

Vinicius Santana Freitas

**Fontes e Doses de Fertilizantes Fosfatados com Tecnologia Redutora de Fixação:
Efeitos no Crescimento Inicial do Milho e no Fósforo Disponível no Solo.**

**São Cristóvão
Fevereiro - 2026**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA – DEA

**Fontes e Doses de Fertilizantes Fosfatados com Tecnologia Redutora de Fixação:
Efeitos no Crescimento Inicial do Milho e no Fósforo Disponível no Solo.**

**Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Agrônômica –
Universidade Federal de Sergipe, como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.**

APROVADO em:

ORIENTADO: Vinicius Santana Freitas

Prof. Dr^a. Aline De Almeida Vasconcelos

(Orientador)

Prof. Dr. Urias Fagner Santos Nascimento

Prof. Dr. Michel Antoni da Silva

Banca examinadora

Banca examinadora

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ter sido minha força e meu sustento nos momentos de dificuldade. Aos meus pais, que, mesmo com a distância e mesmo quando estive sozinho, nunca deixaram de me apoiar, acreditaram em mim e me deram forças para continuar. Todo esforço e toda conquista são por vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar cada desafio ao longo dessa caminhada. Sem Ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais, Magali Santana e Ramilton Freitas, que, mesmo estando longe fisicamente, nunca deixaram de me apoiar, incentivar e acreditar em mim. A distância nunca diminuiu o amor, o cuidado e o suporte que sempre me ofereceram. Cada esforço feito por vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus familiares, pelo carinho, pelas palavras de incentivo e pela preocupação constante. Saber que eu tinha uma base sólida torcendo por mim fez toda a diferença.

À minha namorada, por estar ao meu lado em todos os momentos, pela compreensão nas fases difíceis, pelo apoio constante e por sempre me ajudar no que foi possível. Sua presença tornou essa jornada mais leve e significativa.

Aos meus amigos, que foram fundamentais nessa trajetória, pelas conversas, pelo companheirismo, pelas comemorações das pequenas e grandes conquistas e por tornarem essa caminhada mais leve e inesquecível.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, o meu sincero agradecimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fracionamento das doses de P_2O_5 por unidade experimental (vaso)	21
Figura 2: Emergência das plântulas de milho após a semeadura	22
Figura 3: Desenvolvimento vegetativo do milho em casa de vegetação	22
Figura 4: Extração do P disponível no solo (Mehlich-1) em laboratório	23
Figura 5: Rótulo do fertilizante Top-Phos utilizado no experimento	23
Figura 6: Rótulo do fertilizante Solotek utilizado no experimento	24
Figura 7: Área de parte aérea em função da dose de P_2O_5 de diferentes tecnologias de fósforo.....	26
Figura 8: Área de raiz em função da dose de P_2O_5 , para diferentes fontes de fósforo.....	27
Figura 9: P disponível no solo (Mehlich-1) em função da dose de P_2O_5 para diferentes fontes após o cultivo.	28
Figura 10: Área do transiente OJIP (Area) em função de doses de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$) para diferentes fontes (MAP, Top-Phos e Solotek/P35)	29
Figura 11: Correlação entre P disponível no solo e área de parte aérea (cm^2) para a fonte Solotek.	30
Figura 12: Correlação entre P disponível no solo e área de raiz (cm^2) para a fonte Solotek.	31
Figura 13: Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de parte aérea (cm^2) para a fonte MAP.....	31
Figura 14 – Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de raiz (cm^2) para a fonte MAP.	32
Figura 15 – Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de parte aérea (cm^2) para a fonte Top-Phos.....	32
Figura 16 – Relação entre o fósforo disponível no solo (Mehlich-1) e a área de raiz (cm^2) para a fonte Top-Phos.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estrutura dos tratamentos (fonte × dose) e número de repetições (n)... 20

Tabela 2. Resumo da análise de variância para as variáveis área de parte aérea e área de raiz de milho submetido a diferentes fontes e doses de fósforo, em delineamento em blocos casualizados.....
.22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de variância

ATP – Adenosina trifosfato

CTC – Capacidade de troca catiônica

DP – Desvio-padrão

Fv/Fm – Rendimento quântico máximo do fotossistema II

MAP – Fosfato monoamônico

Mehlich-1 – Extrator Mehlich-1

OJIP – Transiente OJIP da fluorescência da clorofila a

P-rem – Fósforo remanescente

PI – Performance Index

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

SISVAR – Sistema de Análise de Variância

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UFS – Universidade Federal de Sergipe

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 FERTILIDADE DO SOLO E DINÂMICA DO FÓSFORO.....	12
2.2 IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO NO METABOLISMO VEGETAL	14
2.3 FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS.....	14
2.5 EFEITOS DE DOSES CRESCENTES EM SOLOS COM ALTA FIXAÇÃO DE FÓSFORO	17
2.6 A CULTURA DO MILHO E RESPOSTA À ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 DESENHO DO ESTUDO.....	20
3.2 LOCAL DO ESTUDO E PERÍODO EXPERIMENTAL.....	20
3.3 SOLO: COLETA, PREPARO E CARACTERIZAÇÃO	20
3.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	20
3.5 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	21
3.6 VARIÁVEIS AVALIADAS E PROCEDIMENTOS DE COLETA	22
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	22
3.8 REGISTRO FOTOGRÁFICO DO EXPERIMENTO.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 ORGANIZAÇÃO E CHECAGEM DOS DADOS	26
4.2 CRESCIMENTO – ÁREA DE PARTE AÉREA.....	27
4.3 CRESCIMENTO – ÁREA DE RAIZ	28
4.4 FÓSFORO DISPONÍVEL NO SOLO APÓS O CULTIVO	30
4.5 FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A (TESTE OJIP)	32
4.6 CORRELAÇÃO ENTRE P DISPONÍVEL NO SOLO E VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO.....	33
5 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39

RESUMO

A adubação fosfatada é determinante para o estabelecimento inicial do milho, especialmente em solos tropicais com baixa disponibilidade natural de fósforo e alta capacidade de retenção desse nutriente. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes fontes e doses de fósforo sobre o crescimento inicial do milho e sobre o fósforo disponível no solo após o cultivo, em experimento conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de Sergipe, no município de São Cristóvão–SE, entre junho e outubro de 2025, utilizando solo coletado em Frei Paulo–SE. Foram avaliadas três fontes fosfatadas (MAP, Top-Phos e Solotek/P35), quatro doses de P_2O_5 (40, 80, 100 e 120 kg ha⁻¹) e um tratamento controle sem fósforo. As variáveis de crescimento foram obtidas por análise de imagens, com quantificação da área de parte aérea e da área de raiz, e por fluorescência da clorofila a (teste OJIP), por meio dos parâmetros Fv/Fm, PI e Area do transiente OJIP. Ao final do período experimental, determinou-se o fósforo disponível no solo pelo extrator Mehlich-1. De modo geral, os tratamentos com aplicação de P apresentaram valores superiores ao controle, e observou-se incremento da área de parte aérea com o aumento da dose nas três fontes avaliadas. Para a área de raiz, a resposta ao aumento de dose foi mais consistente em Top-Phos e Solotek/P35, enquanto em MAP houve maior variação entre doses. O fósforo disponível no solo após o cultivo variou conforme a fonte e a dose, com ajuste linear significativo para Solotek/P35 e ajuste quadrático significativo para Top-Phos, enquanto para MAP não houve ajuste significativo no intervalo avaliado. Na fluorescência, Fv/Fm e PI permaneceram relativamente estáveis entre fontes e doses; para a variável Area, observou-se redução com o aumento da dose em MAP, sem alterações concomitantes nos indicadores globais. Na análise de correlação, Solotek/P35 apresentou associação positiva significativa entre o P residual no solo e as variáveis morfológicas, enquanto em MAP e Top-Phos não se observou associação consistente. Conclui-se que, nas condições avaliadas, o incremento das doses de fósforo favoreceu o crescimento inicial do milho, enquanto o comportamento do fósforo residual no solo dependeu da fonte utilizada.

Palavras-chave: crescimento inicial do milho; fertilizantes fosfatados; fósforo disponível; solo; tecnologia redutora de fixação.

ABSTRACT

Phosphate fertilization is essential for the initial establishment of maize, especially in tropical soils with low natural phosphorus availability and high nutrient retention capacity. This study aimed to evaluate the effect of different phosphorus sources and rates on the initial growth of maize and on the phosphorus available in the soil after cultivation, in an experiment conducted under greenhouse conditions at the Federal University of Sergipe, in the municipality of São Cristóvão, state of Sergipe, Brazil, from June to October 2025, using soil collected in Frei Paulo, Sergipe, Brazil. Three phosphate sources (MAP, Top-Phos and Solotek/P35), four P_2O_5 rates (40, 80, 100 and 120 kg ha⁻¹), and a control treatment without phosphorus were evaluated. Growth variables were obtained by image analysis, with quantification of shoot area and root area, and by chlorophyll *a* fluorescence (OJIP test), through the parameters Fv/Fm, PI and OJIP transient Area. At the end of the experimental period, soil available phosphorus was determined using the Mehlich-1 extractor. In general, treatments with phosphorus application showed higher values than the control, and an increase in shoot area was observed with increasing rates for all three evaluated sources. For root area, the response to increasing rates was more consistent for Top-Phos and Solotek/P35, whereas MAP showed greater variation among rates. Soil available phosphorus after cultivation varied according to source and rate, with a significant linear fit for Solotek/P35 and a significant quadratic fit for Top-Phos, while no significant fit was observed for MAP within the evaluated range. Regarding fluorescence, Fv/Fm and PI remained relatively stable among sources and rates; for the Area variable, a reduction was observed with increasing rates in MAP, without concomitant changes in the global indicators. In the correlation analysis, Solotek/P35 showed a significant positive association between residual soil phosphorus and morphological variables, whereas no consistent association was observed for MAP and Top-Phos. It is concluded that, under the evaluated conditions, increasing phosphorus rates favored the initial growth of maize, while the behavior of residual soil phosphorus depended on the source used.

Keywords: available phosphorus; initial maize growth; phosphate fertilizers; soil; fixation-reducing technology.

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de fósforo (P) é um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola em ambientes tropicais, sobretudo em solos altamente intemperados, ácidos e com elevado teor de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Nesses solos, o fosfato apresenta baixa mobilidade e tende a ser retido por processos de adsorção e/ou precipitação com componentes minerais, reduzindo sua permanência na solução do solo e, conseqüentemente, sua disponibilidade para as plantas (Hanyabui et al., 2020).

