridade corrobora com os achados de Benites *et al.* (2022), que observaram incrementos na eficiência do uso de P em soja fertilizada com fontes organominerais, o que pode ser explicado pelo papel da fração orgânica na dinâmica de P no solo. Outros estudos obtiveram resultados semelhantes, com um EAR 20% superior para o fertilizante organomineral, em relação ao mineral em milho (Grohskopf *et al.*, 2019) e 96% mais eficiente em cana-planta de primeiro ciclo (Crusciol *et al.*, 2020). A consistência nos dados reforçou a tese de que a tecnologia organomineral pode atuar como um fertilizante de eficiência aumentada, mitigando as perdas químicas inerentes às fontes solúveis puras, como o MAP e TSP (Frazão *et al.*, 2021; Mumbach *et al.*, 2019).

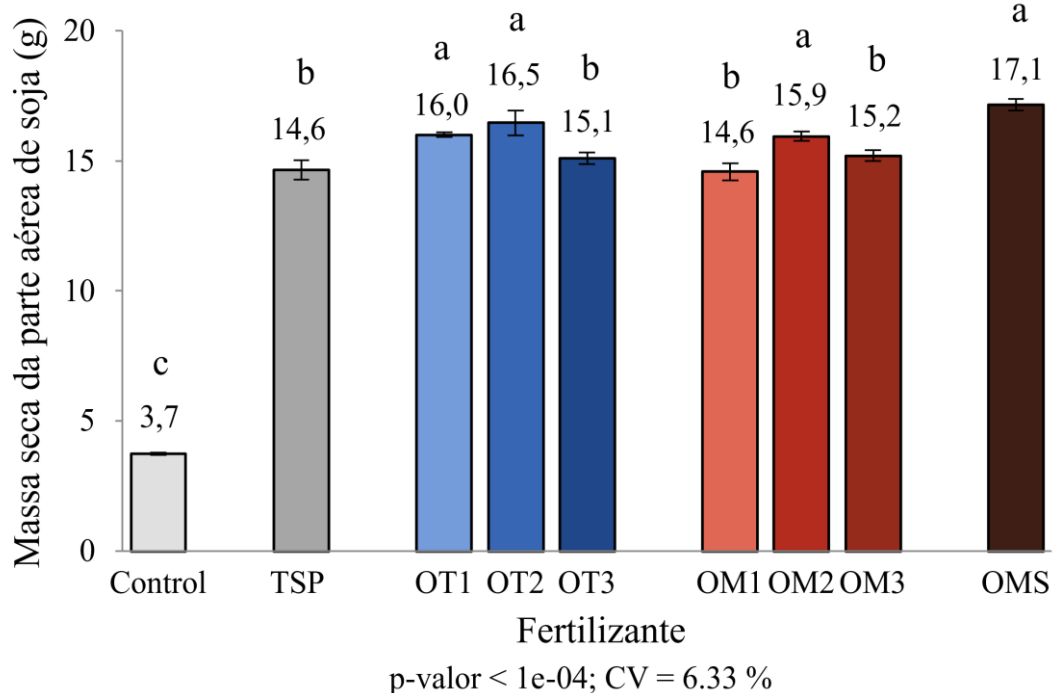


FIGURA 9 - Massa seca da parte aérea de soja (g) em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si. Barras verticais representam o erro padrão da média

Dentre as formulações, destacaram-se os organominerais produzidos à base de TSP – especificamente nos níveis sem acidulação e menor acidulação – que tiveram EAR 13,0% e 17,3% superior ao TSP puro, respectivamente, bem como o organomineral à base de MAP com menor acidulação, que obteve EAR 12% superior ao controle mineral. Esse resultado é sustentado pelos dados de Frazão *et al.* (2021), que encontraram superioridade de 11,35% a 15,35% em EAR baseada na massa seca para organominerais à base de MAP.

O grau de acidulação influenciou o desempenho agrônomo: organominerais com pH final $\leq 5,0$ tiveram eficiência inferior àqueles com pH situado na faixa entre 5,2 e 5,6 (Tabela 6). Esses dados sugerem que a acidulação excessiva, levando a pH $\leq 5,0$, resultou em menor eficiência agrônomo, o que pode estar relacionado a uma redução nos benefícios da matriz orgânica, aproximando o comportamento do produto ao da fonte mineral solúvel.

A maior produção de biomassa foi obtida com o OMF enriquecido com S⁰, sendo 23% mais eficiente do que o TSP na soja. Esse desempenho superior pode ser atribuído ao fornecimento de enxofre e ao efeito da acidificação localizada decorrente de sua oxidação,

mediada por microrganismos, que resulta na formação de SO_4^{2-} , a forma primária de enxofre absorvida pelas plantas.

Por muito tempo se relacionou a oxidação de S^0 no solo unicamente às bactérias do gênero *Thiobacillus*, mas trabalhos como o de Zhao *et al.* (2016), mostraram que outras bactérias e fungos têm a mesma capacidade. Chaudhary *et al.* (2023), listaram em sua revisão as diferentes bactérias e fungos com a habilidade de oxidar enxofre, incluindo bactérias do gênero *Acidithiobacillus*, *Thiobacillus* e bactérias heterotróficas como *Cytobacillus firmus*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter ludwigii*, *Klebsiella oxytoca*, *Phytobacter diazo trophicus* e *Pseudomonas stutzeri*.

Esse processo biológico é influenciado por fatores como temperatura, umidade e pH do solo, ocorrendo de forma mais eficiente em condições aeróbicas e temperaturas acima de 10°C , com taxas de conversão que podem variar de 1 a $10 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ em solos tropicais. A oxidação de S^0 libera prótons (H^+), promovendo acidificação localizada no solo, o que pode solubilizar formas de P ligadas a cátions como cálcio (Ca), convertendo-as em espécies mais disponíveis, como di-hidrogenofosfato (H_2PO_4^-). Esse efeito é particularmente relevante em OMF acidulados com H_2SO_4 , em que a acidificação parcial aumenta a solubilidade de P de fontes orgânicas, como a cama de aviário, sem comprometer excessivamente o pH do solo ou aumentar o risco de lixiviação de metais pesados (Espinoza *et al.*, 2023; Castro *et al.*, 2023; McLaughlin *et al.*, 2015).

No cultivo subsequente do milho, avaliado sob efeito residual de adubação, não houve variação estatística entre os fertilizantes. Observou-se, contudo, uma inversão de tendência: os tratamentos que promoveram os maiores acúmulos de biomassa na soja, notadamente o organomineral com S^0 , resultaram em menor biomassa no milho (Figura 10). Isso indica que a extração de nutrientes pela soja no primeiro ciclo de cultivo provavelmente contribuiu para a redução do P remanescente para a cultura sucessora.

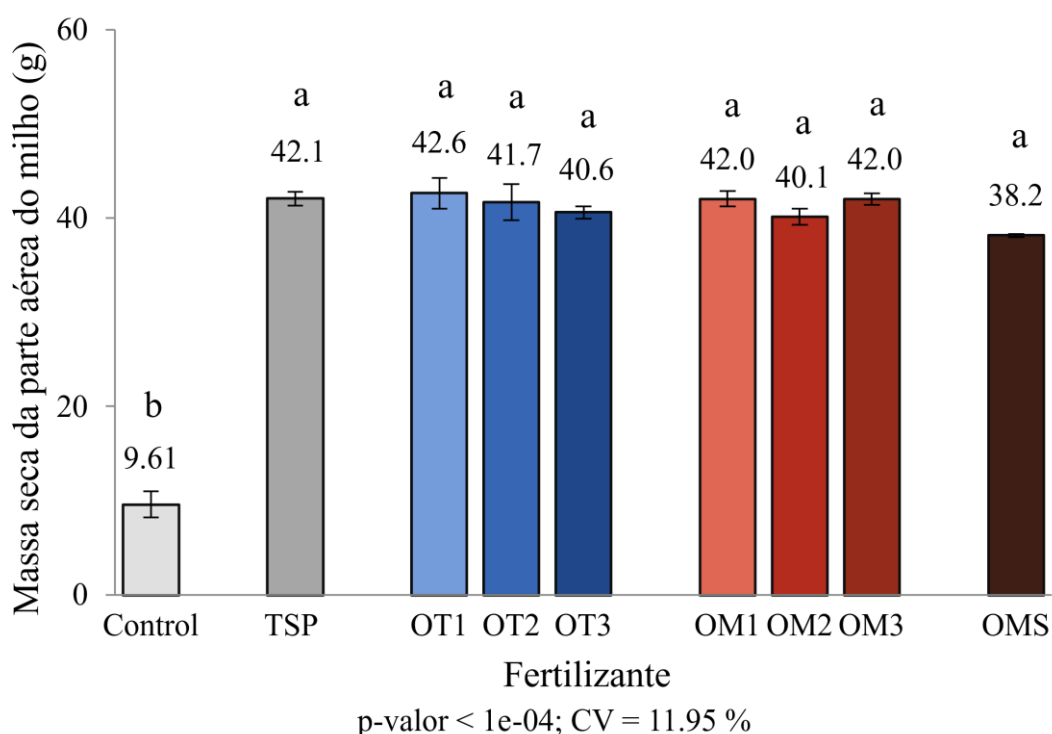


FIGURA 10 - Massa seca da parte aérea de milho (g) em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si. Barras verticais representam o erro padrão da média.

