



INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

BACHARELADO EM AGRONOMIA

EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATOS ASSOCIADOS A ADITIVOS EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO ACRIFÉRRICO

LUCAS DA SILVA MOTA

Rio Verde, GO

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE**

AGRONOMIA BACHARELADO

**EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATOS ASSOCIADOS A
ADITIVOS EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO
ACRIFÉRRICO**

LUCAS DA SILVA MOTA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof(o). Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.

Co-orientador: Prof(a) Msc. Simone Hemkemeier Lourini.

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586e Silva Mota, Lucas da., Lucas da Silva Mota
EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS
ASSOCIADOS A ADITIVOS EM UM LATOSSOLO
VERMELHO-AMARELO ACRIFÉRRICO / Lucas da Silva
Mota Silva Mota, Lucas da.. Rio Verde 2025.

37f. il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.
Coorientadora: Prof^ª. Ma. Simoni Hemkemeier Lourini.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
Verde).

1. Fertilizantes fosfatados. 2. Aditivos agrícolas. 3.
Disponibilidade de fósforo. 4. Solos tropicais. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local _____ Data _____

Documento assinado digitalmente



LUCAS DA SILVA MOTA
Data: 01/08/2025 13:52:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos

Ciente e de acordo:

Documento assinado digitalmente



CARLOS RIBEIRO RODRIGUES
Data: 28/07/2025 16:06:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao **primeiro** dias do mês de **julho** de dois mil e vinte e **cinco**, às **14:30** horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: **Prof. Carlos Ribeiro Rodrigues** (orientador), **M.Sc. Eng.a Agrônoma M.Sc. Simone Hemkemeier Lourini** (membro externo) e **M.Sc. José Carlos Bento** (membro interno), para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “**EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATOS ASSOCIADOS A ADITIVOS EM UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO ACRIFÉRRICO**” de **Lucas da Silva Mota**, estudante do curso de **Bacharelado em Agronomia** do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2022102200240526**. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, **01** de **julho** de 2025.

**Carlos Ribeiro
Rodrigues**

Orientador(a)

Simone Hemkemeier Lourini

Membro da Banca Examinadora

José Carlos Bento

Membro da Banca Examinadora

**Pablo da Costa
Gontijo**

Mediador de TC

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REAPRESENTAÇÃO** do TC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até **X X** dias, contados a partir de hoje (**XX/XX/XXX**). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REPROVAÇÃO** do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Documento assinado eletronicamente por:

- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 01/07/2025 15:37:54.
- **Jose Carlos Bento, CHEFE - FG4 - DLEP-RV** , em 01/07/2025 15:38:39.
- **Simone Hemkemeier Lourini, 2021102320140248 - Discente** , em 01/07/2025 15:44:59.
- **Pablo da Costa Gontijo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 28/07/2025 14:55:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/07/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 721808

Código de Autenticação: 3b8b5a19df



Rio Verde, GO
2025

LUCAS DA SILVA MOTA

**EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATOS ASSOCIADOS A
ADITIVOS EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO
ACRIFÉRRICO**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 01 de Julho de 2025, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS RIBEIRO RODRIGUES**
Data: 28/07/2025 16:08:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues

Documento assinado digitalmente
 **SIMONE HEMKEMEIER LOURINI**
Data: 29/07/2025 13:19:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc Simone Hemkemeier Lourini

Documento assinado digitalmente
 **JOSE CARLOS BENTO**
Data: 29/07/2025 12:28:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc José Carlos Bento

Rio Verde, GO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar e proteger, me dar forças e sabedoria para vencer todas as dificuldades durante toda minha vida e especialmente durante o período de graduação.

A minha mãe, Darci, por ser meu alicerce, meu maior incentivo e meu exemplo de força e dedicação. Tudo o que sou devo a seu amor incondicional e aos sacrifícios que fez para que eu pudesse conquistar meus sonhos. Mesmo diante das dificuldades, você sempre encontrou um modo de me proporcionar as melhores condições, e é graças à sua persistência e apoio que hoje me torno engenheiro agrônomo. Esta vitória é tão sua quanto é minha.

A todos meus irmãos, em especial a Dayse que foi minha principal companheira durante esse período da minha vida, sempre me ajudando, incentivando e cuidando de mim desde o início. Dividimos grandes experiências durante o período de graduação e sou imensamente grato por ter vivenciado essa fase com seu apoio e companhia.

Ao meu orientador, Carlos, por todos seus ensinamentos, que me concederam a oportunidade de me desenvolver profissionalmente e pessoalmente. Por me incentivar, aconselhar e ajudar nos momentos que precisei, se hoje sou o profissional e a pessoa que sou devo muito aos momentos em que passei com você. A minha singela gratidão.

A minha co-orientadora, Simone, que participou junto comigo de todas as fases desse projeto que veio a resultar neste TCC. Obrigado por ter me ajudado em todos os momentos que precisei. Minha imensa gratidão.

A todos os integrantes do Laboratório de Química Agrícola e do Life Soil, especialmente meus amigos Bruna, José Wellington e João Ricardo pelo companheirismo, conselhos e ajudas. Sem a amizade de vocês a minha jornada acadêmica não teria sido tão especial e feliz. Guardarei sempre as boas memórias que passei na companhia de vocês.

Ao José Carlos, obrigado por participar da minha banca e por todos os ensinamentos que pode me passar no período em que estive desenvolvendo o projeto. Foi uma honra ter sua presença nesse ciclo da minha vida.

Por fim, sou imensamente grato ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, e a todo o corpo docente por proporcionarem a realização desse sonho. O profissional que me torno hoje tem a contribuição de cada um dos docentes aos quais tive o prazer de ser aluno.

MOTA, Lucas da Silva. **Eficiência de Fertilizantes Fosfatados Associados a Aditivos em um Latossolo Vermelho-Amarelo Acriférrico**. 2025. (número de páginas) Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Agronomia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025.

RESUMO

A disponibilidade de fósforo (P) nos solos tropicais é um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola, devido à elevada capacidade desses solos de adsorver e imobilizar o nutriente em formas pouco disponíveis para as plantas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados associados a aditivos na dinâmica das frações de fósforo em um Latossolo Vermelho-Amarelo Acriférrico (LVAwf). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com duração de 360 dias, utilizando duas fontes de fósforo (monoamônio fosfato – MAP e superfosfato triplo – ST) e dois aditivos (KimcoatBioHP® e IFCoat), além de um tratamento controle. Foram analisadas diferentes frações de fósforo no solo (Pi-solução, Pi-lábil, Pi-não lábil, Pi-ocluso, Po-microbiano, Po-lábil, entre outras), com coletas aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento. Os resultados mostraram que o MAP, especialmente quando combinado ao aditivo IFCoat, apresentou melhor desempenho na manutenção do fósforo em formas lábeis e disponíveis, reduzindo as perdas por precipitação com ferro (Fe) e alumínio (Al) nos primeiros 90 dias de incubação. No entanto, após esse período, a eficiência dos aditivos diminuiu progressivamente, com tendência de estabilização das frações menos disponíveis. Além disso, os aditivos influenciaram a dinâmica microbiana, aumentando o fósforo na biomassa microbiana (Po-mic) e nas frações orgânicas lábeis. O ST, por sua vez, mostrou menor resposta ao uso de aditivos, com maior tendência de formar frações de fósforo mais estáveis e menos disponíveis. Os resultados evidenciam a importância do manejo correto das fontes fosfatadas e dos aditivos para maximizar a eficiência da adubação, principalmente em solos altamente intemperizados como o LVAwf.