Em razão dessa dinâmica, a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados em solos tropicais costuma ser baixa, uma vez que apenas uma fração do P aplicado é rapidamente absorvida pelas culturas, enquanto grande parte permanece retida no solo em formas menos disponíveis, compondo o chamado fósforo residual. Estimativas clássicas indicam que, em geral, apenas 10% a 20% do P adicionado é aproveitado pelas plantas no curto prazo, permanecendo o restante no sistema solo, o que reforça a importância de estratégias de manejo que aumentem a eficiência da adubação e reduzam perdas econômicas (Stauffer et al., 2019). Além disso, a fixação de P é favorecida por fatores como pH baixo, mineralogia da fração argila e presença de óxidos de Fe e Al, que oferecem numerosos sítios ativos para retenção do fosfato (Hanyabui et al., 2020).

Diante desse cenário, têm sido propostas tecnologias associadas a fertilizantes fosfatados com o objetivo de reduzir a interação do fósforo com os sítios de adsorção do solo e prolongar sua disponibilidade. Entre essas alternativas, destacam-se fertilizantes com algum tipo de proteção ou revestimento, bem como formulações associadas a compostos orgânicos, que podem alterar a dissolução do fertilizante, a difusão do P no solo e sua dinâmica na rizosfera (Rosolem et al., 2024). Em particular, há evidências de que substâncias húmicas podem favorecer o transporte de P no solo e aumentar a absorção do nutriente pelas plantas, especialmente em condições em que a difusão do fósforo é limitada. Em experimento com milho, o recobrimento de superfosfato com ácidos húmicos, associado a maior umidade do solo, aumentou a difusão de P e elevou a fração lábil ao redor do grânulo, com incremento de produção de matéria seca em comparação à fonte convencional, sugerindo menor adsorção do fósforo aos colóides do solo (Rosolem et al., 2024).

Apesar do potencial dessas tecnologias, seus resultados podem variar de acordo com o tipo de solo e as condições de manejo, especialmente em função do teor de argila e da umidade, o que torna necessária a avaliação comparativa entre fontes e doses em

condições específicas de cultivo (Hanyabui et al., 2020; Rosolem et al., 2024). Assim, torna-se relevante investigar se o custo adicional de fertilizantes fosfatados com tecnologia agregada se traduz em ganhos consistentes no desempenho agrônômico e/ou em maior efeito residual do fósforo no sistema solo–planta.

O milho (*Zea mays* L.) foi utilizado como cultura indicadora por apresentar elevada exigência em fósforo nas fases iniciais de desenvolvimento e por responder de forma sensível à disponibilidade desse nutriente no solo. Em condições de baixa oferta de P, é comum ocorrer redução no crescimento inicial da parte aérea e do sistema radicular, o que torna essa cultura adequada para avaliar diferenças entre fontes e doses de fertilizantes fosfatados.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar, em solo argiloso, o efeito de diferentes fontes e doses de fósforo sobre o crescimento inicial do milho e sobre o teor de P disponível no solo após o cultivo. Foram comparadas três fontes de fósforo — MAP, Top-Phos e Solotek/P35 — nas doses de 40, 80, 100 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, além de um tratamento controle sem adubação fosfatada. Avaliaram-se variáveis de crescimento da parte aérea e das raízes, parâmetros de fluorescência da clorofila a (teste OJIP) e o fósforo disponível no solo após o cultivo. Adicionalmente, buscou-se verificar a relação entre o P disponível no solo e as variáveis morfológicas que apresentaram resposta às doses aplicadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FERTILIDADE DO SOLO E DINÂMICA DO FÓSFORO

A fertilidade do solo pode ser compreendida como a capacidade de fornecer nutrientes em quantidade e forma adequadas ao desenvolvimento vegetal, considerando fatores como pH, matéria orgânica, textura e mineralogia. No caso do fósforo (P), esse conceito assume especial importância, pois, em muitos sistemas agrícolas, a limitação do nutriente não decorre apenas de sua baixa concentração total no solo, mas principalmente da pequena fração que permanece disponível para absorção pelas plantas ao longo do ciclo da cultura (Amenkhienan et al., 2024).

Em solos tropicais altamente intemperizados, comuns em várias regiões do Brasil, a disponibilidade natural de P tende a ser baixa. Isso ocorre porque, após a aplicação, parte significativa do fósforo pode ser rapidamente retida por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de argilas com alta área superficial específica, por meio de processos de adsorção específica e, em alguns casos, precipitação. Como consequência, reduz-se a

fração lábil do nutriente na solução do solo e, portanto, sua disponibilidade imediata para as plantas (Amenkhienan et al., 2024).

Essa dinâmica ajuda a explicar por que a resposta das culturas ao fósforo depende fortemente do ambiente edáfico. Em outras palavras, doses semelhantes podem resultar em desempenhos distintos conforme variam atributos do solo, como mineralogia, acidez, teor de argila, umidade e capacidade de retenção. Assim, não é adequado generalizar a eficiência agrônômica de uma mesma fonte fosfatada para diferentes condições de cultivo (Amenkhienan et al., 2024).

Além da elevada retenção, o fósforo apresenta baixa mobilidade no solo. Diferentemente de nutrientes mais móveis, como o nitrato, seu deslocamento ocorre a curtas distâncias a partir do ponto de aplicação, tornando o posicionamento do fertilizante um fator importante para a eficiência de aproveitamento. Nessa condição, a interação entre o grânulo e o solo, bem como a formação de uma zona de influência ao redor do fertilizante, pode determinar quanto do P permanecerá em formas acessíveis às raízes nas fases iniciais após a adubação (Stauffer et al., 2019).

Outro aspecto relevante é que a disponibilidade efetiva de fósforo não depende apenas da dose aplicada, mas também da dinâmica físico-química estabelecida no microambiente do fertilizante. Fatores como umidade do solo, tempo de contato e características da fonte influenciam a dissolução do grânulo, a difusão do nutriente e sua permanência em formas lábeis antes que ocorra retenção mais intensa. Por isso, a avaliação do fósforo no sistema solo-planta exige considerar não apenas “quanto” foi aplicado, mas também “como” esse nutriente permanece disponível ao longo do tempo (Stauffer et al., 2019).

Além dos fatores minerais, estudos recentes têm destacado o papel de compostos orgânicos na dinâmica do P. Substâncias orgânicas podem interagir com superfícies reativas do solo, competir por sítios de adsorção e, em determinadas condições, modificar o microambiente ao redor do fertilizante, favorecendo a movimentação local do fósforo e sua absorção pelas plantas. Em estudo com milho, o recobrimento de fertilizante fosfatado com ácido húmico aumentou o transporte de P no solo e a absorção pela planta, sugerindo alteração favorável da fração lábil e melhor aproveitamento do nutriente (Rosolem et al., 2024).

Desse modo, a fertilidade do solo, no que se refere ao fósforo, deve ser entendida como resultado da interação entre a fonte aplicada, as características do solo e as condições de manejo. Em ambientes com alta capacidade de fixação, compreender essa

dinâmica é essencial para interpretar a resposta das culturas e para embasar decisões mais adequadas de adubação fosfatada (Amenkhienan et al., 2024; Stauffer et al., 2019; Rosolem et al., 2024).

2.2 IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO NO METABOLISMO VEGETAL

O fósforo desempenha papel central no metabolismo vegetal por participar diretamente de processos de transferência e armazenamento de energia, compondo moléculas como ATP e ADP, além de integrar a estrutura de ácidos nucleicos, fosfolipídios de membrana e diversos intermediários metabólicos. Por essa razão, a adequada nutrição fosfatada está associada à divisão celular, à organização estrutural dos tecidos e ao crescimento inicial das plantas, especialmente nas fases de estabelecimento da cultura (Epstein; Bloom, 2005; Marschner, 2012). Em culturas anuais como o milho, a disponibilidade de P no início do ciclo é particularmente importante, pois sua deficiência tende a reduzir o vigor, atrasar o desenvolvimento e comprometer a formação e a expansão do sistema radicular, afetando a capacidade de exploração do solo e a absorção de água e nutrientes ao longo do ciclo (Shen et al., 2011).

Além dos efeitos sobre o crescimento, a baixa disponibilidade de fósforo pode provocar alterações fisiológicas e bioquímicas relacionadas ao metabolismo energético e ao uso eficiente de assimilados, resultando em menor expansão foliar e menor acúmulo de biomassa. Por isso, variáveis morfológicas, como área de parte aérea e área de raiz, são frequentemente utilizadas como indicadores da resposta à adubação fosfatada em experimentos controlados (Rodrigues da Silva et al., 2024). Também é relevante considerar que alterações no estado nutricional da planta podem repercutir sobre parâmetros fisiológicos indiretos, como os relacionados à fluorescência da clorofila. Embora sua interpretação deva ser feita com cautela, esse tipo de análise pode complementar a avaliação do desempenho vegetal quando associado a dados de crescimento e de disponibilidade de nutrientes no solo (Maxwell; Johnson, 2000; Taiz et al., 2017)..

2.3 FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Os fertilizantes fosfatados podem ser classificados, de modo geral, de acordo com sua solubilidade e com a velocidade de liberação do fósforo no solo. De forma prática, distinguem-se fontes altamente solúveis em água, que disponibilizam P rapidamente após a aplicação, e fontes de menor solubilidade, cuja liberação do nutriente é mais lenta e mais dependente das condições edáficas. Entre as fontes mais solúveis, destacam-se os

superfosfatos e os fosfatos de amônio, amplamente utilizados em sistemas de produção de culturas anuais por fornecerem fósforo prontamente disponível nas fases iniciais de desenvolvimento (Pizzatto et al., 2025).

No contexto da agricultura brasileira, as fontes solúveis são amplamente empregadas porque culturas como o milho apresentam elevada demanda de fósforo logo no estabelecimento inicial. Pizzatto et al. (2025) destacam que a escolha da fonte está diretamente relacionada ao teor de P_2O_5 , à reatividade do produto e à necessidade de fornecimento imediato do nutriente. Nesse grupo, o MAP (fosfato monoamônico) se destaca como uma fonte de uso frequente por combinar fósforo e nitrogênio em um único fertilizante, apresentando elevada concentração de P_2O_5 e rápida disponibilidade após a aplicação, características que favorecem seu uso em sistemas intensivos e em cultivos de ciclo curto.