Todos os tratamentos com fertilização fosfatada foram superiores ao controle negativo em absorção de nutrientes. Para macronutrientes primários e secundários, os tratamentos com OMF resultaram em acúmulo maior na parte aérea das plantas de soja comparados ao fertilizante mineral puro (Figura 11). Em geral, entre os OMF avaliados, o formulado com MAP sem acidulação (OM1) resultou no menor acúmulo de nutrientes, embora similar ao TSP, enquanto os demais OMF (com acidulação ou adição de S⁰) exibiram massa seca e acúmulo de nutrientes maiores. Esse OM1, fertilizante organomineral com tecnologia padrão da Embrapa, já foi investigado em estudos prévios, demonstrando eficiência agrônômica em solos ácidos ferralíticos para reciclagem de P de cama de aviário, mas com limitações em liberação de nutrientes comparado a formulações aciduladas.

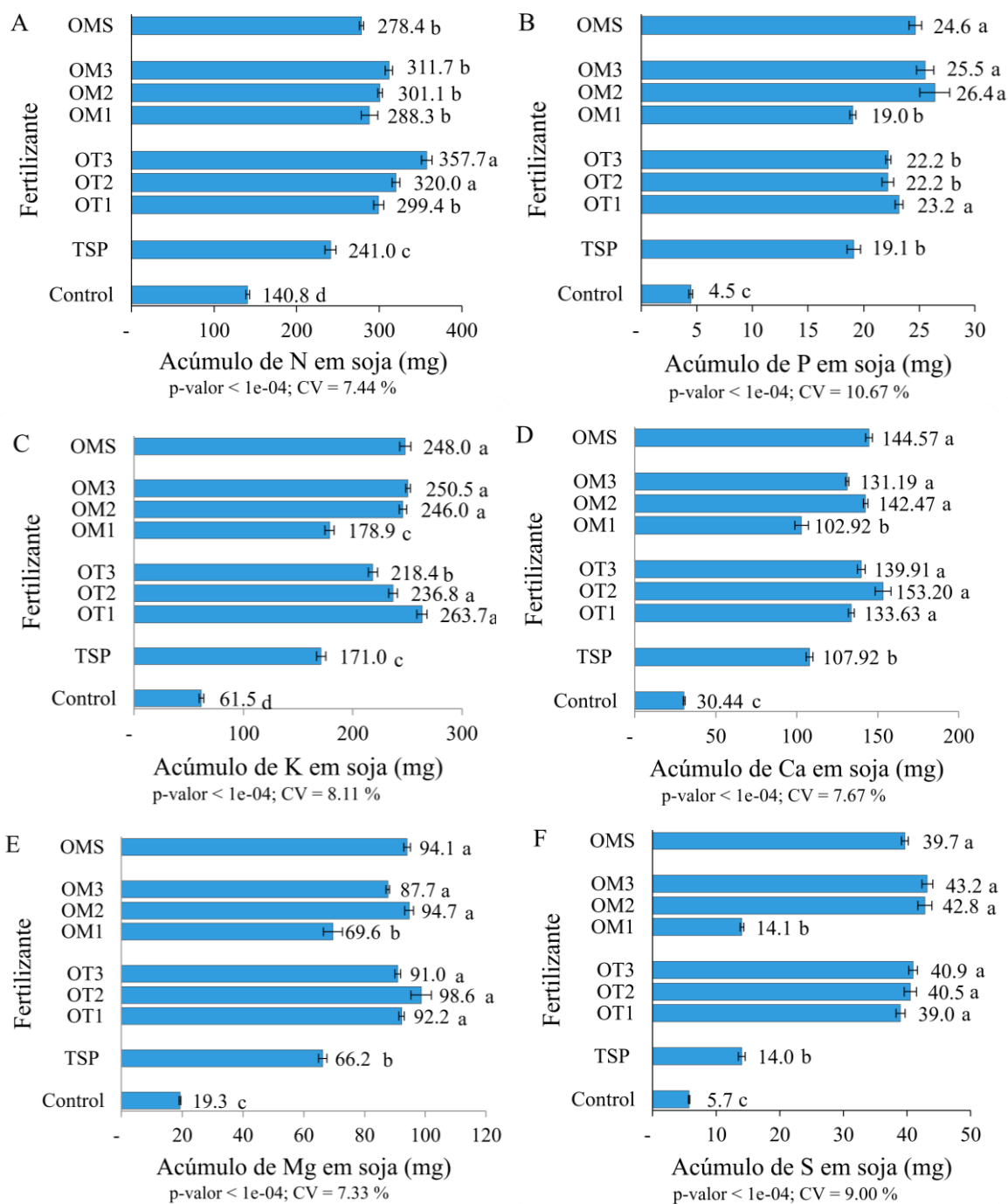


FIGURA 11 - Acúmulo de macronutrientes (mg) nas plantas de soja, em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT1(, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si. Barras horizontais representam o erro padrão da média.

Embora não se observou diferença entre as fontes minerais presentes nos OMF testados para a produção de biomassa, em relação à absorção de N e P houve diferença das fontes nos

OMF. Para o acúmulo de N, os organominerais com TSP e enxofre foram superiores (Figura 11 A). Essa superioridade pode ser atribuída à fisiologia da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Enquanto o MAP fornece N mineral, que pode atuar como inibidor temporário da nodulação e atividade da nitrogenase em leguminosas (Salvagiotti *et al.*, 2008; Hungria *et al.*, 2006), o tratamento com TSP é isento de N mineral, estimulando a simbiose obrigatória desde os estádios iniciais.

O TSP também aporta cálcio à formulação organomineral, que é um nutriente estrutural fundamental para a estabilidade da parede celular dos nódulos e sinalização na infecção via *Bradyrhizobium* (Yuan *et al.*, 2022; Zartdinova *et al.*, 2023; O'Hara, 2001). A combinação da matriz orgânica com Ca, P e S do TSP provê um ambiente rizosférico quimicamente mais estável e menos ácido do que a hidrólise amoniacal gerada pelo MAP, potencializando a eficiência da FBN e resultando em maior acúmulo final de N nos tecidos vegetais.

Já para o acúmulo de P, os organominerais com MAP e enxofre, elementar ou sulfato, se destacaram (Figura 11 B). Esse resultado sugere que a presença de N amoniacal (NH_4^+) no grânulo pode ter colaborado na acidificação da rizosfera e estimulado a absorção de P pelas raízes, ajudando no arranque inicial da planta (Marshner, 2012). Estudos encontraram que a matéria orgânica presente nos fertilizantes organominerais envolve o P mineral, evitando que ele entre em contato direto e imediato com os óxidos de ferro e alumínio, abundantes em solos tropicais. Essa matriz orgânica libera ácidos orgânicos de baixo peso molecular (como citrato, malato, oxalato) que competem diretamente com os íons fosfato pelos sítios de adsorção na superfície de óxidos de ferro e alumínio. Esse fenômeno bloqueia os sítios de fixação e forma complexos solúveis com os cátions metálicos Fe^{3+} e Al^{3+} , aumentando a eficiência de uso do P solúvel aplicado via OMF (Guppy *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2022).

Os fertilizantes com acidulação ou S^0 resultaram em maiores conteúdos de zinco (Zn), mostrando uma relação positiva entre S e Zn na soja (Figura 12 A). Isso indica que a liberação de H^+ do ácido sulfúrico e a oxidação do S^0 podem ter promovido uma acidificação localizada da rizosfera, favorecendo a disponibilidade de Zn^{2+} na solução do solo (Cui; Wang, 2005). Essa relação de facilitação foi corroborada por Khalili *et al.* (2024), que observaram aumentos na absorção de Zn em soja sob adubação sulfurada, atribuindo o efeito à maior atividade metabólica e alterações na rizosfera. De forma similar, em solos tropicais Vitti (1988), já demonstrava que o incremento nas doses de S alavancava os teores foliares de Zn, evidenciando que o manejo do enxofre é uma estratégia importante para maximizar a eficiência de micronutrientes. Os destaques em acúmulo de manganês (Mn) e boro (B) na soja foram o OMF com TSP e menor nível de acidulação e o OMF com S^0 (Figura 12 B e D).