Palavras-chave: fertilizantes fosfatados, aditivos agrícolas, disponibilidade de fósforo.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO NA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	3
2.2 P NO SOLO.....	3
2.3 EFICIÊNCIA DO USO DE FERTILIZANTES.....	4
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
5 CONCLUSÕES.....	30
REFÊRENCIAS.....	

1 INTRODUÇÃO

Apesar de o fósforo ser o décimo segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre, é o segundo elemento que mais limita a produtividade nos solos tropicais (Rheinheimer, 2000). A elevada capacidade desses solos de reter esse nutriente em seus coloides reduz a absorção de fósforo (P) pelas plantas. Como consequência, ocorre uma diminuição na eficácia dos fertilizantes fosfatados utilizados na adubação.

Esse fenômeno eleva os custos de produção em regiões de solos tropicais, pois além da necessidade de aplicar as quantidades de fertilizante exigidas pelas culturas, é preciso compensar a porção que será retida pelo solo. O fósforo é um elemento fundamental para a vida na Terra, fazendo parte de compostos e estruturas essenciais dos diferentes seres, incluindo as plantas. É um recurso geograficamente restrito, insubstituível, não renovável e, portanto, finito (Elser e Bennet, 2011; Chowdhury et al., 2017). Com o intemperismo, os solos passam gradualmente de fonte para dreno de P. Em condições extremas de intemperismo, como acontece em alguns Latossolos de cerrado, o solo é um forte dreno de P. Para torná-lo fonte, são necessárias grandes quantidades de fertilizante fosfatado (Novais & Smyth, 1999).

Ao aplicar fertilizantes fosfatados as taxas de recuperação de P pelas plantas são baixas devido aos mecanismos de adsorção específicos de fosfato (Guedes et al., 2016). Dentre as reações do P no solo, destacam-se as de sorção, dessorção, solubilização e complexação e dentre os atributos do solo que interferem nestas reações, tem-se o físico-químico e propriedades mineralógicas do solo, além de fatores ambientais (Sparks, 2003; Santos et al., 2008) Portanto, o manejo eficiente do P em sistemas agrícolas é fundamental para alcançar grande produtividade sem ameaçar a qualidade ambiental (Macdonald et al., 2011; Mihailescu et al., 2015).

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas nos últimos anos, principalmente visando aproveitamento máximo da rocha fosfática e inovações em fertilizantes (Shen et al., 2019). Dentre elas o nano-P com grande área de contato com o solo e aumentada a mobilidade do P (Montalvo et al., 2015), fertilizantes fosfatados de liberação controlada que reduzem perdas por escoamento (Li et al., 2016; Everaert et al., 2017; Giroto et al., 2017), uso de fertilizantes orgânicos, além de revestimento por quelatos e polímeros (sintéticos ou naturais) que reduzem a velocidade de dissolução dos grânulos de fertilizantes, diminuindo a imobilização nos solos e aumentando a disponibilidade de P,

sendo uma tendência promissora (Chagas et al., 2015; Teixeira et al., 2016; Da Cruz et al., 2017; McLaren et al., 2017; Guelfi et al., 2018; Sarkar et al., 2018; Shen et al., 2019).

A aplicação de polímeros representa uma estratégia que otimiza o uso do fósforo fornecido pelos fertilizantes. Essa tecnologia pode aumentar a eficiência de absorção do nutriente pelas plantas, minimizando sua fixação em formas indisponíveis no solo e reduzindo os impactos ambientais. No entanto, é essencial um estudo detalhado dessa técnica, já que a dinâmica do fosfato no solo é influenciada por diversos fatores, incluindo tanto as propriedades do solo quanto as características do fertilizante utilizado.

Portanto, o referente trabalho, teve como objetivo avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados aplicados em conjunto com polímeros em um Latossolo Vermelho-Amarelo acriférico (LVAwf) incubado durante o período de um ano, exposto a condição de umidade e ausência de água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do Fósforo e uso de fertilizantes fosfatados

O fósforo (P) é a base de toda a vida em nosso planeta. Presente ao nível molecular, nas estruturas polinucleotídicas do DNA e do RNA, na adenosina trifosfato (ATP), o principal transportador de energia química nas células e nos fosfolipídios das membranas celulares (Lehninger, 1973). Assim, o fósforo é bem conhecido por ser um dos nutrientes mais importantes para toda a vida, e tem muitas funções fisiológicas essenciais nas plantas (Daly et al., 2015; Rittmann et al., 2011; Tan; Lagerkvist, 2011). No entanto, a principal fonte de P para uso na agricultura, as rochas fosfáticas (Vogel et al., 2020), não são renováveis, e este recurso está em declínio (Achary et al., 2017) podendo a demanda ultrapassar a oferta em poucas décadas. A crescente escassez de fósforo juntamente com sua distribuição geográfica é uma preocupação crescente nas economias agrárias (Cordell; Neset, 2014), com apenas seis países possuindo 86% das reservas restantes do mundo: Marrocos, China, Egito, Argélia, Síria e Brasil (Jasinski, 2021) o consumo rápido e crescente de P na agricultura moderna tem levantado preocupações sobre a segurança do abastecimento (Elser; Bennett, 2011; Neset; Cordell, 2012; Scholz; Wellmer, 2013).

2.2 P no solo

A dinâmica do fósforo no solo é controlada, principalmente, pela constituição do composto da fase sólida a que ele está ligado, fósforo orgânico (P-o) e fósforo inorgânico (P-i), como as propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo, sendo influenciada também por fatores ambientais como umidade e temperatura (Pierzynski et al., 2005; Santos et al., 2008). A fase líquida ou solução do solo é a fração em que se encontra o P disponível para as plantas. Portanto, a disponibilização do P depende da interação dos dois compartimentos: solução do solo, que constitui o fator intensidade (I) e fase sólida, denominada fator quantidade (Q), que armazena os fosfatos que abastecem a solução, dos quais podem ser lábeis, não lábeis, ou moderadamente lábeis. A dinâmica de comportamento que explica como o primeiro compartimento é abastecido pelo segundo é chamado fator capacidade (C), e representa o poder tampão ou a taxa de

recomposição, controlada pela energia de ligação do nutriente ou pelo grau de labilidade (Rheinheimer et al., 2008).

O P aplicado via fertilizantes fosfatados pode reagir com os sítios de ligação no solo, e essa reação é denominada como I-adsorção específica, ocorrendo devido à ligação entre o P e os minerais argilosos (Tiecher et al., 2012), ou II-precipitação, através de ligação com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) ou com o cálcio (Ca), este último ocorrendo principalmente em solos alcalinos (Sample et al., 1980; Novais et al., 2007). Assim, após a solubilização dos fertilizantes, a reação do $H_2PO_4^-$ com outros íons, dependerá da concentração e atividade destes, assim como do pH, levando a precipitação do P com Fe e Al em pH ácido e precipitação com Ca em pH alcalino (Novais; Smyth, 1999; Penn; Camberato, 2019), ou pode se transformar em Pi-Lábil em dias ou em poucas horas (Novais e Smyth, 1999).