Apesar dessas vantagens, a elevada solubilidade dessas fontes também contribui para que, em solos tropicais intemperizados, parte do fósforo liberado seja rapidamente adsorvida por superfícies minerais reativas, sobretudo em solos ácidos e ricos em óxidos de ferro e alumínio. Nesses ambientes, a fração lábil do fósforo pode diminuir logo após a aplicação, reduzindo a eficiência imediata do fertilizante e tornando a resposta agrônômica dependente de fatores como tipo de solo, posicionamento da adubação, umidade e tempo de contato entre o grânulo e a matriz do solo (Stauffer et al., 2019).

Além da adsorção, a baixa mobilidade do fósforo no solo também influencia o desempenho agrônômico das fontes fosfatadas. Como o deslocamento do nutriente ocorre a curtas distâncias a partir do ponto de aplicação, a eficiência do fertilizante depende fortemente do posicionamento em relação ao sistema radicular e da formação de uma zona de influência ao redor do grânulo. Por isso, fontes solúveis tendem a apresentar melhor desempenho quando o objetivo é suprir rapidamente a demanda inicial da cultura, desde que sejam utilizadas em condições que favoreçam o aproveitamento do nutriente pela planta (Stauffer et al., 2019).

Por outro lado, fontes de menor solubilidade, como fosfatos naturais reativos e termofosfatos, apresentam liberação mais gradual do fósforo e podem ter maior interesse em estratégias de construção de fertilidade ou em condições específicas de solo e manejo. Entretanto, em culturas anuais com elevada exigência inicial de P, essas fontes nem sempre acompanham a velocidade de demanda da planta, o que exige avaliação criteriosa quanto à escolha da fonte, à dose aplicada e ao ambiente de cultivo (Pizzatto et al., 2025).

Dessa forma, a escolha entre diferentes fontes fosfatadas deve considerar não apenas o teor de P_2O_5 do fertilizante, mas também sua solubilidade, sua interação com o solo e a capacidade de atender à demanda da cultura no período de maior necessidade. Em experimentos comparativos, essa distinção é fundamental para interpretar se o desempenho observado decorre da natureza da fonte, da disponibilidade imediata do fósforo ou da interação entre o fertilizante e as características químicas e físicas do solo.

2.4 Tecnologias de proteção de fertilizantes fosfatados

Em solos com alta capacidade de fixação de P, destacam-se as chamadas tecnologias de proteção, também inseridas no grupo dos fertilizantes de eficiência aprimorada. A proposta dessas tecnologias é reduzir o contato direto do fosfato com superfícies reativas do solo e/ou manter o P por mais tempo em formas mais lábeis. Na prática, isso pode ocorrer por meio de revestimentos e/ou da adição de compostos que interferem nas reações de adsorção e precipitação do fósforo.

Um grupo importante envolve os revestimentos poliméricos. Stauffer et al. (2019) descrevem que esses revestimentos podem promover liberação mais gradual de nutrientes e reduzir a adsorção ao fornecer uma proteção física ao grânulo, diminuindo o contato com os colóides do solo. Os autores ressaltam que a eficiência do revestimento pode variar de acordo com a umidade e a temperatura do solo, bem como com características do próprio material, como porosidade, permeabilidade e espessura, o que ajuda a explicar diferenças de desempenho entre estudos e entre ambientes.

Outra estratégia consiste na associação do fósforo a materiais orgânicos ou a compostos com ação complexante. A hipótese é que determinados compostos orgânicos possam competir por sítios de adsorção e/ou interagir com Fe e Al na solução do solo, reduzindo a adsorção e a precipitação do fosfato.

Nessa linha, Rosolem et al. (2024) observaram que o revestimento de superfosfato simples com ácido húmico aumentou o transporte de P no solo e elevou a absorção do nutriente e a produção de biomassa em milho, sugerindo aumento da fração de P lábil e melhor aproveitamento do fósforo pela planta.

No caso de fontes comerciais protegidas, Pizzatto et al. (2025) descrevem o Top-Phos como um fertilizante fosfatado protegido, proposto para reduzir a fixação do P por Al, Fe e Ca, especialmente em solos ácidos, favorecendo sua disponibilidade às plantas. No mesmo contexto, o presente estudo também avaliou a fonte Solotek/P35, igualmente classificada entre as fontes com tecnologia associada. Embora se trate de produtos comerciais distintos, ambos se inserem na proposta de melhorar a eficiência do fósforo

aplicado em condições de elevada retenção no solo. Pizzatto et al. (2025) também relatam respostas agronômicas superiores para fontes protegidas em comparação com fontes menos reativas e destacam que fatores de manejo, como a profundidade de aplicação, também interferem no aproveitamento do nutriente.

Dessa forma, a literatura sugere que tanto a natureza da fonte, em termos de solubilidade e composição, quanto a tecnologia agregada, como revestimentos e aditivos, podem alterar a dinâmica do P no solo, sobretudo em condições de alta fixação. Isso justifica a comparação, em condições controladas, de uma fonte convencional, como o MAP, com fontes comerciais com tecnologia associada, como Top-Phos e Solotek/P35, a fim de verificar se diferenças na disponibilidade de P se refletem em respostas no crescimento do milho e em alterações no P residual do solo.

2.5 EFEITOS DE DOSES CRESCENTES EM SOLOS COM ALTA FIXAÇÃO DE FÓSFORO

Em solos tropicais altamente intemperizados, a resposta das culturas ao aumento das doses de fósforo nem sempre é proporcional, pois parte do nutriente aplicado pode ser rapidamente retida por componentes do solo, especialmente óxidos de ferro e alumínio. Com isso, a fração que permanece em formas mais lábeis e disponíveis na solução do solo pode não aumentar na mesma proporção da dose aplicada. Assim, em ambientes com alta capacidade de adsorção, incrementos sucessivos de P podem resultar em ganhos agronômicos progressivamente menores, dependendo das características do solo (Amenkhienan et al., 2024).

Além do tipo de solo, a fonte de fósforo também influencia o desempenho agronômico. Em avaliação recente com milho, em condições de casa de vegetação e em diferentes solos tropicais brasileiros, observou-se que fontes convencionais altamente solúveis, como o TSP (superfosfato triplo), apresentaram valores superiores para atributos da cultura, como altura, diâmetro, biomassa e acúmulo de nutrientes, em relação a algumas fontes alternativas. Os autores também destacam que os resultados variaram conforme o solo, sugerindo que a eficiência da adubação depende do contexto edáfico e não apenas do fertilizante em si (Rodrigues da Silva et al., 2024).

Outro fator que interfere na resposta às doses é o tempo de contato do fertilizante com o solo e a umidade, que podem alterar a disponibilidade do P extraível logo após a aplicação. Em estudo controlado avaliando fontes convencionais e fontes com tecnologia associada, observou-se que o teor de P disponível, extraído por Mehlich-1 e por água, variou conforme o tipo de fertilizante, o potencial mátrico e o período após a aplicação,

indicando que o ambiente do solo influencia diretamente o destino do fósforo logo após a adubação (Stauffer et al., 2019).

Desse modo, em solos com alta fixação de fósforo, a eficiência agrônômica da adubação depende da interação entre dose aplicada, natureza da fonte, condições do solo e manejo de aplicação. No caso do milho, cultura com elevada exigência nutricional nas fases iniciais, essa interação deve ser considerada na interpretação das respostas de crescimento e na avaliação da disponibilidade residual de P no solo, uma vez que o aumento da dose, isoladamente, não garante maior aproveitamento do nutriente pela planta (Amenkhienan et al., 2024; Rodrigues da Silva et al., 2024).

2.6 A CULTURA DO MILHO E RESPOSTA À ADUBAÇÃO FOSFATADA

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de alta exigência nutricional e com resposta expressiva ao manejo de fertilidade, principalmente em ambientes onde há limitações químicas do solo. O fósforo é particularmente importante no início do desenvolvimento, pois participa de processos ligados à transferência de energia (ATP/ADP), síntese de ácidos nucleicos e estrutura de membranas, o que se reflete no vigor inicial, expansão foliar e estabelecimento do sistema radicular (Epstein; Bloom, 2005; Marschner, 2012).

Em condições de baixa disponibilidade de P, o milho pode apresentar redução do crescimento, atraso no desenvolvimento e menor exploração do solo pelas raízes, além de ajustes fisiológicos para aumentar a eficiência de aquisição do nutriente, como mudanças na arquitetura radicular e maior exploração da rizosfera. Essas respostas são especialmente relevantes em solos com forte retenção do fosfato, nos quais a limitação não depende apenas da quantidade total de P presente, mas da fração que efetivamente alcança a raiz em forma assimilável (Shen et al., 2011).

Estudos recentes com milho em solos tropicais reforçam que a resposta da cultura depende do tipo de solo, da fonte e do manejo. Em avaliações com diferentes fontes em solos tropicais brasileiros, observaram-se variações importantes em atributos como altura, biomassa e acúmulo de nutrientes, indicando que o desempenho agrônômico é condicionado pelo ambiente edáfico (Rodrigues da Silva et al., 2024). Em condições de campo, comparando fontes como SSP, Top-Phos e fosfato natural reativo em diferentes profundidades de aplicação, também foram registradas diferenças de produtividade e de características da planta, sugerindo que o posicionamento do fertilizante pode ser tão relevante quanto a escolha da fonte (Pizzatto et al., 2025). Esse aspecto é particularmente importante em condições tropicais como as de Sergipe e do Nordeste brasileiro, onde solos ácidos e, em muitos casos, com elevada fração argilosa e forte capacidade de

retenção podem intensificar a limitação do fósforo e alterar a resposta da cultura à adubação.

Além das variáveis de crescimento, alguns indicadores fisiológicos podem ajudar a interpretar respostas do milho à nutrição. A fluorescência da clorofila, por exemplo, é frequentemente usada como medida indireta do funcionamento fotossintético e pode ser sensível a estresses nutricionais e alterações no metabolismo energético. Embora não seja um “substituto” de produtividade, ela pode complementar a avaliação quando interpretada em conjunto com dados de crescimento e disponibilidade de nutrientes (Maxwell; Johnson, 2000; Taiz et al., 2017).