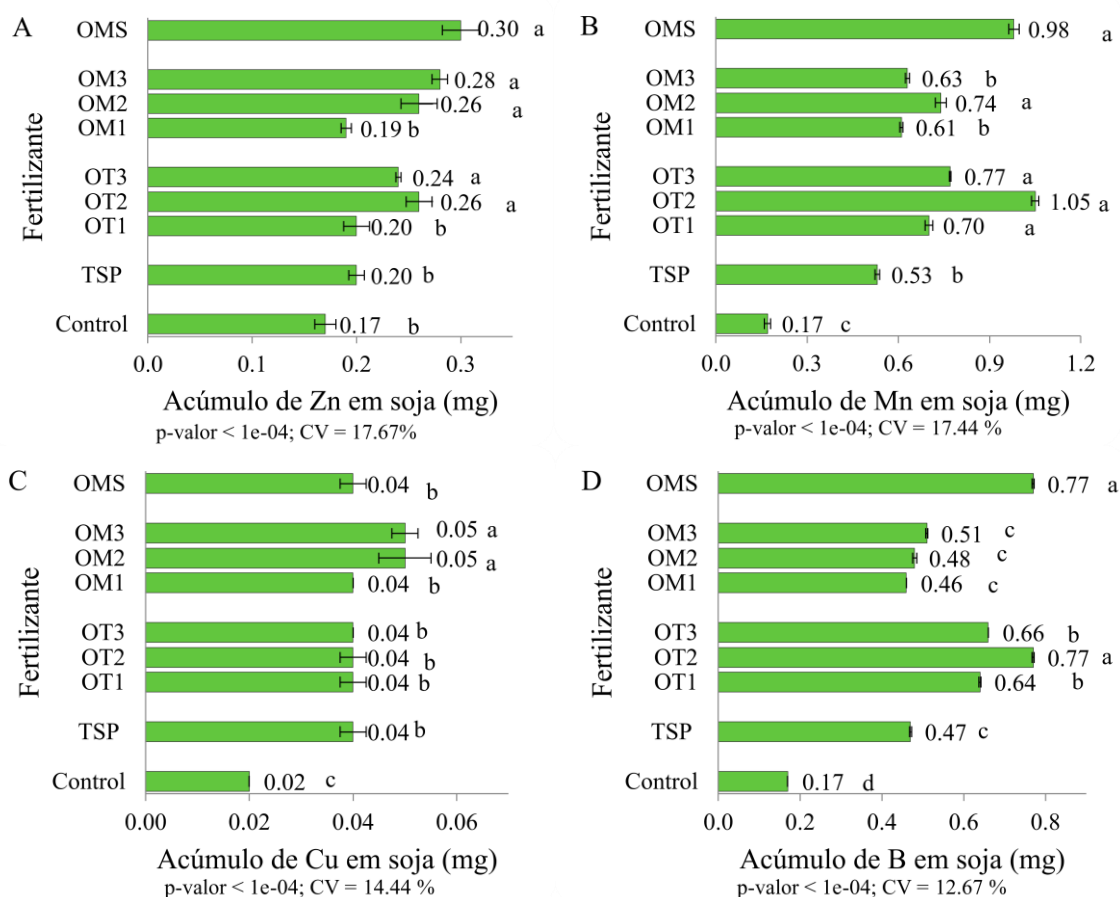


FIGURA 12 - Acúmulo de micronutrientes (Zn, Mn, Cu, B) (mg) nas plantas de soja, em resposta à aplicação dos fertilizantes. TSP, superfosfato triplo; OT(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de TSP em níveis ascendentes de acidulação; OM(1, 2, 3), fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico em níveis ascendentes de acidulação; OMS, fertilizante organomineral à base de fosfato monoamônico e enxofre elementar. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si. Barras horizontais representam o erro padrão da média.

Para integrar as variáveis agrônômicas, procedeu-se à análise discriminante canônica (ADC), visando identificar os parâmetros com maior poder de distinção entre as fontes fosfatadas na cultura da soja. Essa análise multivariada foi concentrada nos dados do cultivo da soja por este representar o efeito imediato das fontes fosfatadas, onde as maiores amplitudes de resposta agrônômica foram observadas, permitindo discriminação clara entre as tecnologias avaliadas, diferentemente do cultivo do milho, sob efeito residual dos tratamentos, em que as variáveis isoladas não se diferenciaram.

O resultado da ADC destaca o papel do S na eficiência agrônômica dos fertilizantes organominerais derivados de cama de aviário testados em soja (Figura 13). A dominância do acúmulo de S na variável canônica 1, que se correlaciona também, com o acúmulo de P e outros nutrientes, sugere que o S⁰ atua não apenas como nutriente, mas como facilitador da

solubilização e disponibilidade de P, possivelmente por meio de mecanismos como a acidulação via H_2SO_4 e oxidação microbiana de S^0 .

Essa acidulação parcial promove a conversão de formas insolúveis de P nos compostos orgânicos na cama de aviário, em espécies solúveis, como $H_2PO_4^-$, aumentando a absorção radicular. Isso explica a similaridade entre os OMF enriquecidos com S no gráfico de análise canônica, que promoveram maior biomassa e acúmulo de P. Kopp *et al.* (2023), mostraram que a acidificação de cinzas ricas em P – análogas à cama de aviário – com ácido sulfúrico aumentou a recuperação de P em até 35 vezes, sem elevar a lixiviação de metais pesados ou alterar drasticamente o pH do solo, alinhando-se aos resultados de maior biomassa nos tratamentos com menor acidulação ou S^0 aqui. Outro estudo avaliou fertilizantes à base de cinzas de esterco de aves acidificados com H_2SO_4 e H_3PO_4 , revelando otimização na solubilidade de P e nutrição mineral em alface e milho, com efeitos positivos na massa seca e acúmulo de nutrientes, corroborando com a equivalência ou superioridade dos OMF ao TSP analisadas neste estudo (Taskin *et al.*, 2025).

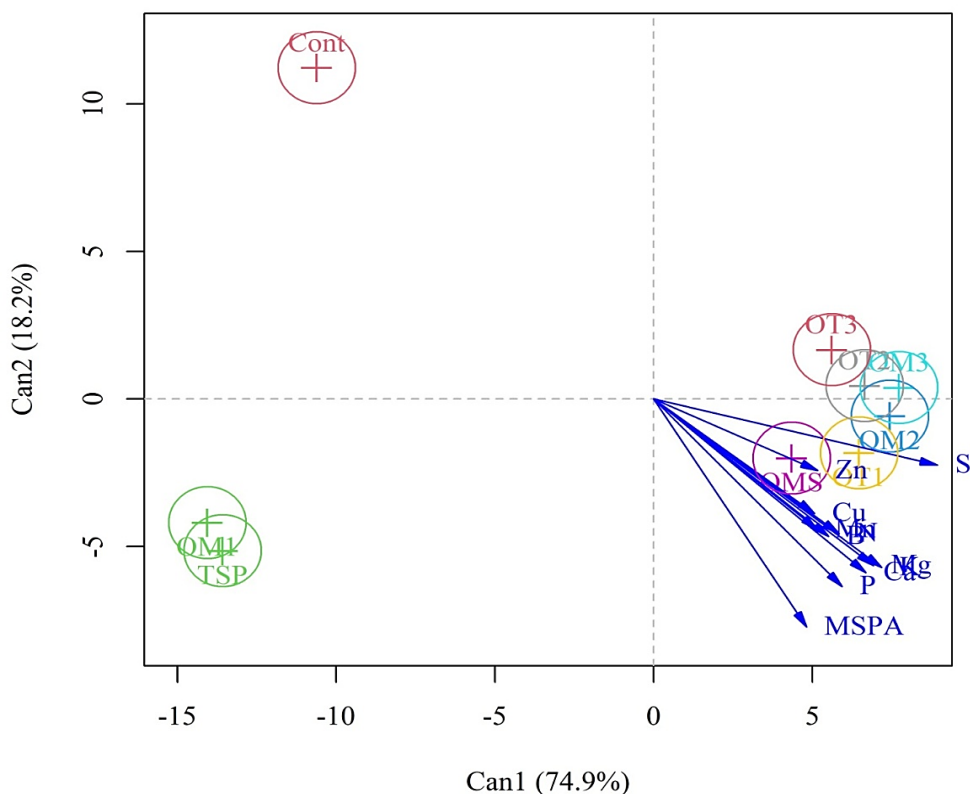


FIGURA 13 - Biplot da análise discriminante canônica mostrando escores de tratamento associados aos fertilizantes organominerais, superfosfato triplo (TSP) e controle sem aplicação de fósforo (Cont). Setas representam cargas canônicas de variáveis de resposta da soja, incluindo massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Cu e Zn).

A separação extrema do controle sem P reforça a deficiência generalizada em solos tropicais, onde a ausência de fertilização leva a limitações nutricionais cumulativas. O TSP teve desempenho inferior aos OMF com sulfato ou S^0 , possivelmente devido à total solubilidade do TSP, com liberação rápida e possíveis perdas por lixiviação, contrastando com a liberação mais lenta dos nutrientes contidos na matriz orgânica nos OMF.

Em comparação com fertilizantes minerais, Uddin *et al.* (2025), salientaram em uma revisão que OMF de cama de aviário liberam nutrientes lentamente, reduzindo perdas por lixiviação e emissões de gases de efeito estufa, enquanto aumentam a eficiência agrônômica de milho em até 20%, similar ao desempenho superior do OMF com TSP não acidulado e do OMF com S^0 no presente trabalho. Outra pesquisa encontrou efeitos sinérgicos entre esterco de aves e rocha fosfática, elevando a disponibilidade de P no solo e produção de gramíneas, mas com antagonismo em absorção de P em altas doses, o que pode explicar por que tratamentos com acidulação excessiva não superaram os com doses moderadas (Poblete-Grant *et al.*, 2019).

A revisão de Chaudhary *et al.* (2023), reforçou o entendimento sobre o ciclo microbiano de S, em que microrganismos oxidam S^0 para sulfato, melhorando a fertilidade e produtividade em culturas como soja e milho, o que explica a similaridade entre os OMF enriquecidos aqui.

Em síntese, a análise discriminante canônica não só enfatiza a eficácia dos OMF fosfatados com enxofre como é uma alternativa sustentável aos fertilizantes minerais convencionais, mas também se alinha a evidências globais de que tais estratégias promovem sinergias nutricionais e performance produtiva competitiva para as culturas avaliadas.

É fundamental ressaltar que este estudo foi conduzido em vasos, abrangendo até a fase reprodutiva intermediária das plantas de soja (R4) e fase vegetativa do milho (V7/V8), sem completar o ciclo produtivo. Experimentos em vasos, embora úteis para controlar variáveis e avaliar respostas iniciais, apresentam limitações como restrição radicular, homogeneidade artificial do solo e ausência de interações ambientais reais (ex.: variações climáticas, pragas e competição), o que pode superestimar ou subestimar respostas nutricionais em comparação a ensaios de campo.

Assim, plantas bem nutridas nos tratamentos com OMF podem se traduzir em maior produtividade em condições de campo, onde o ciclo completo permite a alocação de nutrientes para grãos. Estudos de longo prazo em campo são recomendados para validar essas expectativas, alinhando-se com as evidências de que OMF aumentam o rendimento de soja e milho em até 20% em sucessões agrícolas, promovendo sustentabilidade e redução na dependência de fertilizantes importados.