Solos que sofreram grande intemperismo, são ricos em oxihidróxidos de Fe na fração argila, possuindo elevada capacidade de adsorção de P, principalmente, aqueles com baixo teor de matéria orgânica, em que o ponto de carga zero está entre 9 a 10, levando a predominância de cargas positivas variáveis, podendo formar ligações fortes com o ânion fosfato, envolvendo compartilhamento de oxigênio (Costa; Bigham, 2009). Caso típico das regiões tropicais, como o Brasil, que apresentam solos altamente intemperizados, propensos a eletropositividade e menor densidade de carga negativa (CTC), aumentando a adsorção de P na forma de ânions, reduzindo a quantidade na solução do solo e disponibilidade para as plantas (Novais; Smyth, 1999; Fink et al., 2014; Baldotto; Velloso 2014).

2.3 Eficiência no uso de fertilizantes

A eficiência do P aplicado ao solo é baixa, sendo que, mais de 70% fica retido no solo, formando uma reserva de P, o qual é chamado de “P Legacy” (Pavinato et al., 2020), ou P residual resultante daquilo que foi aplicado via fertilizantes, porém, não foi absorvido pelas plantas.

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas nos últimos anos, principalmente em aproveitamento máximo da rocha fosfática e inovações em fertilizantes (Shen et al., 2019). Dentre elas o nano-P com grande área de contato com o solo e aumentada a mobilidade do P (Montalvo et al., 2015), fertilizantes fosfatados de liberação controlada que reduzem perdas por escoamento (Li et al., 2016; Everaert et al., 2017; Giroto et al.,

2017), uso de fertilizantes orgânicos, além de revestimento por quelatos e polímeros (sintéticos ou naturais) que reduzem a velocidade de dissolução dos grânulos de fertilizantes, diminuindo a imobilização nos solos e aumentando a disponibilidade de P (Ali; Al-Juthery, 2017; Chagas et al., 2015; Teixeira et al., 2016; Da Cruz et al., 2017; McLaren et al., 2017; Guelfi et al., 2018; Sarkar et al., 2018; Ashraf et al., 2019; Shen et al., 2019;). Além disso, o uso de inoculantes contendo microrganismos solubilizadores de fosfato que podem ser usados como aditivos de fertilizantes químicos sintéticos, são de baixo custo e sem riscos ambientais (Kalayu, 2019; Oliveira et al., 2020). Estes possuem mecanismos de ação diversos, como solubilização de P, produção de fito-hormônios, enzimas e sideróforos, além da bioproteção contra patógenos (Gupta et al., 2015; Ribeiro et al., 2018; Sousa et al., 2020; Velloso et al., 2020). O uso de aditivos inoculantes, como o BiomaPHOS®, desenvolvidos pela EMBRAPA Milho e Sorgo, através de parceria com empresa privada, traz resultados promissores, contendo duas cepas de bactérias do gênero *Bacillus* (*B. subtilis* CNPMS B2084 e *B. megaterium* CNPMS B119) que podem aumentar a eficiência da adubação fosfatada, além de promover a solubilização de P-orgânico e P-inorgânico presentes no solo (Oliveira et al., 2020; Gomes et al., 2014; Abreu et al., 2017; Velloso et al., 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do IF Goiano Campus Rio Verde, pelo período de 1 ano. No experimento foram testadas duas fontes de fósforo (monoamônio fosfato - MAP e Superfosfato Triplo – ST) em conjunto com dois aditivos (Kimcoat BIOHP®) e (IF Coat). O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Amarelo Acriférico (LVAwf), com amostras coletadas em profundidade correspondente ao horizonte diagnóstico Bw2 (Tabela 1).

Foram retiradas subamostras para a caracterização química pH-H₂O, pH-KCl, pH-CaCl₂, P (Mehlich I), P-remanescente (P-rem), K trocável (Mehlich I), Ca, Mg Al trocáveis (KCl), H+Al (Acetato de Cálcio) e matéria orgânica (MO) (SILVA, 2009), Com base nos resultados foram estimados os valores de ΔpH, CTC potencial (T), saturação de bases (V) e alumínio (m) (Tabela 2).

A correção do solo foi feita com Hidróxido de cálcio p.a, (PM 74,09 g mol⁻¹) incorporando o corretivo a todo o volume do solo do vaso, e sendo mantida a umidade através do peso dos vasos correspondente a 60% dos espaços porosos ocupados com água por 30 dias. A estimativa da necessidade de calagem foi realizada para aumentar a saturação de cálcio na CTC potencial a 55,21%. Após o período de incubação do solo com o corretivo, foi coletada subamostras de cada vaso para a estimativa da capacidade máxima de adsorção de fósforo em cada solo utilizando o ajuste da Isoterma de Langmuir (Novais; Smyth; Nunes, 2007).

O delineamento foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 3 +1, composto por duas fontes de fósforo (monoamônio fosfato – MAP 51% de P₂O₅ ou 22,3% de P e 11% de N-NH⁴⁺ e o superfosfato triplo – ST 46% de P₂O₅ ou 20,1% de P e 10% de Ca), e três tratamentos de aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP® e IFCoat) mais um tratamento controle, sem incubação de fonte de fósforo, com quatro repetições. As parcelas, unidades experimentais, foram compostas por 1.5 Kg de solo mais o tratamento, acondicionados em vasos de polietileno e mantidas com temperatura controlada a 30 °C. As amostras de solos permaneceram incubadas por 360 dias sendo os primeiros 180 dias (com a manutenção da umidade diariamente) e os (180 dias seguintes fazendo a reposição da umidade a cada 30 dias). Esse manejo da umidade foi adotado para simular um ciclo de umedecimento e secagem, o que equivale a um ano agrícola.

TABELA 1 Caracterização Granulométrica e Mineralógica dos Horizontes Superficiais do Latossolo Vermelho-Amarelo Acriférrico (LVAwf)

Características		
Solo	-	LVAw
Cidade/Estado	-	Patrocínio/MG
Coordenadas	-	18°53'5,6''S 46°49'40''W
Horizonte	-	BW2
Profundidade	(m)	0,80 a 1,25
Areia	(g kg ⁻¹)	160
Silte	(g kg ⁻¹)	160
Argila	(g kg ⁻¹)	680
SiO ²	(g kg ⁻¹)	8,1
Al ² O ³	(g kg ⁻¹)	36,8
Fe ² O ³	(g kg ⁻¹)	6,3
Ki ²	-	0,37
Ki ²	-	0,34
Mineralogia da fração Argila ₄	-	Ct, Gb, Gt, Qz e An***

1Horizonte;1;2; 4Difratometria de Raio X; ²Ct = Caulinita; Gb = Gibbsita; Hm = Hematita; Gt = Goethita; Ve = Vermiculita; Qz = Quartzo; An = Anatásio; 5(ROLIM NETO, 2002) e 6(EMBRAPA SOLOS, 2004),

As amostras dos solos incubados foram coletadas aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após instalação do experimento para realização das análises de fracionamento químico do fósforo no solo conforme metodologia proposta por Hedley (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) e adaptações para solos tropicais (Gatiboni et al., 2013). Foi utilizado 10 g de solo seco para a extração sequencial de P, na proporção 1:3 de solo:solução extratora.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (Scott Knott 5% de prob.). Quando ajustados modelos matemáticos para as respostas dos tratamentos, foi realizado a análise de identidade dos modelos para cada variável. As análises estatísticas foram realizadas no R (R CORE TEAM, 2021) utilizando os pacotes ExpDes.pt (Ferreira et al., 2021) e FactoMineR (Lê et al., 2008).