No contexto da adubação fosfatada, a eficiência das fontes também depende da forma como o fósforo interage com o solo após a aplicação. Fontes altamente solúveis, como o MAP, liberam rapidamente o nutriente, mas em solos ácidos e ricos em óxidos de Fe e Al parte desse fósforo pode ser adsorvida logo após a aplicação. Em contraste, fontes de menor solubilidade liberam o nutriente de forma mais gradual, podendo contribuir para a fertilidade ao longo do tempo, embora nem sempre atendam com a mesma eficiência à demanda inicial de culturas de ciclo curto. Diante dessas limitações, surgiram tecnologias de proteção de fertilizantes, como revestimentos poliméricos e aditivos orgânicos, com a proposta de reduzir o contato imediato do fosfato com superfícies reativas do solo, modificar o microambiente ao redor do grânulo e prolongar sua permanência em formas mais lábeis. Assim, essas tecnologias podem favorecer a disponibilidade inicial do nutriente em ambientes de maior fixação, embora sua eficiência também dependa das condições de solo e manejo (Stauffer et al., 2019; Rosolem et al., 2024).

Dessa forma, ao avaliar a adubação fosfatada no milho em solos com alta fixação, faz sentido integrar: (i) variáveis de crescimento (parte aérea e sistema radicular), (ii) teores de P no solo após a aplicação, e (iii) indicadores fisiológicos que ajudem a interpretar o estado da planta. Essa abordagem permite discutir não só “se a planta cresceu mais”, mas também se houve indícios de maior eficiência em disponibilizar e aproveitar o P aplicado (Amenkhienan et al., 2024; Rosolem et al., 2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESENHO DO ESTUDO

Foi conduzido um experimento em condições controladas, em casa de vegetação, com o objetivo de avaliar a resposta do milho (*Zea mays L.*) à adubação fosfatada utilizando diferentes fontes e doses de fósforo. O estudo comparou três fontes fosfatadas — MAP, Top-Phos e Solotek/P35 — nas doses de 40, 80, 100 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, além de um tratamento controle sem adubação fosfatada. A avaliação foi realizada com ênfase em variáveis morfológicas, como área de parte aérea e área de raiz, em variáveis fisiológicas, por meio da fluorescência da clorofila a (teste OJIP), e no teor de fósforo disponível/residual no solo após o cultivo, determinado pelo extrator Mehlich-1.

3.2 LOCAL DO ESTUDO E PERÍODO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão–SE (10°55'37.2"S; 37°06'07.0"W), no período de junho a outubro de 2025. O solo utilizado foi coletado no município de Frei Paulo–SE (10°31'48.9"S; 37°31'05.7"W), na camada de 0–20 cm.

3.3 SOLO: COLETA, PREPARO E CARACTERIZAÇÃO

O solo foi coletado na camada de 0–20 cm no município de Frei Paulo–SE e submetido à secagem ao ar, destorroamento e peneiramento em malha de 2 mm para caracterização química e física prévia. Considerando as informações de textura e o mapa de solos do estado, o solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo e apresentou alta capacidade de adsorção de fósforo (P-rem = 14,44 mg L⁻¹). Na caracterização física, o solo apresentou 201 g kg⁻¹ de areia, 145 g kg⁻¹ de silte e 653 g kg⁻¹ de argila. Na caracterização química, observou-se pH(H₂O) = 5,25; matéria orgânica = 2,52%; Al³⁺ = 0,27 cmolc dm⁻³; H+Al = 2,19 cmolc dm⁻³; CTC = 5,36 cmolc dm⁻³ e saturação por bases (V) = 59,1%.

3.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento adotado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 3 × 4 + 1, correspondente à combinação de três fontes de fósforo e quatro doses, acrescida de um tratamento adicional controle sem adubação fosfatada (0 kg ha⁻¹

de P_2O_5), também com quatro repetições. As fontes avaliadas foram MAP, Top-Phos e Solotek/P35, e as doses utilizadas corresponderam a 40, 80, 100 e 120 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 .

Ao todo, foram utilizadas 52 unidades experimentais, constituídas por vasos contendo 0,5 dm^3 de solo, com ajuste proporcional das doses para o volume de solo por vaso, garantindo equivalência de dose entre as fontes. A estrutura dos tratamentos, bem como o número de repetições adotado em cada condição experimental, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estrutura dos tratamentos (fonte × dose) e número de repetições (n).

Tratamento	Fonte	Dose ($kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5)	N
T0	Controle (sem P)	0	4
T1	MAP (convencional)	40	4
T2	MAP (convencional)	80	4
T3	MAP (convencional)	100	4
T4	MAP (convencional)	120	4
T5	Top-Phos	40	4
T6	Top-Phos	80	4
T7	Top-Phos	100	4
T8	Top-Phos	120	4
T9	Solotek/P35	40	4
T10	Solotek/P35	80	4
T11	Solotek/P35	100	4
T12	Solotek/P35	120	4
Total			52

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

3.5 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Após a aplicação dos tratamentos, foram semeadas duas sementes de milho por vaso, utilizando a variedade DKB 356 PRO4 (Dekalb). Em seguida, os vasos foram irrigados até a 80% da capacidade de campo e a umidade do solo foi mantida diariamente. A emergência das plântulas ocorreu aproximadamente cinco dias após a semeadura, sendo realizado desbaste para permanência de uma planta por vaso.

No 11º dia após a semeadura, foi realizada adubação nitrogenada de cobertura, aplicando-se o equivalente a 150 $kg\ ha^{-1}$ de N na forma de ureia, com ajuste proporcional ao volume de solo do vaso, correspondendo a 0,0375 g de N por vaso. Considerando a ureia como fonte com 45% de N, a quantidade aplicada foi de aproximadamente 0,083 g de ureia por vaso.

3.6 VARIÁVEIS AVALIADAS E PROCEDIMENTOS DE COLETA

Ao final do período experimental, as plantas foram retiradas dos vasos, lavadas e submetidas à obtenção de imagens em equipamento Groundeye, para quantificação das variáveis morfológicas: área de parte aérea (cm²) e área de raiz (cm²).

Após o cultivo, foi realizada análise do solo para mensuração do fósforo disponível/residual utilizando o extrator Mehlich-1 (mg dm⁻³), como indicador do efeito residual das doses aplicadas e da disponibilidade de P no sistema solo-planta.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram organizados e analisados com auxílio dos softwares SISVAR, R e ASSISTAT. Para as variáveis avaliadas, considerou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo testados os efeitos de blocos, fontes de fósforo, doses e da interação fonte × dose, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

No conjunto fatorial, foram analisadas as combinações entre três fontes de fósforo (MAP, Top-Phos e Solotek/P35) e quatro doses (40, 80, 100 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Quando observados efeitos significativos, procedeu-se à comparação de médias e/ou à análise de regressão para o fator dose, conforme a natureza da variável e da resposta obtida.

O tratamento controle (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅) foi considerado adicional, sem associação a uma fonte de fósforo, sendo utilizado como referência comparativa na interpretação dos resultados. Assim, nas análises envolvendo dose, o controle correspondeu à condição de ausência de adubação fosfatada (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅), enquanto, nas análises envolvendo fontes, foi tratado como tratamento adicional, e não como uma fonte propriamente dita. Dessa forma, a soma de quadrados dos tratamentos foi decomposta em fontes, doses, interação fonte × dose e no contraste entre o conjunto fatorial e o controle adicional.

Os resultados da análise de variância foram resumidos por meio dos quadrados médios, médias gerais e coeficientes de variação, com indicação da significância dos efeitos avaliados. Uma síntese desses resultados para as variáveis morfológicas é apresentada posteriormente na Tabela 1.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância para as variáveis área de parte aérea e área de raiz de milho submetido a diferentes fontes e doses de fósforo, em delineamento em blocos casualizados.

Fonte de variação	GL	Área de parte aérea (QM)	Área de raiz (QM)
Blocos	3	1895,59 ns	1620,64 ns
Fontes	2	2413,97 ns	1299,92 ns
Doses	3	28861,38 **	5067,92 **
Fontes x doses	6	1057,33 ns	1578,03 ns
Fatorial vs controle	1	48389,50 **	13871,77 **
Resíduo	36	1762,14	953,80
Média geral	-	155,10	92,24
CV (%)	-	27,06	33,48

Fonte: Elaborado com base nos dados experimentais da pesquisa (2025).

Nota: ns = não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

3.8 REGISTRO FOTOGRÁFICO DO EXPERIMENTO

As Figuras 1 a 6 apresentam registro fotográfico do preparo das doses de fertilizante, condução do experimento em casa de vegetação e etapa laboratorial de extração do P disponível.

Figura 1: Fracionamento das doses de P_2O_5 por unidade experimental (vaso)



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 2: Emergência das plântulas de milho após a sementeira



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 3: Desenvolvimento vegetativo do milho em casa de vegetação



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 4: Extração do P disponível no solo (Mehlich-1) em laboratório



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 5: Rótulo do fertilizante Top-Phos utilizado no experimento

TOP-PHOS-328 MASTER

Modo de aplicação: via solo | Categoria: Fertilizante Mineral Complexo

%N Total 03	%P2O5 Sol.+CNA 28	%K2O Sol.+H2O 00	Componentes: 11.44-00: Amônia; Fornec: Micronutrientes; SSP
10%C e 9%S (9%SO4) 0,08%B 0,08%Cu 0,2%Mn 0,2%Zn			

REG EP: BA 000537-1 Natureza Física: Granulado

Contém aditivos: 0,3% antidemperante: 0,6%	Fabricação: 31/08/2024 Lote: 134/24 Fabricado na Bahia - Candeias Cod. Prod. 032800RO20380 RP: RS 000155-0 000134
---	---

05648249.22/3



05648249.22/3
Cod. Prod. 032800RO20380
RP: RS 000155-0 000134

Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 6: Rótulo do fertilizante Solotek utilizado no experimento

SOLOTEK INDÚSTRIA DE ADUBOS E FERTILIZANTES S.A.			
CNPJ: 04.848.257(0003-97)		EP GP 000157	
Distrito Agroindustrial de Anápolis		CEP: 75.166-450	
CEP: 75.166-450		Anápolis – GO	
REG.: MINERAL COMPLEXO		REG.: 100157 – 100005	
GARANTIAS	% N TOTAL:	% P205	% K20
	TOTAL SOL	AGUA SOL <small>AGUA TOTA</small>	AGUA TOTAL <small>AGUA TOTL</small>
	03	28	00
	INDÚSTRIA BRASILEIRA %N(TOTAL):3%/P20s(SOL.CNA + H2O):10%C e 9%C (9%SO ₄) - CONTEM ADITIVO 0,25% 0,08%B, 0,08%Cu,0,2%Mn, 0,2%Zn		
	P35 05 35 00 – SOLUBILIZADOR DE FÓSFORO:0,25%		
ESPECIFICAÇÃO DE NATUREZA FÍSICA:			
GRANULADO		CORANTES S.: \$A	
LOTE: 26042210	DATA FABRICAÇÃO: 22/04/2025		
TON.: 32	VALIDADE: 22/04/2027		
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA			

Fonte: Acervo do autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ORGANIZAÇÃO E CHECAGEM DOS DADOS

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos a partir da consolidação das variáveis morfológicas, fisiológicas e químicas avaliadas no experimento, considerando as 52 unidades experimentais distribuídas nos 13 tratamentos descritos na metodologia. Após a conferência e padronização dos registros, as análises foram conduzidas com base nos valores válidos de cada variável, mantendo-se a identificação dos tratamentos e repetições para interpretação dos resultados.