3.2 Fertilidade do solo após o experimento

Em geral, o solo não apresentou variações em relação ao teor de nutrientes após os três cultivos sucessivos (soja-milho-*Urochloa*), indicando que as condições experimentais adotadas e fornecimento de solução contendo nutrientes, foi suficiente para manter a fertilidade natural do solo.

Em relação ao P residual no solo pela análise feita após a coleta da *Urochloa*, demonstrou-se que as fontes fosfatadas foram eficientes para fornecer P ao solo, elevando o nível original de 4.2 mg dm⁻³ para 19.4 mg dm⁻³. Não houve diferença em residual de P entre as fontes. Um estudo com milho cultivado em vasos por quatro ciclos consecutivos mostrou que, nos últimos ciclos, o fertilizante organomineral promoveu maior disponibilidade de P e recuperação pelo solo do que a fonte mineral granulada, indicando efeito residual superior (Sakurada *et al.*, 2016). Em outro experimento de campo com três safras consecutivas de milho em um Nitossolo (*Rhodic Khandiudox*), não houve diferença entre o OMF e o mineral (MAP) nos níveis finais de P no solo (Grohskopf, 2019). Já em relação ao K, o residual no solo das parcelas com fertilização fosfatada foi inferior ao valor original, indicando que a quantidade de K aplicada via solução foi insuficiente para repor este nutriente ao solo após a extração pelas plantas (Tabela 7).

TABELA 7 - Propriedades químicas do solo antes da instalação do experimento, do tratamento controle sem adubação fosfatada, ao final do experimento, e dos tratamentos com adubação fosfatada

	pH	Ca	Mg	Na	K*	P*	H+Al	SB	T	V	C.O.
	<i>H₂O</i>	-- <i>cmol_c dm⁻³</i> --			<i>mg dm⁻³</i>		<i>cmol_c dm⁻³</i>			%	<i>g kg⁻¹</i>
Original.	6,2	2,4	1,5	ND	62,6	4,2	2,1	4,1	6,2	65,8	10,4
Controle final (n=4).	6,3	2,6	2,3	7,2	44,7	2,6	2,4	5,3	7,6	69,1	8,6
Solo fertilizado (n=32).	6,4	2,8	2,2	9,2	29,1	19,4	2,1	5,1	7,2	70,7	8,7

* p < 0,01; ND = não determinado.

Todos os tratamentos resultaram em altos teores residuais de micronutrientes no solo, de acordo com manuais referência de interpretação da análise de solo (Sousa; Lobato, 2004; Ribeiro *et al.*, 1999; Horneck *et al.*, 2019). Alguns tratamentos com organominerais resultaram em maior teor residual de micronutrientes ao final do experimento (Figura 14).

Todos os OMF resultaram em maior residual de Mn no solo, com valores ligeiramente superiores ao TSP e controle. Para cobre, os maiores residuais foram relativos aos dois OMFs

com maior nível de acidulação. A alta variação no teor de Zn entre as parcelas de cada tratamento não permitiu identificar diferença entre eles, podendo-se verificar apenas uma maior disponibilidade desse nutriente no solo em comparação ao valor original de 1,5 mg dm⁻³, presente na Tabela 1.

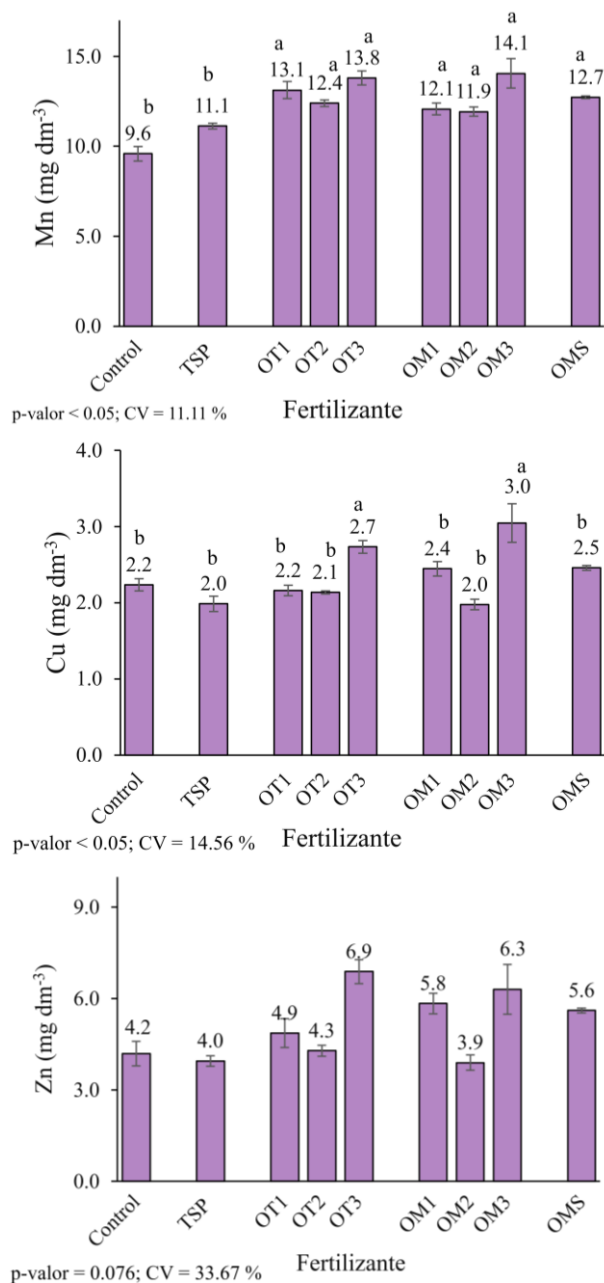


FIGURA 14 - Teores de cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) no solo em função dos tratamentos, após a finalização do experimento. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si. Barras verticais representam o erro padrão da média.

3.3 Quantificação de genes associados à resistência a antibióticos e ciclagem de Fósforo e Nitrogênio em solo rizosférico de *Urochloa* ao final do experimento.

Houve poucas diferenças para o número de cópias dos genes avaliados na rizosfera da *Urochloa*, a partir da análise de qPCR (Figuras 15 e 16). A aplicação de OMF não impactou a comunidade bacteriana associada à ciclagem de P e N, nem a presença de determinantes de resistência a antibióticos. A avaliação desses genes em solos tratados com OMF é fundamental para garantir a biossegurança dos sistemas de produção. Uma vez que a matriz orgânica dos fertilizantes utilizados provém de cama de aviário, existe o risco de introdução e disseminação de genes de resistência no ambiente edáfico, o que justifica a quantificação de genes de resistência a antibióticos (*tet*) focada em alvos bacterianos (Heuer *et al.*, 2011). Portanto, monitorar a abundância desses genes, em paralelo aos genes funcionais de ciclagem de nutrientes, permite verificar se o processamento tecnológico do fertilizante foi capaz de mitigar possíveis impactos ambientais.

As avaliações microbiológicas concentraram-se na comunidade bacteriana, utilizando o gene *16S* rRNA como normalizador, devido ao papel central deste domínio na ciclagem de N e resposta imediata à adubação fosfatada (Fraser *et al.*, 2015; Alori *et al.*, 2017). Embora os fungos desempenhem um papel crucial na ciclagem de P em solos tropicais, especialmente através da fosfatase ácida e associações micorrízicas, o presente estudo focou na comunidade bacteriana pela sua rápida resposta à adubação e pelo seu papel central na disseminação de resistência a antibióticos associada a dejetos animais (Heuer *et al.*, 2011; Fraser *et al.*, 2015). Futuros estudos integrando a análise da região *ITS* (*Internal Transcribed Spacer*) para fungos poderão elucidar se a tecnologia organomineral exerce efeitos sinérgicos entre os diferentes domínios microbianos.

O número de cópias do gene bacteriano *phoD* (que codifica a fosfatase alcalina), normalizado pelo gene *16S* rRNA (*Alvo/16S* rRNA) foi maior nas amostras que receberam aplicação de TSP em comparação aos demais tratamentos. A normalização pelo *16S* rRNA, que reflete o tamanho da comunidade microbiana bacteriana total, foi utilizada para corrigir possíveis variações na extração de DNA entre as amostras.

A maior abundância relativa de *phoD* no tratamento mineral indicou que houve maior dependência microbiana de bactérias ligadas à mineralização de P orgânico com a fonte de P puramente inorgânica, contrastando com estudos que mostram correlação positiva do gene *phoD* com a concentração de P-orgânico no solo, e redução de *phoD* sob alta fertilização de P (Lang *et al.*, 2020; Ragot *et al.*, 2015; Lidbury *et al.*, 2017).