TABELA 2 Caracterização química das subamostras dos solos Latossolo Vermelho Amarelo Ácrico típico (LVAw)

Características	Unidade	
pH H₂O	-	5,23
pH CaCl₂	-	4,61
pH KCl	-	4,54
ΔpH	-	-0,7
P – M1	mg dm ⁻³	6,57
P-rem	mg dm ⁻³	28,73
Pi¹-solução	mg dm ⁻³	2,33
Pi-Lábil	mg dm ⁻³	95,85
Po-Lábil	mg dm ⁻³	68,48
Po-microbiano	mg dm ⁻³	8,83
Pi-Não Lábil	mg dm ⁻³	29,87
Po-Não Lábil	mg dm ⁻³	207,3
Pi-Fe+Al	mg dm ⁻³	194,08
Po-Recalcitrante	mg dm ⁻³	266,48
Pi-Ca	mg dm ⁻³	0,6
K	mg dm ⁻³	40
Ca	cmol _c dm ⁻³	2,52
Mg	cmol _c dm ⁻³	1,93
Al	cmol _c dm ⁻³	0,13
H+Al	cmol _c dm ⁻³	2,52
Soma de Bases (SB)	cmol _c dm ⁻³	4,55
CTC pH 7,0 (T)	cmol _c dm ⁻³	7,07
Saturação de Bases (V)	%	64,4
Saturação de alumínio (m)	%	2,8
Matéria Orgânica do Solo (M.O.)	g dm ⁻³	48,7

¹ Pi – Fósforo na fração inorgânica; Po – fósforo na fração orgânica do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação de fertilizantes fosfatados inicia imediatamente processos de dissolução e liberação de ânions fosfato (PO_4^{3-}) na solução do solo (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Neste processo, observam-se diferenças marcantes entre as fontes, mesmo apresentando alta dissolução. Enquanto o monoamônio fosfato (MAP) apresenta dissolução completa, liberando simultaneamente íons fosfato e amônio (NH_4^+), o superfosfato triplo (ST) mostra dissolução parcial, liberando íons fosfato e formação de fosfato bicálcico (CaHPO_4) (Lindsay, 1979; Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959a, 1959b, 1959c).

Aos 30 dias após incubação (DAI) em um Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf), ambas as fontes mostraram padrões similares de disponibilidade de fósforo inorgânico em solução (Pi-solução) quando aplicadas sem aditivos (Figura 1A). Entretanto, a adição de aditivos nos fertilizantes modificou significativamente este padrão. O tratamento MAP com o aditivo KimcoatBioHP® resultou em aumento nos teores de Pi-solução comparado ao MAP com o aditivo IFCoat (Figura 1A). Embora o incremento proporcionado pelo KimcoatBioHP® não tenha sido estatisticamente diferente do MAP não tratado, foi suficiente para diferenciar do tratamento controle sem adubação fosfatada (Figura 1A). Destaca-se que o KimcoatBioHP® apresentou maior eficácia quando combinado ao MAP, com valores de Pi-solução superiores aos obtidos com ST (Figura 1A). Notavelmente, os aditivos não exerceram efeito significativo sobre a disponibilidade de P quando aplicados com ST (Figura 1A), possivelmente devido à estabilidade dos complexos de fosfato bicálcico formados. Estes resultados demonstram que a eficácia dos aditivos está intimamente relacionada à matriz química do fertilizante, sendo mais pronunciada em fontes de dissolução completa como o MAP.

Logo após a liberação de fósforo na solução do solo, caso não seja absorvido diretamente pelas plantas, é rapidamente adsorvido, se tornando parte da fração lábil em um processo que pode ocorrer em horas ou dias (Novais & Smyth, 1999). Inicialmente, a adsorção ocorre de forma rápida por interações eletrostáticas entre os grupos OH^- e OH_2^+ presentes na superfície dos coloides, formando um complexo de esfera externa, conhecido como troca de ligantes (Parfitt, 1978; Hingston et al., 1972).