4.2 CRESCIMENTO – ÁREA DE PARTE AÉREA

A área de parte aérea foi influenciada significativamente pelas doses de fósforo, enquanto não foram observados efeitos isolados de fontes nem da interação fonte \times dose (Tabela X). Além disso, o contraste entre o conjunto fatorial e o tratamento controle foi significativo, indicando que os tratamentos com aplicação de fósforo apresentaram desempenho superior ao T0 (controle sem P) para crescimento da parte aérea.

De modo geral, a menor média foi observada no T0, com 49,43 cm², evidenciando que, nas condições do experimento, a ausência de adubação fosfatada limitou o crescimento inicial do milho. Em contraste, os tratamentos com aplicação de P apresentaram médias superiores, variando de 93,19 a 235,53 cm². Esse resultado confirma a importância do fósforo no estabelecimento inicial da cultura, especialmente por seu papel na transferência de energia, expansão foliar e formação de tecidos, refletindo diretamente no crescimento vegetativo.

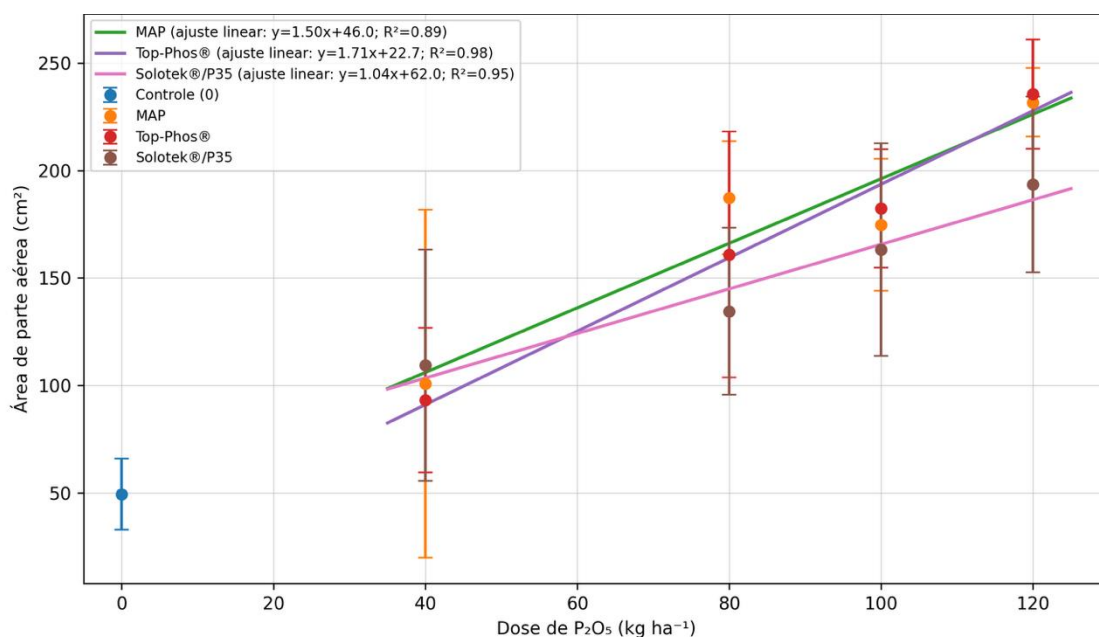
Considerando o efeito de dose, observou-se tendência geral de aumento da área de parte aérea com a elevação das doses de P₂O₅ para as três fontes avaliadas (Figura 7). As maiores médias foram registradas nas doses mais elevadas, com destaque para T4 (MAP, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), que apresentou média de 231,68 cm², e T8 (Top-Phos, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), com 235,53 cm². Para a fonte Solotek/P35, a maior média foi observada em T12, com 193,52 cm², também superior ao controle, porém inferior, em termos descritivos, aos maiores valores observados para MAP e Top-Phos na dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Embora as médias tenham variado entre tratamentos dentro de cada dose, a ausência de efeito significativo de fontes e da interação fonte \times dose indica que, no intervalo avaliado, o principal fator associado ao aumento da área de parte aérea foi o incremento da dose de fósforo, e não a fonte utilizada isoladamente. Assim, ao descrever os tratamentos individuais, as diferenças observadas entre eles devem ser interpretadas principalmente como reflexo da resposta à dose, sem evidência estatística de que uma fonte tenha superado consistentemente as demais em todas as condições avaliadas.

Esse comportamento é coerente com a literatura, uma vez que o fósforo exerce papel central no crescimento inicial do milho, e sua deficiência reduz o vigor vegetativo e a expansão da parte aérea. Em solos com alta capacidade de fixação, o aumento da dose

pode elevar a fração de nutriente disponível à planta, favorecendo o crescimento mesmo quando parte do P aplicado é retida pelo solo. Dessa forma, os resultados indicam que a adubação fosfatada foi determinante para o incremento da área de parte aérea, enquanto as diferenças entre fontes foram de menor magnitude nas condições estudadas.

Figura 7 – Área de parte aérea em função da dose de P_2O_5 de diferentes tecnologias de fosforo.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

4.3 CRESCIMENTO – ÁREA DE RAIZ

A área de raiz foi influenciada significativamente pelas doses de fósforo, enquanto não foram observados efeitos isolados de fontes nem da interação fonte \times dose (Tabela 1). O contraste entre o conjunto fatorial e o tratamento controle também foi significativo, indicando que os tratamentos com aplicação de fósforo promoveram maior desenvolvimento radicular em comparação ao T0 (controle sem P).

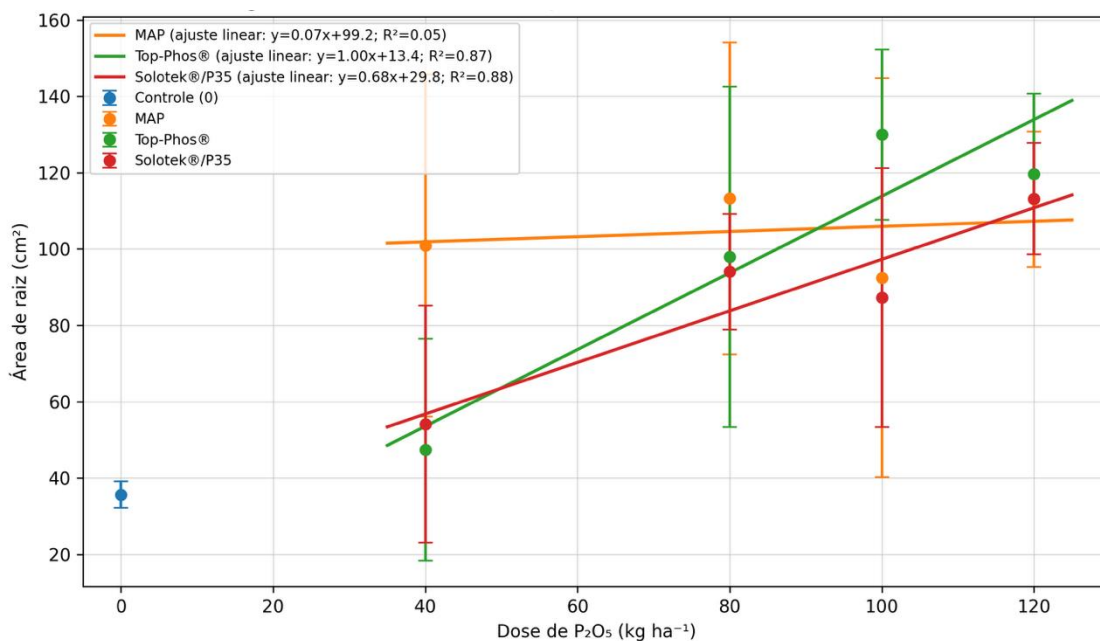
A menor média foi observada no T0, com 35,66 cm², evidenciando menor desenvolvimento do sistema radicular na ausência de adubação fosfatada. Em contraste, os tratamentos com aplicação de P apresentaram médias superiores, variando de 49,81 a 131,24 cm², o que reforça a importância do fósforo para o estabelecimento inicial das raízes e para a ampliação da capacidade de exploração do solo.

Considerando o efeito de dose, observou-se tendência geral de aumento da área de raiz com a elevação das doses de P_2O_5 , especialmente nas maiores doses avaliadas. Os maiores valores foram registrados em T8 (Top-Phos, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5), com média de $131,24 \text{ cm}^2$, e em T12 (Solotek/P35, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5), com $126,48 \text{ cm}^2$. Para a fonte MAP, a maior média foi observada em T4, com $109,95 \text{ cm}^2$. Assim, sob ponto de vista descritivo, os maiores crescimentos radiculares ocorreram nas doses mais elevadas, com destaque para os tratamentos T8 e T12.

Entretanto, como não houve efeito significativo de fontes nem interação fonte \times dose, não se pode afirmar que uma fonte tenha sido estatisticamente superior às demais para crescimento radicular no intervalo avaliado. Dessa forma, a principal diferença observada está associada ao aumento da dose de fósforo, e não à fonte utilizada de forma isolada. As variações entre tratamentos dentro de uma mesma dose devem, portanto, ser interpretadas com cautela, como diferenças descritivas e não como superioridade estatística consistente entre fontes.