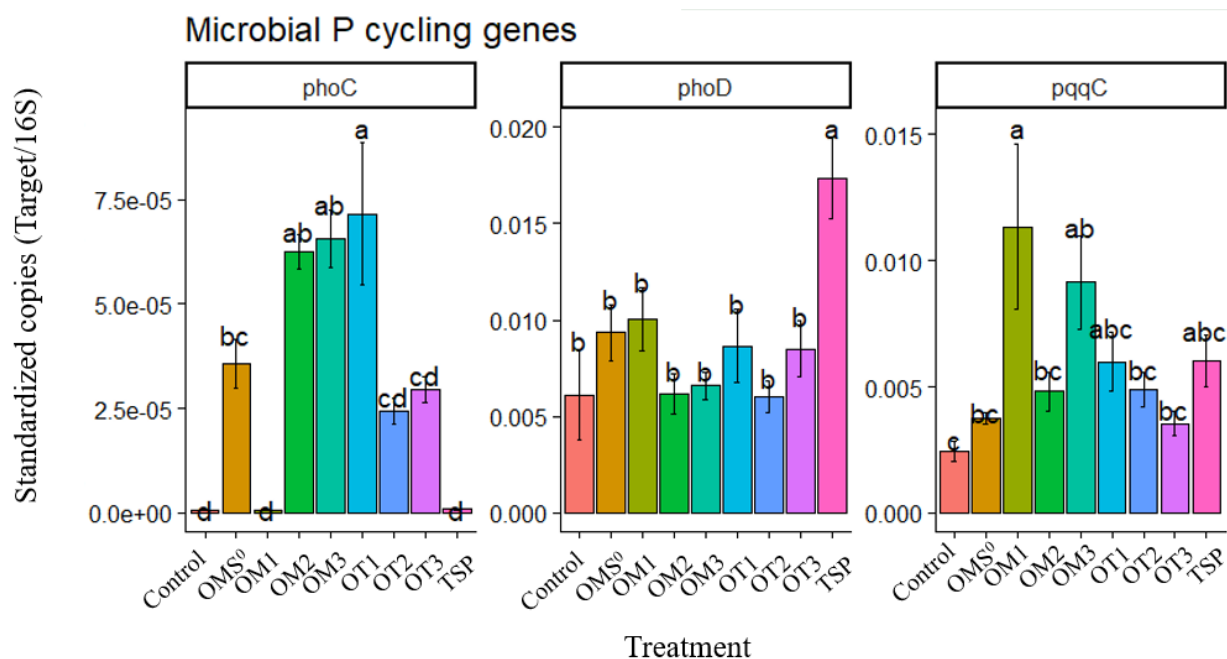


FIGURA 15 - Abundância relativa do gene bacteriano *phoD* (fosfatase alcalina), *phoC* (fosfatase ácida) e *pqqC* (cofator para a produção de ácidos orgânicos) no solo rizosférico. Os valores representam o número de cópias do gene normalizadas (gene alvo/16S rRNA). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$). Barras verticais indicam o erro padrão da média ($n = 9$, 3 réplicas biológicas e 3 técnicas).

A abundância relativa do gene *phoC*, que codificou a fosfatase ácida em bactérias, foi baixa, representando apenas 0,0075% do total de genes *16S rRNA*, ou seja, para cada 100.000 cópias do gene *16S*, detectaram-se apenas 7,5 cópias de *phoC*. Embora esses dados indiquem uma contribuição menor da via bacteriana de mineralização ácida no sistema, é importante ressaltar que a fosfatase ácida em solos tropicais é predominantemente sintetizada por fungos e exsudatos radiculares (Fraser *et al.*, 2015). Como o presente estudo concentrou-se na quantificação de alvos bacterianos, a ausência da análise do gene *acp* (específico para fungos) e atividade enzimática total sugere que a mineralização ácida pode estar sendo conduzida majoritariamente pela comunidade fúngica, não captada por este marcador genético específico.

Hipotetiza-se correlacionar a escassez desse gene na comunidade microbiana bacteriana total com o pH do solo do experimento, que foi corrigido com calcário para valores próximos a neutralidade, podendo contribuir para menor atividade da fosfatase ácida (Zheng, *et al.*, 2019).

Ambas as enzimas, fosfatase alcalina e ácida, atuam na mineralização do P-orgânico, transformando-o em fosfato inorgânico que a planta pode absorver. Em ambientes ricos em P inorgânico, a abundância e expressão de genes relacionados à solubilização e mineralização, como *phoD* e *phoC*, podem ser reduzidas (Fraser *et al.*, 2015; Ragot *et al.*, 2017). Isso ocorre

porque a ativação dessas vias metabólicas é regulada pela disponibilidade de P no meio. Havendo suprimento adequado de P solúvel, a comunidade microbiana prioriza a economia energética, suprimindo a síntese enzimática que seria necessária em condições de escassez (Alori *et al.*, 2017).

Por sua vez, o gene *pqqC* é um cofator para a produção de ácidos orgânicos, como o ácido glucônico, que acidificam o microambiente e liberam o P inorgânico preso nas argilas. No presente estudo, a ocorrência desse gene foi menor que 1,5 % do total de genes 16S. A pouca variação observada entre os tratamentos, sem distinção entre OMF e mineral (Figura 15), reforça que a oferta de P disponível nos OMF pode ter sido suficiente para não demandar um incremento na população de bactérias solubilizadoras (Zheng *et al.*, 2019; Bi *et al.*, 2020; Alori *et al.*, 2017).

Para os microrganismos associados à oxidação da amônia, avaliou-se a abundância relativa de genes *amoA* e *amoB*, relativos a archeas (AOA) e bactérias oxidadoras de amônia (AOB). A abundância relativa de genes *amoA* foi moderada até alta, com 4 a 10% da 16S, enquanto *amoB* teve valores inferiores a 2%, sendo que a presença de AOB foi quase nula em algumas amostras, no limite de detecção da qPCR (Figura 16). Embora o experimento tenha contado com a inoculação de *Bradyrhizobium* sp., as análises moleculares focaram-se nos processos de nitrificação, que atuam como indicadores sensíveis da dinâmica do N inorgânico na rizosfera (Prosser; Nicol, 2008).

A predominância de AOA em relação a AOB sugeriu que o fornecimento de N, tanto pelo OMF ou TSP, não gerou excessos de NH_4^+ que pudessem causar desequilíbrio na microbiota nativa ou inibir o processo de nitrificação (Sternngren *et al.*, 2015). A manutenção dessa estabilidade biológica é um sinal positivo de que o ambiente permaneceu favorável ao desenvolvimento das *Bradyrhizobium* sp. introduzidas no sistema (Stahl; de la Torre, 2012).

Na literatura, AOB são reconhecidas por responderem prontamente ao enriquecimento de nutrientes, tendendo a dominar em solos de Cerrado mais férteis ou sob adubação mineral intensiva (Di *et al.*, 2009). Por outro lado, AOA ganham importância em condições mais ácidas ou oligotróficas, com baixo suprimento de NH_4^+ ou baixa temperatura, sendo mais sensíveis a variações de pH e umidade (Prosser; Nicol, 2008). Em solos alcalinos e adubados, AOB contribuem mais para a taxa de nitrificação do que AOA, apesar de AOA poderem ser mais abundantes em número de cópias de gene (Di *et al.*, 2009; Sternngren *et al.*, 2015).

Diferente do observado para AOA, a abundância relativa de AOB apresentou variação entre os tratamentos, com os maiores valores registrados no fertilizante organomineral enriquecido com S^0 . Essa resposta específica das AOB pode relacionar-se à dinâmica de

oxidação do S^0 na rizosfera. A oxidação biológica do S^0 promove uma acidificação localizada e pode acelerar a mineralização de N orgânico presente na matriz de cama de aviário, gerando picos pontuais de NH_4^+ (Germida; Janzen, 1993; Chaudhary *et al.*, 2023). Uma vez que *AOB* são microrganismos nitrificantes que respondem preferencialmente ao enriquecimento de nutrientes e maiores concentrações de substrato nitrogenado, o ambiente gerado por esse OMF favoreceu o seu nicho ecológico (Sterngren *et al.*, 2015). Entretanto, a estabilidade das *AOA* entre os tratamentos reforçou a natureza resiliente e oligotrófica desse grupo, que manteve sua abundância independentemente das alterações químicas pontuais promovidas pelo enxofre (Stahl; de la Torre, 2012).

Sob a ótica da FBN, estudos futuros quantificam que genes funcionais como: *nodA*, *nodW*, *nifH* e *nodC* poderiam detalhar a interação específica entre OMF e eficiência da nodulação. Contudo, a estabilidade das comunidades nitrificantes observada nesta pesquisa indica que o ambiente rizosférico permaneceu propício às transformações bioquímicas de N, não apresentando antagonismos à microbiota funcional essencial do sistema.

Estudos adicionais são necessários para avaliar genes que não foram testados, como dos microrganismos que oxidam S^0 , para melhor elucidar mecanismos relacionados a esse processo.

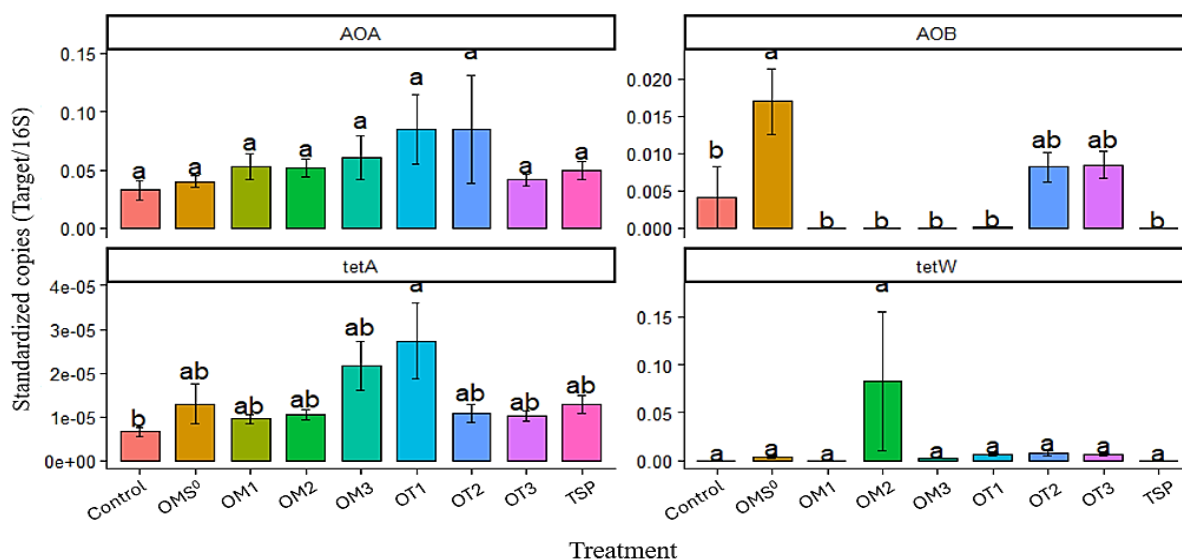


FIGURA 16 - Número de cópias normalizadas de genes microbianos envolvidos na oxidação da amônia, *ammonia-oxidizing bacteria* (AOB) e *ammonia-oxidizing archaea* (AOA), e dos genes associados à resistência a antibióticos, *tetA* e *tetW*. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média

Não foi observado efeito dos fertilizantes sobre o número de cópias normalizadas de genes relacionados à resistência a antibióticos (Figura 16). A baixa abundância dos genes *tetA*

e *tetW* relacionados à resistência a tetraciclina, indica que o uso de OMF e TSP não promoveu enriquecimento detectável desses determinantes no solo sob as condições experimentais avaliadas. Esses resultados sugerem um risco reduzido para a seleção ou disseminação de resistência a tetraciclina decorrente da aplicação das fontes testadas (Heuer *et al.*, 2011). Embora a baixa detecção desses marcadores sinalize biossegurança, avaliações de longo prazo e inclusão de outros grupos de antibióticos são recomendadas para uma conclusão mais abrangente sobre a segurança ambiental da tecnologia (Zhou; Yao, 2020).