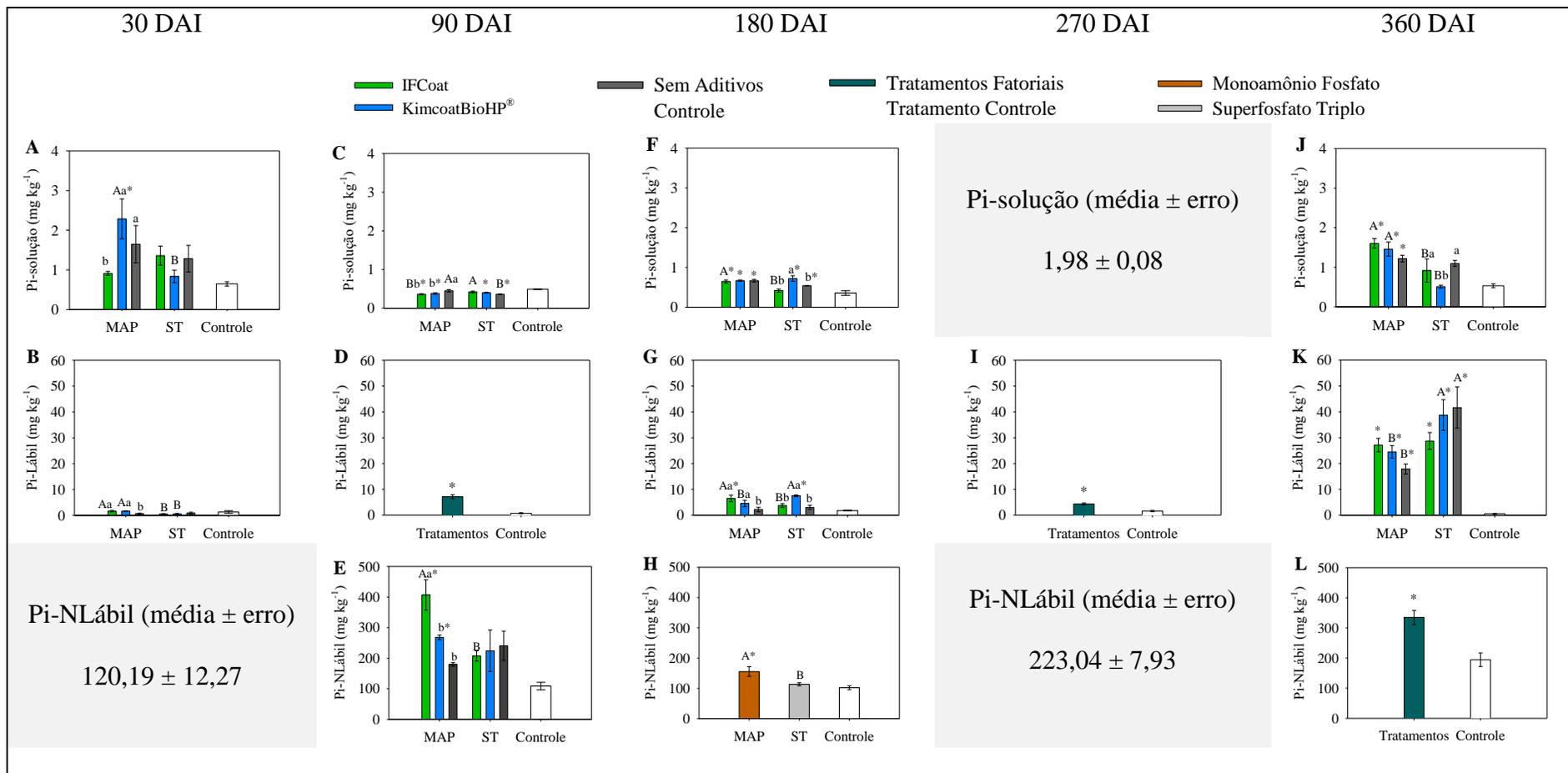


Figura 1. Frações de fósforo em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARAELO ACRIFÉRRICO (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em mg kg⁻¹.

Essa fração é prontamente disponível para a absorção vegetal e representa parte do fator quantidade (Q), com potencial para retornar à solução do solo, que representa o fator intensidade (I) de P (Rheinheimer et al., 2008).

Aos 30 DAI, se observou que a aplicação do MAP com os aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat aumentou os teores de Pi-lábil em comparação ao MAP sem aditivos (Figura 1B). No entanto, essas alterações não foram suficientes para diferenciar significativamente os tratamentos de aditivos com MAP do tratamento controle, sem adubação fosfatada (Figura 1B). Além disso, os aditivos aplicados com o MAP apresentaram maiores valores de Pi-Lábil do que quando aplicados com o ST (Figura 1B). Com o ST não houve alteração do Pi-Lábil quando tratado com os aditivos (Figura 1 B). O aumento do P inorgânico lábil quando aplicado o MAP com os aditivos KimcoatBioHP e IFCoat pode ser explicado pela redução das perdas por precipitação com Fe e Al (Figura 2 B). Dessa forma, os aditivos contribuíram para manter o ânion fosfato em solução por mais tempo, favorecendo sua interação com a superfície dos coloides, mantendo maior proporção na fração trocável do solo.

Com o passar do tempo, a interação entre a molécula de fosfato e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al pode evoluir formando um complexo de esfera interna, inicialmente monodentado ou mononuclear (Pi-NLábil), em que os íons fosfatos em solução deslocam os grupamentos OH⁻ e OH₂⁺ da superfície dos coloides, liberando H₂O e estabelecendo uma ligação predominantemente covalente e de alta energia entre o fosfato e os coloides (Fixen e Groven, 1990; Hingston, et al., 1972). Esse fenômeno, denominado quimiossorção ou adsorção específica do fosfato, pode levar anos para atingir o equilíbrio (Barrow, 1985), porém é de difícil reversão.

Apesar desse mecanismo ser bem estabelecido, os resultados aos 30 DAI indicaram que o teor Pi-NLábil não foi alterado (Tabela 3). Provavelmente, o tempo de contato entre o fertilizante e o solo foi insuficiente para que reações de desidratação e formação de complexos de esfera interna ocorressem em escala significativa.

Logo em seguida, a adsorção específica do fosfato aos coloides pode evoluir para complexo de esfera interna binucleada (Pi-ocluso), aprisionado na estrutura cristalina de óxidos de Fe e Al, como aluminofosfatos (AlPO₄) e silicofosfatos (Weil e Brady, 2017; Souza Júnior et al., 2012; Rheinheimer, et al., 2008; Novais e Smyth, 1999; Fixen e Groven, 1990).

Aos 30 DAI, não houve efeito dos aditivos sobre os teores de Pi-ocluído (Tabela 3). No entanto, a aplicação do ST resultou nos maiores valores em comparação ao MAP (Figura 2A). O ST fornece P principalmente na forma de fosfato monocálcico, solúvel em água (Silva, et al., 2005), o qual pode reagir com óxidos e hidróxidos de Fe e Al em solos ácidos, favorecendo a oclusão de fósforo ao longo do tempo. Adicionalmente, parte do fósforo fornecido pelo ST pode sofrer transformações secundárias no solo, especialmente em ambientes com disponibilidade de Ca^{2+} , proveniente da calagem ou da dissolução de minerais. Nessa condição, o fosfato monocálcico pode reagir com o cálcio, formando fosfato bicálcico (Lindsay, 1979; Lindsay, Lehr & Stephenson, 1959; Lindsay & Stephenson, 1959a, 1959b, 1959c), uma forma menos solúvel em água e solúvel em citrato de amônio (Malavolta, 1981; Reetz, 2017).

Embora a digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ utilizada no fracionamento de P do solo, seja projetada para solubilizar preferencialmente o P ocluído em óxidos de Fe e Al (Silva, et al., 2020; Viana, et al., 2016), esse método também pode extrair parte do fosfato bicálcico, especialmente após a calagem. Isso pode resultar em superestimação do Pi-ocluído, já que o aumento da concentração de Ca^{2+} pode favorecer a precipitação de fosfato bicálcico, confundindo sua extração com a de formas realmente ocluídas.

Além de ser adsorvido aos colóides minerais, o fósforo (P) que não é absorvido pelas raízes das plantas ou imobilizado por microrganismos pode se perder por precipitação com Fe, Al ou Ca, dependendo do pH do solo (Parfitt, 1978; Fixen e Ludwick, 1982; Sample et al., 1980; Novais et al., 2007). Em solos altamente intemperizados, como o LVAwf, devido à alta acidez e baixa saturação por bases, a precipitação do P com Ca é menor que a com Fe e Al.

No presente estudo, o LVAwf apresentou pH ácido ($\text{pH H}_2\text{O} = 5,23$ e $\text{pH CaCl}_2 = 4,60$), condição que favorece a reação de P com Fe^{3+} e Al^{3+} , formando compostos de baixa solubilidade, como strengita e variscita (Raij, 1991). No entanto, com a aplicação de hidróxido de cálcio, que é altamente reativo e capaz de elevar rapidamente o pH do solo, tende a redução da disponibilidade de Fe^{3+} e Al^{3+} livres em solução.

Os resultados aos 30 DAI apontam que a aplicação do MAP com o aditivo IFCoat reduziu substancialmente a precipitação de fósforo com Fe e Al, mais eficientemente do que a aplicação de MAP com o aditivo KimcoatBioHP® (Figura 2B). Além disso, a aplicação de MAP com IFCoat apresentou valores menores de Pi-Fe+Al em comparação a combinação de ST com o mesmo aditivo (Figura 2B). Não foram

observadas diferenças significativas entre os aditivos quando aplicados com ST (Figura 2B).