Esse resultado é coerente com a função do fósforo no crescimento inicial do milho, especialmente no desenvolvimento do sistema radicular. Em condições de maior disponibilidade do nutriente, há favorecimento da divisão celular, do alongamento das raízes e da capacidade de exploração do solo, o que tende a ampliar a absorção de água e nutrientes. Assim, os resultados indicam que a adubação fosfatada foi determinante para o incremento da área de raiz, enquanto as diferenças entre fontes foram secundárias nas condições experimentais adotadas.

Figura 8 – Área de raiz em função da dose de P_2O_5 , para diferentes fontes de fósforo.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

4.4 FÓSFORO DISPONÍVEL NO SOLO APÓS O CULTIVO

O teor de fósforo disponível no solo (Mehlich-1) após o cultivo variou entre as fontes e doses avaliadas. No tratamento controle (T0), o valor médio foi de 0,506 mg dm⁻³, indicando baixa disponibilidade residual de P ao final do ciclo e reforçando que, na ausência de adubação fosfatada, o solo manteve baixos teores do nutriente disponível.

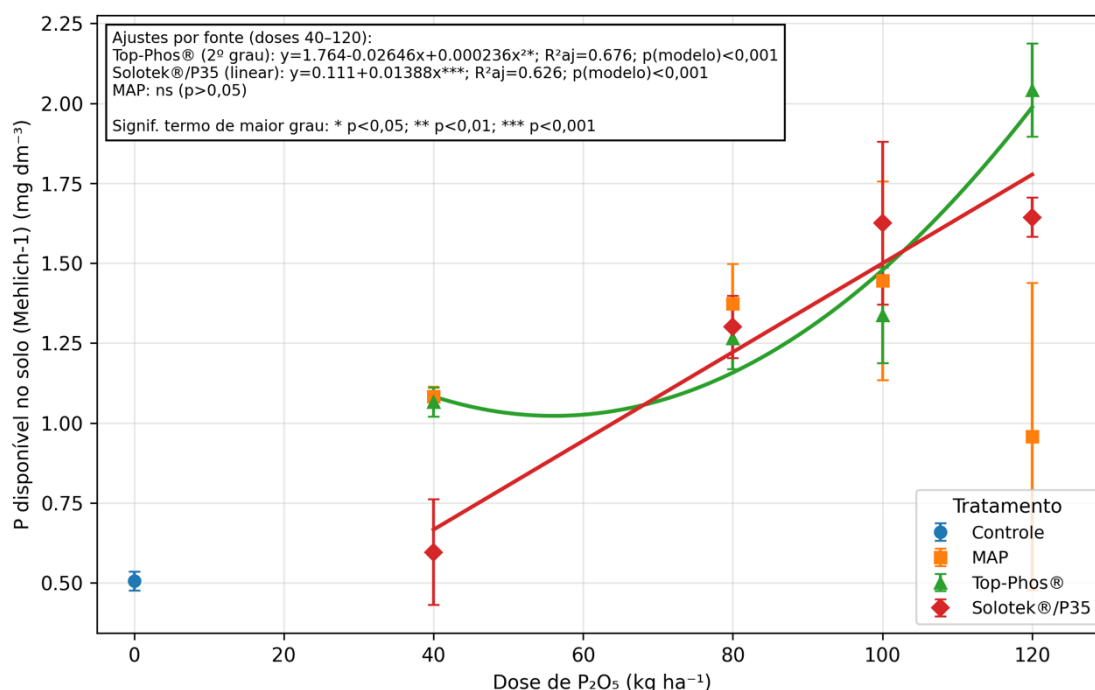
A resposta ao incremento das doses foi distinta entre as fontes (Figura 9). Para Solotek/P35, observou-se ajuste linear significativo ($p < 0,001$), indicando aumento progressivo e consistente do teor de P disponível no solo com a elevação das doses de P₂O₅. Esse comportamento sugere que, nas condições avaliadas, essa fonte apresentou resposta mais regular quanto ao efeito residual, com incremento proporcional do fósforo disponível no solo à medida que a dose aumentou.

Para Top-Phos, foi observado ajuste quadrático significativo ($p < 0,001$), com termo de maior grau significativo ($p < 0,05$), evidenciando resposta curvilínea. Em termos práticos, isso indica que o aumento do P disponível não ocorreu de forma estritamente proporcional ao acréscimo da dose, mas tornou-se mais acentuado nas doses mais elevadas. Esse comportamento sugere que a fonte passou a expressar de forma mais evidente seu efeito residual nas maiores doses, com maior acúmulo de fósforo disponível ao final do cultivo.

Para MAP, por outro lado, não foi observado ajuste significativo no intervalo avaliado ($p > 0,05$), havendo maior oscilação entre doses e variabilidade entre repetições. Isso indica que, embora a fonte tenha contribuído para elevação do P disponível em alguns tratamentos, seu comportamento foi menos estável e menos previsível que o observado para Top-Phos e Solotek/P35. Assim, nas condições deste experimento, o MAP não apresentou uma tendência dose–resposta bem definida para fósforo residual no solo.

De modo geral, os resultados indicam que as três fontes diferiram mais pelo padrão de resposta ao aumento das doses do que por simples presença ou ausência de efeito. A Solotek/P35 apresentou o comportamento mais consistente ao longo do intervalo avaliado, o Top-Phos mostrou maior incremento do fósforo disponível nas doses mais altas, e o MAP apresentou resposta menos definida. Isso sugere que, para a variável fósforo disponível no solo após o cultivo, as fontes com tecnologia associada demonstraram comportamento residual mais evidente nas condições experimentais adotadas.

Figura 9 – P disponível no solo (Mehlich-1) em função da dose de P_2O_5 para diferentes fontes após o cultivo.



Observação: Os pontos representam média \pm erro padrão ($n = 4$). As linhas correspondem aos ajustes de regressão significativos para cada fonte, sendo linear para Solotek/P35 e quadrático

para Top-Phos. Para MAP, não foi observado ajuste significativo no intervalo avaliado. $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$ indicam significância do termo de maior grau; ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

4.5 FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A (TESTE OJIP)

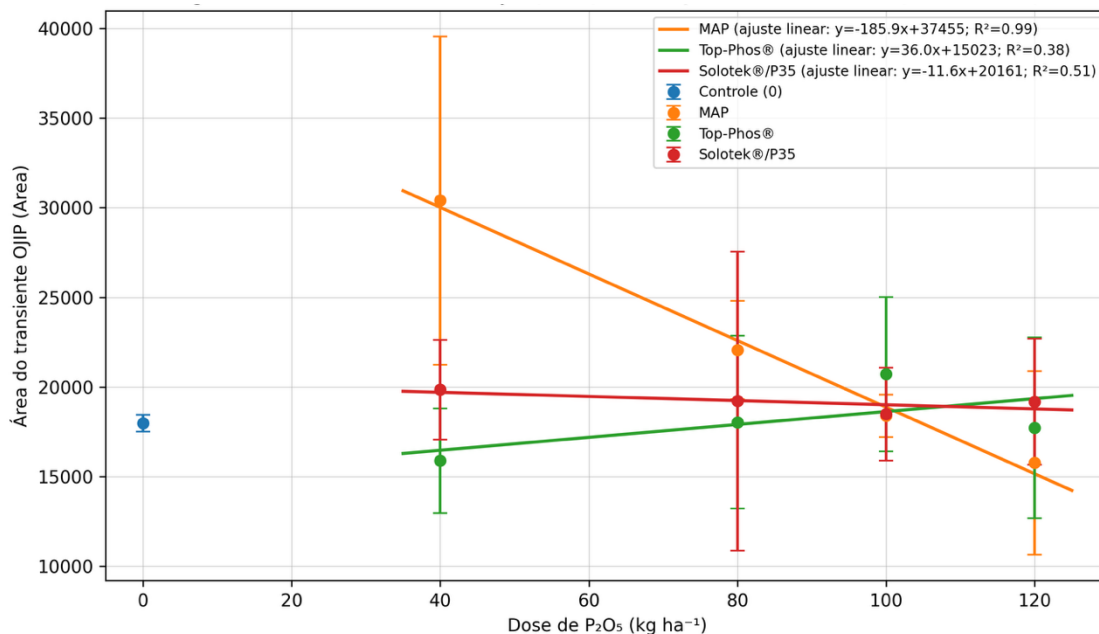
A fluorescência da clorofila a (teste OJIP) foi utilizada para avaliar o comportamento fotossintético das plantas sob diferentes fontes e doses de fósforo. De modo geral, os parâmetros F_v/F_m e PI apresentaram variação discreta entre os tratamentos, sem um padrão consistente de aumento ou redução ao longo das doses ou entre as fontes avaliadas. Esse resultado indica que, nas condições do experimento, o desempenho fotoquímico global das plantas foi mantido, sem evidência de alteração marcante nesses indicadores mais integrativos.

Para a variável Area (área do transiente OJIP), observou-se comportamento distinto em relação aos demais parâmetros. Na Figura 10, nota-se que a resposta variou conforme a fonte avaliada, com tendência de redução mais evidente para MAP nas doses mais altas, enquanto Top-Phos e Solotek/P35 apresentaram comportamento mais estável ao longo do intervalo estudado. Assim, embora não tenha havido mudança expressiva em F_v/F_m e PI, a variável Area mostrou-se mais sensível para detectar alterações pontuais na resposta fisiológica das plantas ao aumento das doses de fósforo.

Esse padrão sugere que o suprimento de fósforo não foi suficiente para provocar alterações claras no funcionamento fotoquímico global, mas pode ter influenciado componentes mais específicos do transiente de fluorescência, especialmente em alguns tratamentos. Como F_v/F_m e PI permaneceram relativamente estáveis, a interpretação da variável Area deve ser feita com cautela, considerando a variabilidade entre repetições e o fato de que mudanças isoladas em um parâmetro do teste OJIP nem sempre se traduzem em prejuízo fisiológico efetivo.

De forma geral, os resultados indicam que, no intervalo de doses avaliado, o fósforo exerceu efeito mais evidente sobre as variáveis de crescimento e sobre o fósforo residual no solo do que sobre os indicadores globais de fluorescência. Assim, para este experimento, o teste OJIP contribuiu como ferramenta complementar de interpretação fisiológica, mas sem evidenciar alterações marcantes no estado fotoquímico das plantas.