Essa baixa detecção pode ser atribuída à reduzida capacidade de sobrevivência de bactérias entéricas alóctones em condições edáficas competitivas, o que limita a persistência de genes de resistência no solo (Heuer *et al.*, 2011). Além disso, processos de estabilização térmica durante a fabricação dos OMF podem ter contribuído para a mitigação da carga genética inicial. Contudo, a literatura apresentou divergências, indicando que o risco de disseminação pode ser cumulativo e mediado pela co-seleção com metais pesados em sistemas de aplicação sucessiva a longo prazo (Xie. *et al.*, 2018).

4 CONCLUSÕES

Os fertilizantes organominerais foram fontes eficientes de fósforo para o cultivo da soja, com resposta igual ou ligeiramente superior à do superfosfato triplo, com destaque para os organominerais enriquecidos com enxofre.

Embora a resposta agrônômica dos organominerais sobre a biomassa tenha sido superior em comparação ao fertilizante mineral, o efeito dos organominerais sobre a nutrição das plantas foi mais evidente.

Do ponto de vista biológico, a aplicação dos fertilizantes preservou a estabilidade das comunidades ligadas à ciclagem de nitrogênio e fósforo e manteve-se baixa a abundância de genes de resistência aos antibióticos, indicando serem fontes seguras para uso agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA O. O. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 971, 2017. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- BENITES, V. de M. *et al.* Organomineral Fertilizer Is an Agronomic Efficient Alternative for Poultry Litter Phosphorus Recycling in an Acidic Ferralsol. **Frontiers Agron.** 4:785753, 2022. Disponível em: <https://doi.10.3389/fagro.2022.785753>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília, DF: SDIC/MGI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- CASTRO, G. F. *et al.* Sulfuric acid-treated bone char as a recycled source of soluble phosphate fertilizer. **Biomass and Bioenergy**, vol. 204, January 2026, article 108459. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108459>. Acesso em: 23 jan. 2026.
- CHAUDHARY, S. *et al.* Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. **Microbiological Research**, vol. 271, 127340, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Organomineral fertilizer as source of P and K for sugarcane. **Scientific Reports** 10, 5398 (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62315-1>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- CUI, Y.; WANG, Q. Interaction effect of zinc and elemental sulfur on their uptake by spring wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, n. 4, p. 639-649, 2005. Disponível em: <https://doi.10.1081/PLN-200052637>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- DA SILVA, L.J.R. *et al.* Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. **Scientific Reports**, v.14, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58911-0>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- DEGRYSE, F. *et al.* Sulfur Uptake from Fertilizer Fortified with Sulfate and Elemental S in Three Contrasting Climatic Zones. **Agronomy**, 10, 1035; 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10071035>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- DI, H. *et al.* Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils. **Nature Geoscience**. 2. 621-624, 2009. Disponível em: <https://doi.10.1038/ngeo613>.
- DIAS, R. C. *et al.* Curvas de resposta do milho à adubação potássica obtidas através de experimento fatorial. **Revista Agrária Acadêmica**, v.5, n.2, 2022 Disponível em: <https://doi.org/10.32406/v5n2/2022/35-49/agrariacad>. Acesso em: 28 de mai de 2024.

- DONG, S. *et al.* Differential Effects of Sulfur Fertilization on Soil Microbial Communities and Maize Yield Enhancement. **Agronomy** 2024, 14, 2251. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14102251>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- ESPINOZA, A. L. d. F. *et al.* Physico-Chemical Properties and Phosphorus Solubilization of Organomineral Fertilizers Derived from Sewage Sludge. **Soil Systems**. 2023, 7(4), 100. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040100> . Acesso em: 27 jan. 2026.
- FERNANDES, J. D. *et al.* Eficiência da adubação organomineral na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 9, p. 825-830, 2015. Disponível em: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n09p825-830. Acesso em: 27 jan. 2026.
- FONTOURA, S. M. V. *et al.* Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em latossolos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1907-1914, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600015> Acesso em: 28 mai 2024.
- FRASER, T.D. *et al.* Soil bacteria phoD gene abundance and expression in response to applied phosphorus and long-term management, **Soil Biology and Biochemistry**, Volume 88, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.014>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- FRAZÃO, J.J. *et al.* Poultry Litter-Derived Organomineral Phosphate Fertilizer Has Higher Agronomic Effectiveness Than Conventional Phosphate Fertilizer Applied to Field-Grown Maize and Soybean. **Sustainability** 2021, 13, 11635. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111635>. Acesso em: 17 jan. 2026.
- GROHSKOPF, M.A. *et al.* Phosphate fertilization with organomineral fertilizer on corn crops on a Rhodic Khandiudox with a high phosphorus content. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, e00434, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00434>. Acesso em: 17 jan. 2026.
- HEUER, H.; SCHMITT, H.; SMALLA, K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields. *Curr Opin Microbiol*. 2011 Jun;14(3):236-43. Disponível em: <https://doi.10.1016/j.mib.2011.04.009>. Acesso em: 17 jan. 2026.
- HORNECK, D. A. *et al.* **Soil test interpretation guide**. Corvallis: Oregon State University Extension Service, 2019. Disponível em: <https://extension.oregonstate.edu/sites/extd8/files/catalog/auto/EC1478.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2026.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja. **Embrapa Soja**, Documentos 283, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/468512>. Acesso em: 17 jan. 2026.
- IFADATA. **International Fertilizer Industry Association**. Paris: IFA, 2021. Disponível em: <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>. Acesso em: 17 jan. 2026.

KHALILI, A. *et al.* Temporal Synchronization of Nitrogen and Sulfur Fertilization: Impacts on Nutrient Uptake, Use Efficiency, Productivity, and Relationships with Other Micronutrients in Soybean. **Agronomy** 2024, *14*, 570. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030570>. Acesso em: 17 jan. 2026.

KIEHL, E.J. **New organic fertilizers**. 1^a ed. São Paulo: Editora Degaspari, 2010.

KOPP, C. *et al.* Increasing phosphorus plant availability from P-rich ashes and biochars by acidification with sulfuric acid. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, Issue 6, article 111489, Denmark, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111489>. Acesso em: 17 jan. 2026.

KULAIF, Y. **A nova configuração da indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil**. São Paulo: Ática, 1999. Disponível em <https://repositorio.usp.br/item/000928300#ertilizantes%20b%C3%A1licos%3A%20os%20fosfatados%>. Acesso em: 17 jan. 2026.

LANG, M. *et al.* microbial composition and *phoD* gene abundance are sensitive to phosphorus level in a long-term wheat-maize crop system. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, 605955, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.605955> . Acesso em: 17 jan. 2026.

LIDBURY, I. D. E. A. *et al.* The ‘known’ genetic potential for microbial communities to degrade organic phosphorus is reduced in low-pH soils. **MicrobiologyOpen**, v.6, issue 4, August 2017: Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mbo3.474>. Acesso em: 17 jan. 2026.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Fertilidade do solo e produtividade agrícola. Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3^a ed. New York: Academic Press, 2013.

MCLAUGHLIN, M. J. *et al.* Co-granulated elemental sulfur/ sulfate fertilizers and their role in crop nutrition. **Better Crops with Plant Food**, 99: 7-10, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319665201_Co-granulated_elemental_sulfursulfate_fertilizers_and_their_role_in_crop_nutrition. Acesso em: 17 jan. 2026.

MUMBACH, G. L. *et al.* Organic, mineral and organomineral fertilizer in the growth of wheat and chemical changes of the soil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 14, e5618, 2019. Disponível em: <https://doi.10.5039/agraria.v14i1a5618>. Acesso em: 17 jan. 2026.

O'HARA, G. W. Nutritional constraints on root nodule bacteria and the development of nitrogen-fixing nodules. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 3, p. 417-433, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/EA00087>. Acesso em: 17 jan. 2026.

OLDROYD, G. E. D.; DOWNIE, J. A. Calcium, kinases and nodulation signalling in legumes. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 5, n. 7, p. 566-576, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nrm1424>. Acesso em: 17 jan. 2026.

OLSEN, S. R.; KHASAWNEH, R. E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: STELLY, M. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.364-410.
Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/media/publicaco.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2026.

POBLETE-GRANT. et al. Synergistic and Antagonistic Effects of Poultry Manure and Phosphate Rock on Soil P Availability, Ryegrass Production, and P Uptake. **Agronomy**, 2019, 9, 191. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy9040191>. Acesso em: 17 jan. 2026.