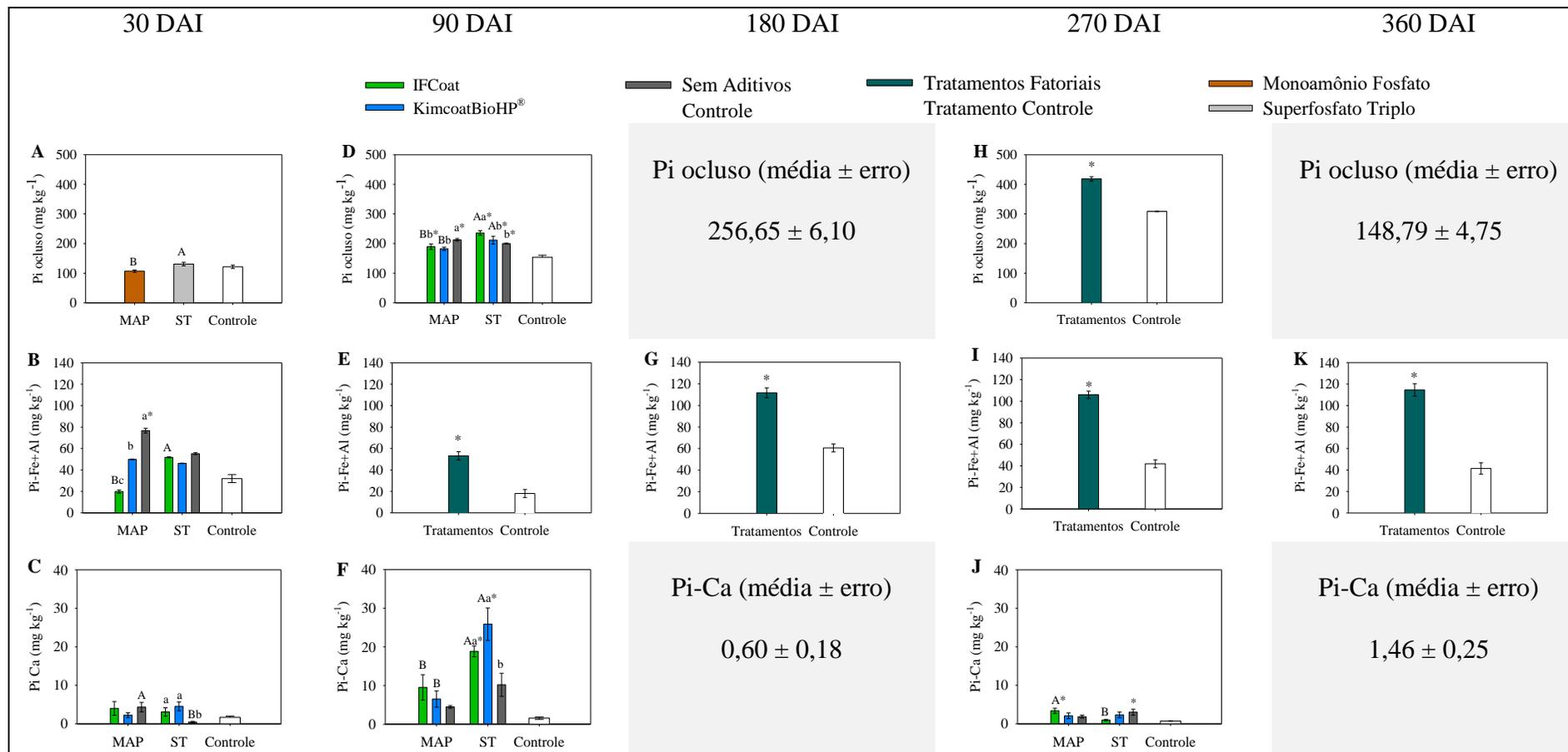


Figura 2. Frações de fósforo em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARAELO ACRIFÉRRICO (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluso (Pi-occluso), fósforo inorgânico precipitado com Fe³⁺ e Al³⁺ livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com Ca²⁺ (Pi-Ca), em mg kg⁻¹.

Esses resultados indicam que a calagem não foi o principal fator responsável pela redução da precipitação de P com Fe e Al na fonte MAP, mas sim a ação dos aditivos, em especial o IFCoat, possivelmente por reduzir o Pi em solução (Figura 1A). Isso se justifica pelo fato de que as reações de precipitação ocorrem quando a concentração de P em solução excede o produto de solubilidade do mineral específico (Havlin et al., 2017).

Conforme já discutido, o fósforo pode precipitar com o Fe, Al e Ca livres em solução (Nascimento et al., 2018). Aos 30 DAI, houve efeito dos aditivos sobre o P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca) apenas nos tratamentos com o fertilizante ST, sendo que as maiores perdas ocorreram quando o ST foi tratado com os aditivos KimcoatBioHP® ou IFCoat (Figura 2C).

No caso do MAP, por não conter Ca em sua formulação, é provável que o P aplicado tenha reagido com o Ca^{2+} proveniente da calagem, favorecendo a formação de Pi-Ca (Figura 2C). Por outro lado, no ST, cuja principal forma de P é o fosfato monocalcico, a ausência de aditivos pode ter permitido, com o tempo, a formação de compostos menos solúveis, como fosfato bicalcico ou hidroxiapatita. Esses compostos são extraídos pela digestão sulfúrica no fracionamento de Hedley (Hedley et al., 1982) e quantificados na fração de fósforo inorgânico ocluso (Figura 2A) (Gatiboni et al., 2013).

Esses resultados sugerem que os aditivos desempenham um papel fundamental nas interações entre o fósforo e os cátions do solo, influenciando a distribuição do P entre as diferentes frações e podendo reduzir a formação de frações menos solúveis. Considerando que, através da acidificação futura do solo, pode ocorrer a reversibilidade da reação de Pi-Ca (Havlin et al., 2005).

Após a liberação do P na solução, além do direcionamento para outras frações inorgânicas, pode ocorrer a imobilização do fósforo por microrganismos nas frações orgânicas (Novais et al., 2007; Pavinato, 2007). A dinâmica do fósforo orgânico é regulada, principalmente, pela relação C/P, através dos processos antagônicos de mineralização e imobilização. Esses processos são influenciados pela quantidade de fósforo presente na matéria orgânica, sendo que o ponto de equilíbrio ocorre quando os resíduos vegetais contêm 0,2% de P. Acima desse valor, ocorre a mineralização com liberação de P em solução, enquanto abaixo, prevalece a imobilização na biomassa microbiana, até que a relação C/P seja reduzida pela decomposição (Novais e Smyth, 1999).