Figura 10 – Área do transiente OJIP (Area) em função de doses de P₂O₅ (kg ha⁻¹) para diferentes fontes (MAP, Top-Phos e Solotek/P35)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

4.6 CORRELAÇÃO ENTRE P DISPONÍVEL NO SOLO E VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO

A análise de correlação foi realizada com o objetivo de verificar se o fósforo disponível no solo após o cultivo acompanhou o comportamento das variáveis de crescimento. Para evitar interpretações artificiais decorrentes da mistura de tratamentos com respostas distintas, as correlações foram avaliadas separadamente dentro de cada fonte, permitindo comparar o grau de associação entre o P residual no solo e as variáveis morfológicas.

Na fonte Solotek/P35, observou-se correlação positiva e significativa entre o P disponível no solo e a área de parte aérea ($r = 0,71$; $p = 0,0019$; $n = 16$), indicando que unidades com maior teor residual de P tenderam a apresentar maior crescimento da parte aérea (Figura 11). De forma semelhante, também foi verificada correlação positiva e significativa entre o P disponível no solo e a área de raiz ($r = 0,74$; $p = 0,0011$; $n = 16$) (Figura 12). Em termos práticos, esses resultados indicam que, para essa fonte, maiores teores de fósforo residual no solo estiveram associados a melhor desempenho de crescimento, tanto da parte aérea quanto do sistema radicular.

Na fonte MAP, não foram observadas correlações significativas. Para área de parte aérea, a correlação foi praticamente nula ($r = -0,06$; $p = 0,8178$; $n = 16$) (Figura 13), enquanto, para área de raiz, a correlação foi negativa e de magnitude moderada, porém sem significância estatística ($r = -0,44$; $p = 0,0869$; $n = 16$) (Figura 14). Esse resultado sugere ausência de associação consistente entre o fósforo residual medido no solo e as variáveis de crescimento dentro dessa fonte nas condições avaliadas.

Para Top-Phos, as correlações foram positivas, porém não significativas, tanto para área de parte aérea ($r = 0,30$; $p = 0,2523$; $n = 16$) (Figura 15) quanto para área de raiz ($r = 0,39$; $p = 0,1316$; $n = 16$) (Figura 16). Embora o sentido das associações indique tendência favorável, a ausência de significância estatística aponta maior dispersão entre as repetições e ausência de um padrão suficientemente consistente para confirmar associação linear entre as variáveis.

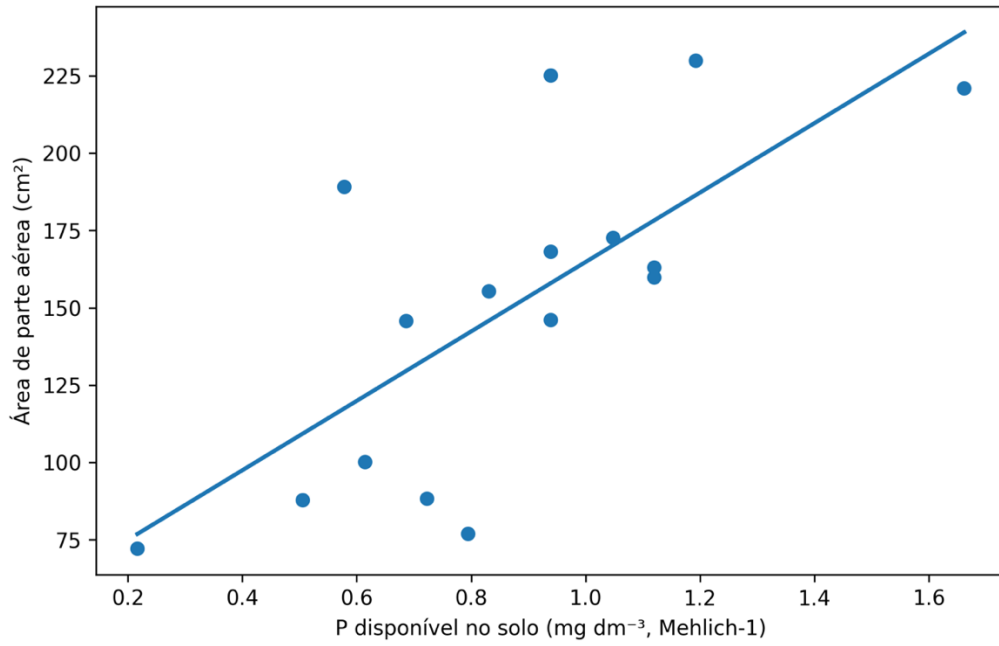
De modo geral, os resultados indicam que a relação entre fósforo residual no solo e crescimento vegetal dependeu da fonte avaliada. A associação significativa observada apenas para Solotek/P35 sugere que, nessa condição, o teor de P disponível ao final do cultivo refletiu de forma mais clara a resposta de crescimento das plantas. Embora correlação não implique causalidade, esse padrão reforça a importância de interpretar conjuntamente o comportamento do fósforo no solo e as variáveis morfológicas, especialmente quando se comparam fontes com dinâmicas distintas de disponibilização do nutriente.

Figura 11 – Correlação entre P disponível no solo e área de parte aérea (cm²) para

a

fonte

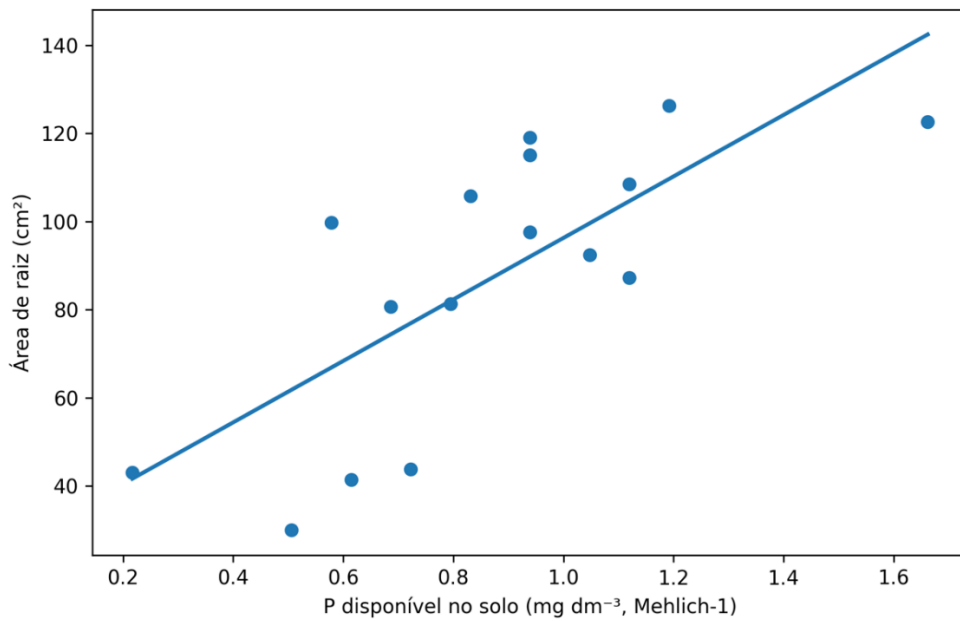
Solotek.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

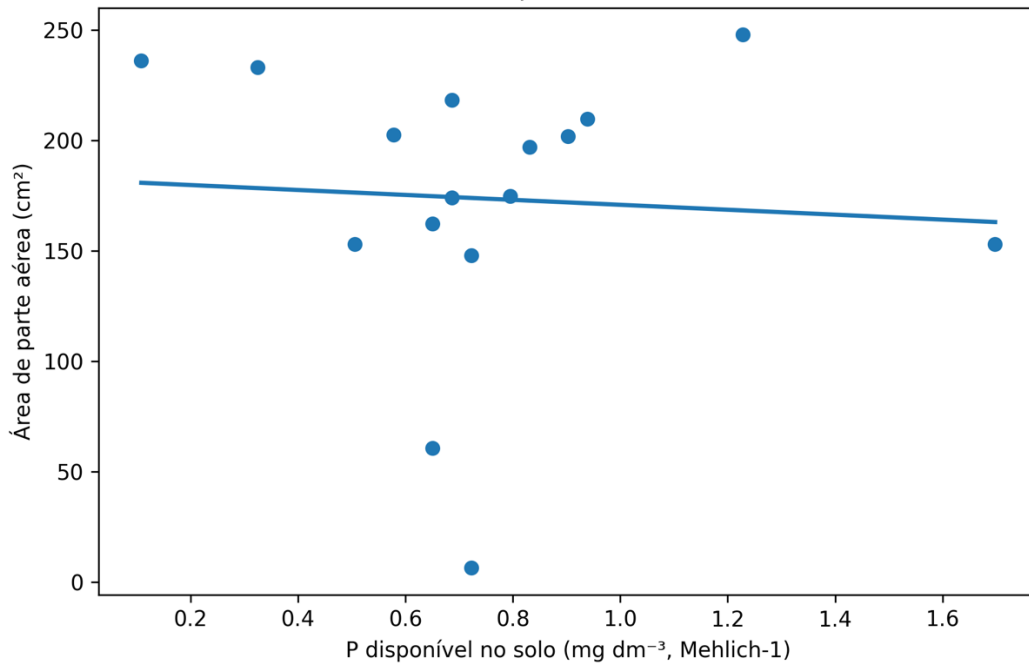
Figura 12 – Correlação entre P disponível no solo e área de raiz (cm²) para a fonte

Solotek.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

Figura 13 – Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de parte aérea (cm²) para a fonte MAP.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

Figura 14 – Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de raiz (cm²) para a fonte MAP.