PROSSER, J. I.; NICOL, G. W. Relative contributions of archaea and bacteria to aerobic ammonia oxidation in the environment. **Environmental Microbiology**, v. 10, n. 11, p. 2931-2941, 2008. Disponível em: [10.1111/j.1462-2920.2008.01775.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01775.x) . Acesso em: 17 jan. 2026.

RAGOT, S. A.; KERTESZ, M. A.; BÜNEMANN, E. K. *phoD* alkaline phosphatase gene diversity in soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 81, n. 21, p. 7281-7289, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.01823-15> Acesso em: 17 jan. 2026.

RAGOT, S.A. *et al.* Soil *phoD* and *phoX* alkaline phosphatase gene diversity responds to multiple environmental factors. **FEMS Microbiol Ecol**. 2017 Jan;93(1): fiw212. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw212>. Acesso em: 17 jan. 2026.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 1 ed. São Paulo, ANDA, 2011.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. São Paulo, ANDA, 2017.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, 1999.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Poultry meat production. *In: Agricultural Production*. Our World in Data, 2023. Dados adaptados de Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponível em: <https://archive.ourworldindata.org/20260119-235736/grapher/poultry-production-tonnes.html>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SALVAGIOTTI, F. *et al.* Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. **Field Crops Research**, v. 108, n. 1, p. 1-13, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SAKURADA L., R. *et al.* Organomineral phosphate fertilizers: agronomic efficiency and residual effect on initial corn development. **Agronomy Journal**, v.108, n.5, p.2050-2059, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0543>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SCHAEFER, C.E. *et al.* A Brief History of Brazilian Soil Science. in: SCHAEFER, C.E.G.R. (eds) **The Soils of Brazil. World Soils Book Series**. Springer, Cham. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2^a ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.

STAHL, D. A.; DE LA TORRE, J. R. Physiology and diversity of ammonia-oxidizing archaea. **Annual Review of Microbiology**, v. 66, p. 83-101, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092611-150128>. Acesso em: 17 jan. 2026.

STERNGREN, A. E.; HALLIN, S.; BENGTSON, P. Archaeal Ammonia Oxidizers Dominate in Numbers, but Bacteria Drive Gross Nitrification in *N*-amended Grassland Soil. **Frontiers in Microbiology**, 6:1350, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01350>. Acesso em: 17 jan. 2026.

TASKIN, M. B. *et al.* Transforming Biomass Power Wastes to Innovative Fertiliser: Effect of Poultry Manure Ash-Based Fertilisers on the Growth and Mineral Nutrition of Lettuce and Maize Plants. **Soil use and Management**. British Society of Soil Science, v. 41, Issue 3, article e70114, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.70114>. Acesso em: 17 jan. 2026.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2^a ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TORRES, J.L.R. *et al.* Lettuce crop fertilized with organomineral source of phosphorus and micronutrients. **Horticultura Brasileira**. v.40, p.402–403, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220407>. Acesso em: 17 jan. 2026.

UDDIN, K. *et al.* Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: A comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 127433, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127433>. Acesso em: 17 jan. 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **National Water Quality Inventory**: Report to Congress. Washington, D.C.: EPA, Office of Water, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/waterdata/national-water-quality-inventory-report-congress>. Acesso em: 17 jan. 2026.

VANCE, C. P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition: plant nutrition in a world of declining renewable resources. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 127, n. 2, p. 390-397, out. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.010331>. Acesso em: 17 jan. 2026.

VIEIRA, D.M.d.S. *et al.* Residual Effects of Phosphorus and Micronutrients in Vegetable Growing Areas under Different Organomineral Fertilizer Doses. **Horticulturae**, 9, 761, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070761>. Acesso em: 17 jan. 2026.

VITTI, G. C. **Efeitos de doses de enxofre e de zinco na cultura da soja**. 1988. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988. Disponível em: <teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20210104-160117/>. Acesso em: 17 jan. 2026.

XIE, W. *et al.* Long-term effects of manure and chemical fertilizers on soil antibiotic resistome. **Soil Biology and Biochemistry**, 122, 111-119, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.009>. Acesso em: 17 jan. 2026.

YUAN, P. *et al.* Calcium/calmodulin-mediated microbial symbiotic interactions in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 984909, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.984909>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZARTDINOVA, R.; NIKITIN, A. Calcium in the Life Cycle of Legume Root Nodules. **Indian Journal of Microbiology**, v. 63, n. 4, p. 410-420, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01107-3>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZHAO, C. *et al.* Abundance and diversity of sulphur-oxidising bacteria and their role in oxidising elemental sulphur in cropping soils. **Biology and Fertility of Soils**, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1162-0>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZHENG, M. M. *et al.* Soil Nutrients Drive Function and Composition of phoC-Harboring Bacterial Community in Acidic Soils of Southern China. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, art. 2654, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02654>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZHOU, Z.; YAO, H. Effects of Composting Different Types of Organic Fertilizer on the Microbial Community Structure and Antibiotic Resistance Genes. **Microorganisms**, 8, 268, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganism8020268>. Acesso em: 17 jan. 2026.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram o elevado potencial dos fertilizantes organominerais como alternativa sustentável e tecnicamente viável para a agricultura tropical. Os OMF formulados a partir de cama de aviário e fontes minerais solúveis, especialmente quando submetidos a graus moderados de acidulação ou enriquecidos com enxofre elementar, promoveram produção de biomassa e acúmulo de nutrientes equivalentes ou superiores ao fertilizante mineral convencional, ao mesmo tempo em que permitem a valorização ambiental de resíduos avícolas. Esses achados reforçam a importância estratégica dos fertilizantes organominerais na redução da dependência de insumos importados e na promoção de uma agricultura mais circular.

Outro aspecto de grande relevância foi a clara influência da calagem sobre o desempenho agrônômico dos fertilizantes fosfatados. A calagem excessiva resultou em redução significativa na disponibilidade e no aproveitamento de fósforo, independentemente da fonte utilizada, confirmando que o manejo inadequado da acidez do solo pode anular parte dos benefícios trazidos por tecnologias mais avançadas de fertilizantes. Por outro lado, a dose de 100 mg kg^{-1} de P destacou-se como a mais equilibrada nas condições experimentais, atingindo cerca de 83,5% do rendimento máximo com elevada eficiência de utilização, evitando o consumo de luxo e os baixos índices de recuperação observados em doses elevadas.

Por fim, embora os resultados obtidos sejam promissores, reconhece-se que o presente estudo apresenta limitações inerentes a experimentos conduzidos em casa de vegetação e com número restrito de ciclos. Diversos aspectos ainda merecem investigação mais aprofundada, tais como o comportamento desses organominerais em condições de campo, a dinâmica de liberação de nutrientes em diferentes texturas de solo, os efeitos de longo prazo sobre a microbiota e a sustentabilidade econômica das formulações. Estudos futuros, utilizando técnicas mais apuradas e análises mais abrangentes (inclusão de mais repetições por tratamento; avaliações microbiológicas a partir da rizosfera das culturas em todos os ciclos; e integrar análises microbianas de genes que não foram testados, como dos microrganismos que oxidam S^0 , para elucidar outros mecanismos) serão fundamentais para validar e consolidar as tendências observadas, contribuindo para o desenvolvimento de recomendações mais robustas e adaptadas à realidade da agricultura tropical brasileira. Assim, serão desenvolvidas estratégias eficazes, auxiliando os produtores a tomarem decisões informadas sobre a escolha do fertilizante mais adequado as suas condições específicas no campo.

ANEXOS

CAPÍTULO 1

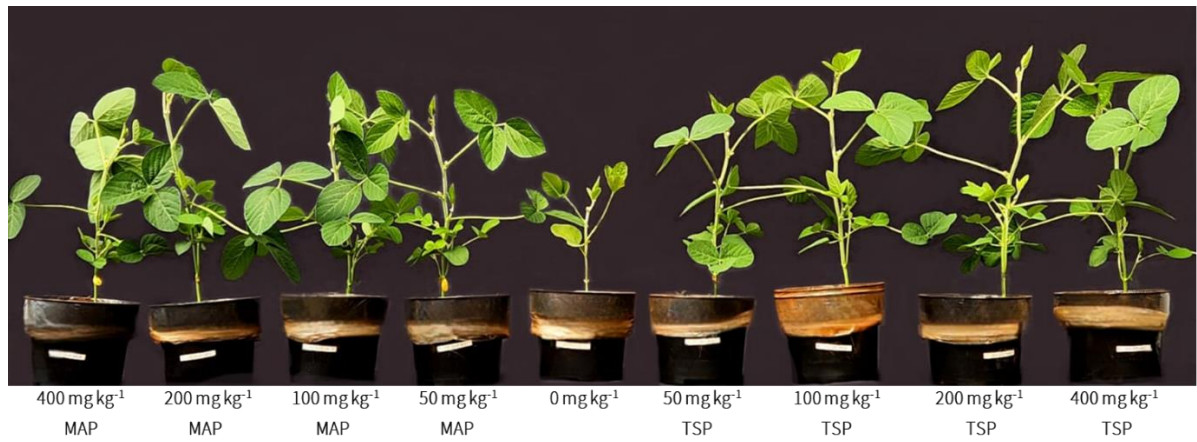


IMAGEM 1 - Comparativo de plantas de soja sob condição de supercalagem, com aplicação de MAP ou TSP, em doses de: 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹ de P.



IMAGEM 2. - Comparativo de plantas de soja com aplicação de MAP nas doses de: 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹ de P, sob condição de calagem normal ou supercalagem.