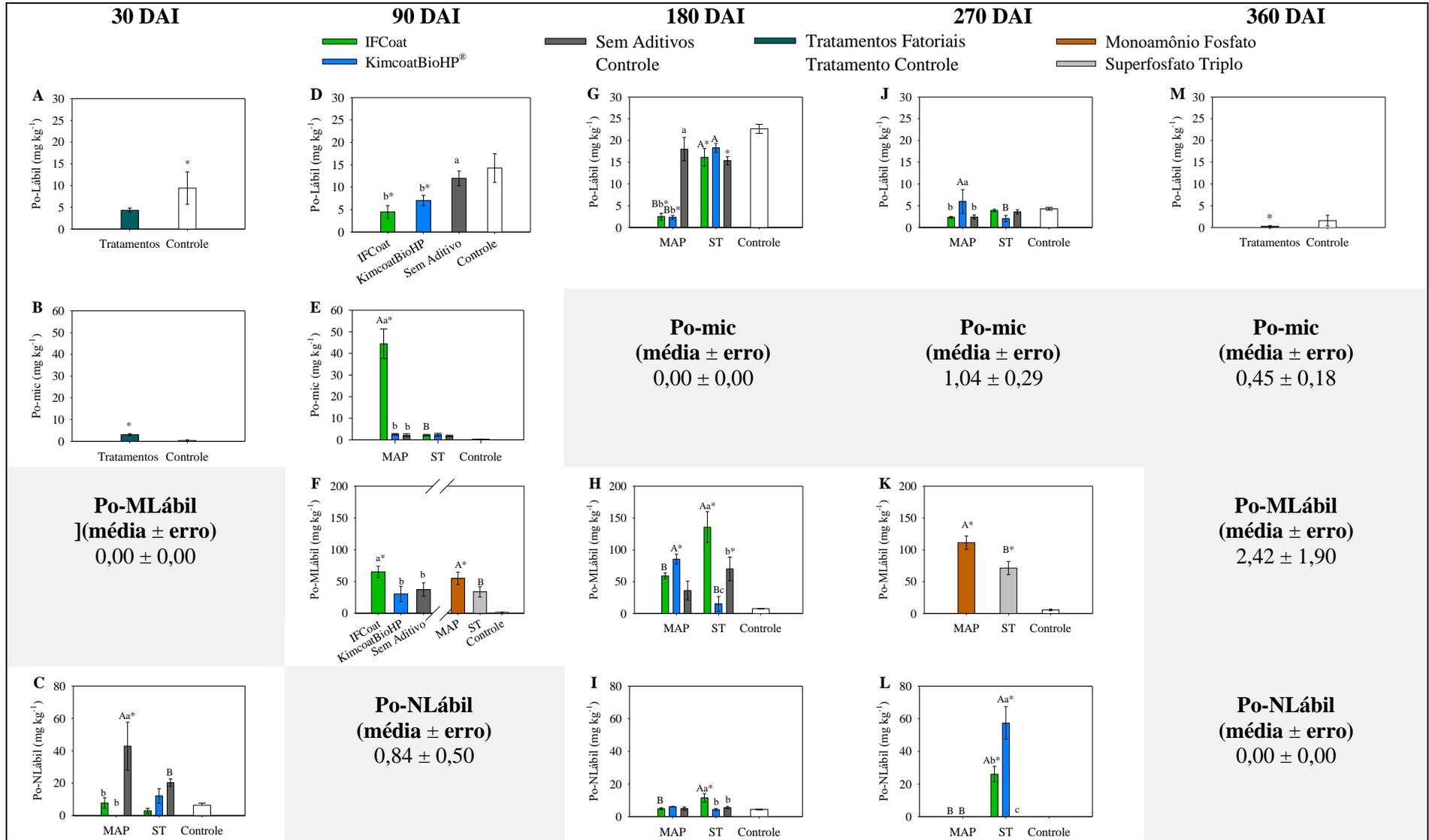


Figura 3. Frações de fósforo em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO ACRI-FÉRRICO (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em mg kg^{-1} .

No LVAwf utilizado neste estudo, aos 30 dias após a incubação, observou-se aumento da imobilização microbiana de P, como evidenciado pelo incremento da fração de fósforo orgânico microbiano (Po-mic), independentemente da fonte fosfatada ou aditivo utilizado, em comparação ao controle sem adubação fosfatada (Figura 3B). Isso indica que a simples adição de P ao solo foi suficiente para estimular a atividade microbiana.

Paralelamente, o tratamento controle apresentou o maior valor de Po-Lábil em relação aos tratamentos com fertilizantes e aditivos (Figura 3 A). A aplicação dos fertilizantes ST e MAP, que também fornecem Ca e/ou N, parece ter intensificado a transformação da matéria orgânica pela microbiota, resultando na redução de Po-Lábil (Figura 3A) e no aumento do Po-mic (Figura 3B), devido à maior imobilização do P microbiano.

Aos 30 DAI, o Po-MLábil apresentou valor igual a zero, indicando pouca contribuição dessa fração ou possível degradação dela pela microbiota. No entanto, a fração mais recalcitrante, o Po-NLábil, sofreu alteração pelos tratamentos aplicados (Figura 3C).

A principal alteração observada foi o alto valor de Po-NLábil com a aplicação do MAP sem aditivos (Figura 3C). Isso sugere que o uso dos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, quando associados ao MAP, reduziram as perdas de P por imobilização na fração orgânica não lábil aos 30 dias (Figura 3C). E contraste, quando utilizado o ST, a aplicação dos diferentes aditivos não promoveu alterações significativas na fração Po-Nlábil (Figura 2C). Entretanto, ao comparar as fontes sem aditivos, o ST apresentou menor perda através da fração orgânica não lábil do que MAP (Figura 2C), reforçando a ação benéfica da aplicação de aditivos junto ao MAP.

Aos 90 DAI no LVAwf, houve a redução de Pi-solução, principalmente para a combinação do MAP com os aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat (Figura 1C). Esse comportamento contrasta com os resultados obtidos aos 30 DAI (Figura 1A) e indica que, com o tempo, o contato do ânion fosfato com a superfície dos colóides do solo favoreceu o processo de adsorção por complexo de esfera externa, um processo reversível, que mantém o P adsorvido nos colóides, mas em equilíbrio com o Pi em solução.

Esse fenômeno, refletiu no aumento dos valores médios de Pi-Lábil, cuja média passou de 1,03 mg kg⁻¹ aos 30 DAI para 6,24 mg kg⁻¹ aos 90 DAI (Tabela 3). Além disso, o maior tempo de incubação favoreceu a evolução da adsorção não específica

para uma adsorção específica por complexos de esfera interna, por meio de processos de desidratação e reorganização molecular. Como resultado, houve o aumento da fração Pi-Nlábil, de 120,20 para 233,67 mg kg⁻¹, entre os 30 e 90 dias de incubação (Tabela 3).

Aos 90 dias DAI, a aplicação de fertilizantes promoveu aumento significativo nos teores de Pi-lábil, independentemente da fonte ou do aditivo utilizado, resultando em médias superiores à observada no solo sem adubação fosfatada (Figura 1D). A comparação com o controle mostra que a prática agrícola do uso de fertilizantes fosfatados influencia no aumento do P em solução, diretamente disponível às plantas, ainda que essa forma de fósforo possa ser convertida em formas não disponíveis de forma rápida principalmente em solos tropicais altamente intemperizados (Novais; Smyth, 1999), que é o caso do LVAwf do estudo.