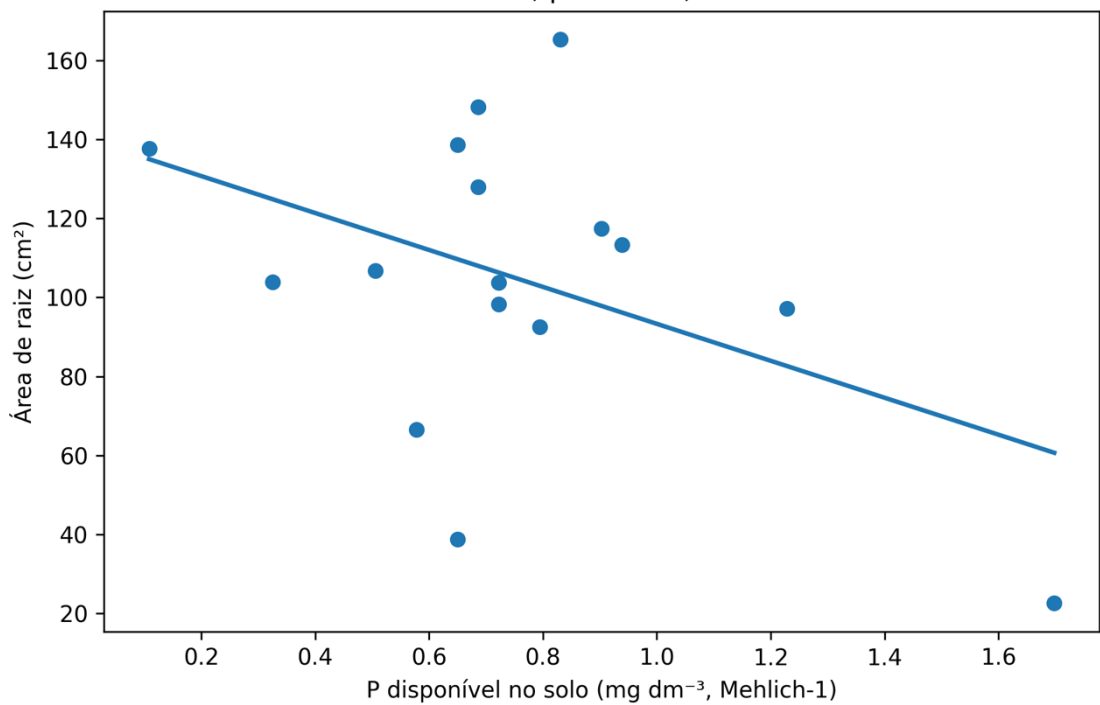
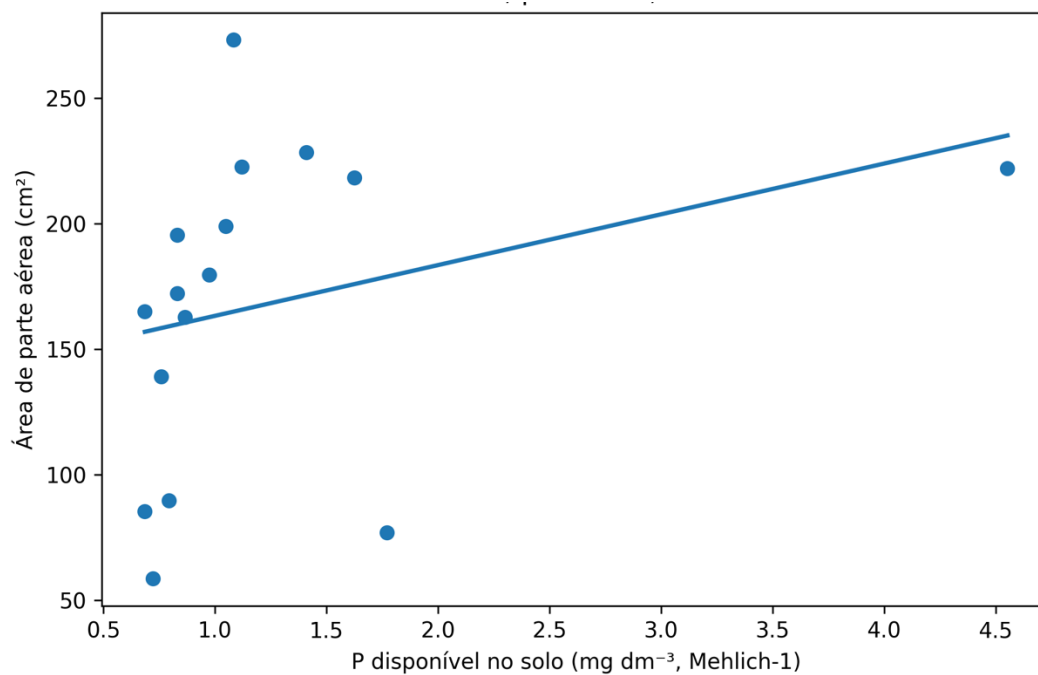
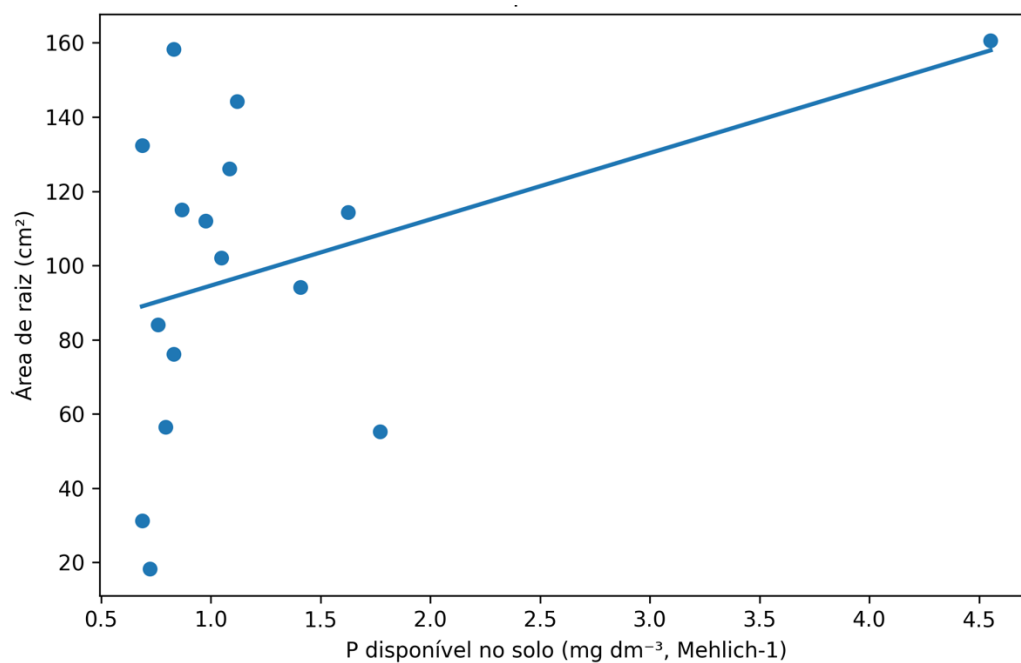


Figura 15 – Relação entre o fósforo disponível no solo e a área de parte aérea (cm²) para a fonte Top-Phos.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

Figura 16 – Relação entre o fósforo disponível no solo (Mehlich-1) e a área de raiz (cm²) para a fonte Top-Phos.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa (2025)

5 CONCLUSÃO

Nas condições deste estudo, a adubação fosfatada promoveu aumento do crescimento inicial do milho em relação ao controle sem fósforo, evidenciando o efeito positivo do nutriente sobre a área de parte aérea e a área de raiz.

O principal fator associado ao incremento do crescimento foi a dose de fósforo, com melhores respostas nas doses mais elevadas, especialmente em 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Para as variáveis morfológicas, não foi observada superioridade estatística consistente entre as fontes, indicando que o aumento da dose teve maior influência que a fonte utilizada isoladamente.

Para o fósforo disponível no solo após o cultivo, as fontes apresentaram comportamentos distintos. A Solotek/P35 mostrou resposta mais regular ao aumento das doses, o Top-Phos apresentou maior incremento do fósforo residual nas doses mais altas, e o MAP apresentou resposta menos definida no intervalo avaliado.

De modo geral, os resultados indicam que o fósforo foi determinante para o crescimento inicial do milho e que as fontes com tecnologia associada apresentaram comportamento residual mais evidente no solo, embora sem diferença estatística consistente sobre o crescimento vegetal em relação à fonte convencional.

REFERÊNCIAS

- AMENKHIENAN, Bright E. *et al.* Understanding extractable metal species relationships with phosphorus sorption and organic carbon in soils. **Soil Research**, v. 62, n. 8, 2024.
- BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 2023.
- COELHO, Antônio Marcos; RESENDE, Álvaro Vilela de. Agronomic efficiency of rock phosphates used alone or associated with soluble source of phosphorus for corn and common bean crops cultivated in succession under no-tillage and irrigated system. **Journal of Agricultural Sciences Research**, v. 3, n. 18, p. 2–19, 2023.
- DA SILVA, Lucas Jónatan Rodrigues *et al.* Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 2024.
- EPSTEIN, Emanuel; BLOOM, Arnold J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. ([SCIRP](#))
- FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.
- JING, Jianyuan *et al.* Humic acid modified by being incorporated into phosphate fertilizer increases its potency in stimulating maize growth and nutrient absorption. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 885156, 2022.
- MARSCHNER, Petra (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. (home.czu.cz)
- MAXWELL, Kate; JOHNSON, Giles N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, 2000. ([OUP Academic](#))
- PELÁ, Adilson *et al.* Enhanced-efficiency phosphorus fertilizer: promising technology for carrot crop. **Horticultura Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 492–497, 2018.
- PIZZATTO, Idianara Fernanda *et al.* Sources and methods of phosphorus application in maize cultivation. **Revista Ciência Agronômica**, v. 56, p. 1–15, 2024. ([Portal de Periódicos](#))
- GUELFY, Douglas R.; REIS JÚNIOR, Roberto dos A.; CHAGAS, Wantuir F. T. Enhanced efficiency phosphorous fertilizers on the coffee crop in sandy soil. **International Journal of Horticulture, Agriculture and Food Science**, v. 5, n. 1, p. 19–26, 2021.

RAMAROSON, Henintsoa V. *et al.* Prediction of phosphorus sorption index and availability by NIR and MIR in soils in Madagascar. **Land**, v. 12, n. 1, p. 196, 2023.

ROSOLEM, Ciro A. *et al.* Humic acid enhances phosphorus transport in soil and uptake by maize. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 3, p. 401–414, 2024.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 2011. ([OUP Academic](#))

STAUFFER, Eduardo *et al.* Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 1, p. 61–68, 2019.

TAIZ, Lincoln *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

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

TIECHER, Tales *et al.* Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v. 435, p. 116495, 2023.