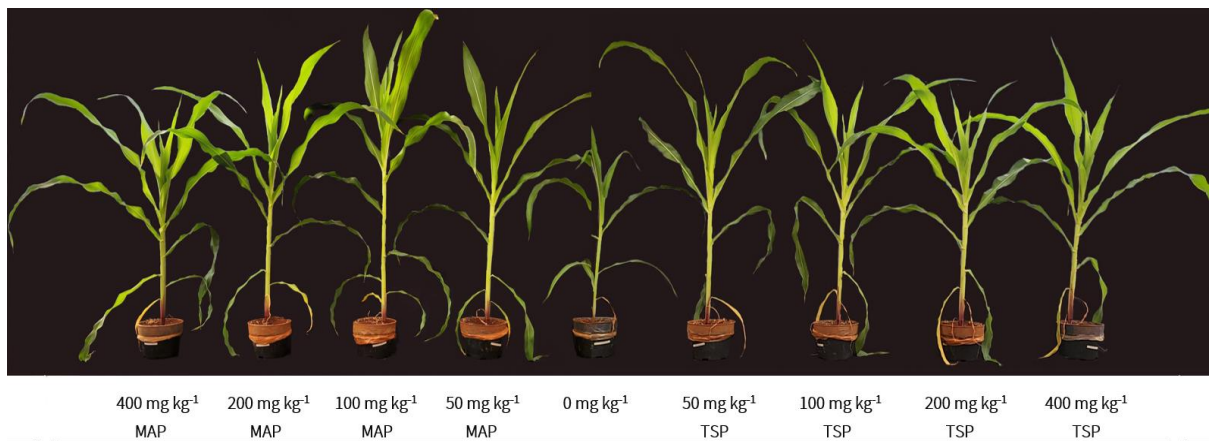


IMAGEM 3 - Comparativo de plantas de milho sob a dose recomendada de calcário, com aplicação de MAP ou TSP em doses de: 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹ de P.

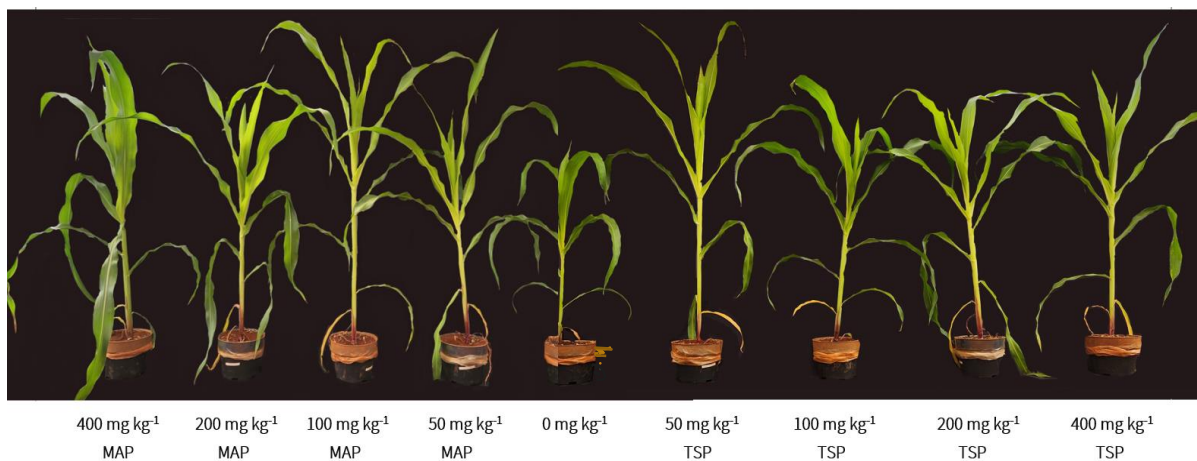


IMAGEM 4 - Comparativo de plantas de milho sob condição de supercalagem, com aplicação de MAP ou TSP em doses de 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹ de P.

CAPÍTULO 2

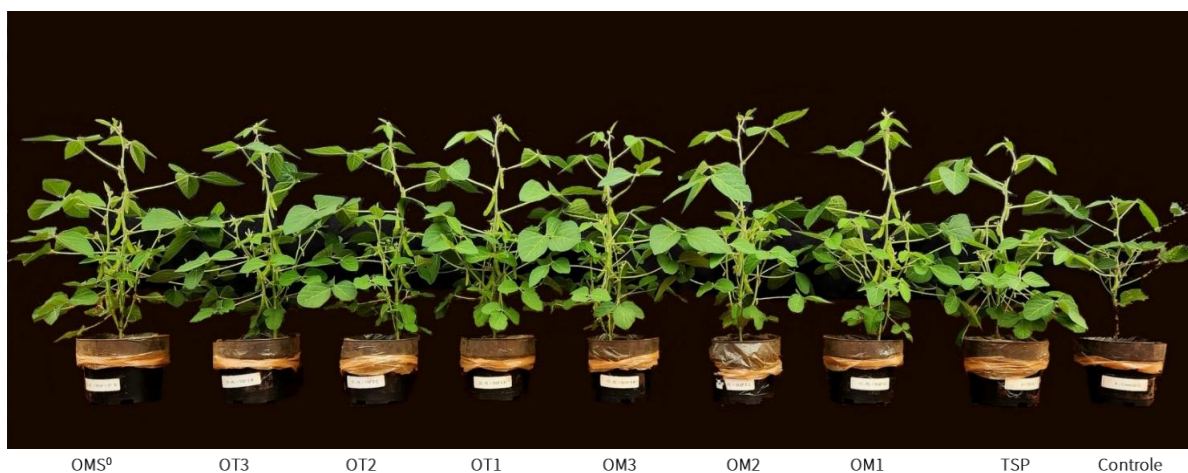


IMAGEM 5 - Comparativo de plantas de soja dos diferentes tratamentos: organominerais, TSP e controle negativo.

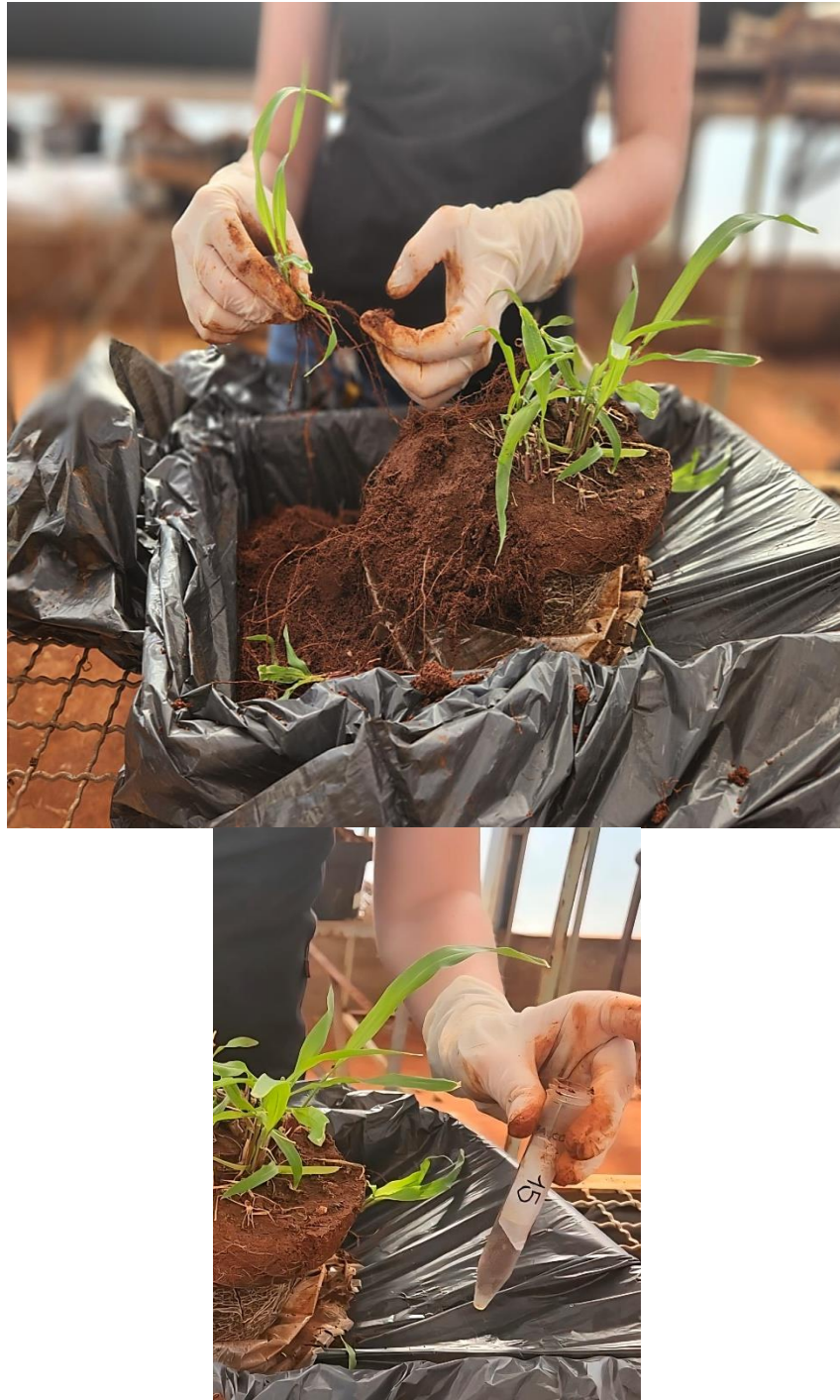


IMAGEM 6 - Coleta de amostras de solo rizosférico de *Urochloa*.



IMAGEM 7 - Caixa térmica com isopor, gelo seco e gelo comum, utilizada para armazenamento provisório do solo rizosférico, durante o procedimento de coleta das amostras.