Esse comportamento foi verificado no experimento, pois a fração de Pi-NLábil não lábil alterou com a aplicação fertilizantes e aditivos aos 90 DAI (Figura 1E), sendo que a combinação de MAP com IFCoat resultou nos maiores valores (Figura 1E). Contudo, isso indica que os aditivos aliados ao MAP, que é altamente solúvel, promoveram alta liberação de P em solução, aos 30 DAI (Figura 1A), e reduziram a precipitação com Fe e Al (Figura 2B). Esse maior tempo de permanência do ânion fosfato em solução (90 DAI), aliado à ausência de plantas para absorção, como o feijoeiro que já teria sido colhido aos 90 dias, favoreceu a adsorção do P pelos colóides do solo (Figura 1E), reduzindo sua disponibilidade.

Com o tempo, as transformações do P-Lábil em formas não lábeis contribuem para a formação de um estoque, “legado”, de P no solo, que continuará a impactar as práticas agrícolas (Pavinato et al., 2024; Pavinato et al., 2020). O desafio futuro, portanto, não se limita apenas ao fornecimento de P, mas envolve o manejo inteligente para mobilizar esse legado, tornando-o novamente disponível às plantas por meio de estratégias como o uso de culturas extratoras, consórcios entre espécies com diferentes estratégias de absorção, aplicação de aditivos biológicos (como microrganismos solubilizadores de fósforo) e ajustes no manejo da calagem e da matéria orgânica.

Aos 90 DAI, a fração de Pi-ocluso, apresentou incremento pela aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos, passando de 119,36 para 197,94 mg kg⁻¹, entre 30 a 90 dias, respectivamente (Tabela 3). Esse aumento foi mais expressivo nos tratamentos com ST aplicado com os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP®, quando comparado aos tratamentos com MAP aplicado com os mesmos aditivos (Figura 2D). No caso do ST, o

aditivo IFCoat resultou no maior valor de Pi-ocluso, ao contrário do que se observou com o MAP, onde a ausência de aditivos levou aos maiores valores dessa fração (Figura 2D).

Mesmo considerando que a composição amoniacal do MAP pode elevar o pH local temporariamente e a acidez gerada pela dissolução ST pode favorecer as reações com óxidos de Fe e Al culminando na oclusão de P (Fageria e Baligar, 2005), se deve considerar também a possível formação de fosfato bicálcico, formado pela dinâmica de liberação de P pelo ST (Lindsay, 1979; Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959a, 1959b, 1959c) e, também, pela precipitação com o Ca^{2+} oriundo da calagem. Embora pouco solúvel, o fosfato bicálcico é suscetível à digestão ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$), método utilizado na extração do Pi-ocluso, o que pode ter contribuído para os elevados valores observados dessa fração (Gatiboni et al., 2013) (Figura 2A e 2D).

Apesar de baixa solubilidade, os precipitados de P com Ca apresentam certa reversibilidade, podendo atuar como uma fonte potencial de fósforo para as plantas. Aos 90 DAI, houve o aumento da fração de fósforo precipitado com cálcio, que passou de 2,90 para 11,00 mg kg^{-1} (Tabela 3 e Figura 2F). Esses resultados refletem a dinâmica observada nas demais frações, em que, apesar da grande liberação inicial do ânion fosfato em solução aos 30 DAI, a ausência de plantas que realizassem a absorção desse fósforo e a dinâmica de liberação das fontes aliada aos aditivos e as características do LVAwf, contribuíram, aos 90 DAI, para a transformação do P em formas menos disponíveis, formando um “legado” de P no solo.

Aos 90 DAI, a fração de Pi-Ca, apresentou incremento pela aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos (11,00 mg kg^{-1}) em comparação aos 30 DAI (2,90 mg kg^{-1}) (Tabela 3). A aplicação de ST com a adição de aditivos, tanto IFCoat como KimcoatBioHP®, influenciaram no aumento da precipitação com cálcio, levando à maiores valores do que aqueles observado para a aplicação de MAP com os mesmos aditivos. (Figura 2F). Esse comportamento pode ser associado à composição dos fertilizantes. O MAP, que não possui cálcio em sua composição, ao liberar amônio acidifica o microambiente reduzindo as formas precipitadas de Pi-Ca (Havlin et al., 2005). Esses resultados demonstram que a dinâmica do P em solos intemperizados está relacionada à composição do fertilizante, sendo os maiores teores de Pi-Ca associados ao uso de fosfatos de cálcio acidulados, como o superfosfato triplo.

Entre os 90 dias de incubação até o final do experimento, o fósforo precipitado com Fe e Al (Pi-Fe+Al), não alterou com o uso de fertilizantes ou aditivos de forma isolada ou com a interação entre ambos, havendo apenas diferença entre a aplicação de fertilizantes e o tratamento controle (Figuras 2E, 2G, 2I e 2K). Entre 90 e 180 dias após a incubação houve incremento dos valores médios de Pi-Fe+Al de 48,21 para 104,37 mg kg⁻¹, representado mais que uma duplicação (Tabela 3). Aos 180 DAI, os valores de Pi-Fe+Al permaneceram próximos, de 104,37; 96,79 e 104,11 mg kg⁻¹ aos 180, 270 e 360 DAI, respectivamente (Tabela 3), indicando que, para as condições do tratamento no LVAwf e na ausência de novas aplicações de fósforo, possivelmente não ocorrerão perdas adicionais para essa forma.

Esse resultado reforça o impacto da aplicação de fosfatados em solos com alto teor de óxidos de Fe e Al como o LVAwf do estudo, em que grande parte do P aplicado é complexado após o contato com o solo e, com o tempo, deixa de ser lábil devido aos processos de precipitação (Novais e Smyth, 1999; Sousa et al., 2016). No entanto, a aplicação de aditivos pode minimizar essas perdas por precipitação, favorecendo a adsorção do fósforo em formas lábeis apenas nos primeiros 30 dias (Figura 2 B). Esse período é particularmente relevante, pois coincide com o início do pico de absorção de fósforo pela maioria das plantas anuais. Assim, essas tecnologias seriam mais adequadas para culturas anuais ou perenes cuja absorção de P se concentre em um curto intervalo após a aplicação dos fertilizantes.

Nas avaliações realizadas, somente aos 90 DAI houve correlação significativa entre o Po-mic e as demais frações de P associada a matéria orgânica (Tabela 4). A partir dos 180 DAI, essa correlação deixou de ocorrer no LVAwf avaliado. A adição de fertilizantes, aumentando a disponibilidade de nutrientes como N, P e Ca, o que estimula a atividade microbiana no solo. No entanto, na ausência de plantas, essa atividade é interrompida (Moreira; Siqueira, 2006), o que explica a ausência de correlação dentre o Po-mic e as demais frações de P orgânico a partir dos 180 DAI.

A principal correlação observada foi que o aumento do Po-mic, indicativo de maior atividade microbiana, esteve associado à redução do Po-lábil (Tabela 4). O Po-Lábil é composto majoritariamente por compostos orgânicos de baixa recalcitrância, e que possivelmente serviram de substrato para o desenvolvimento dos microrganismos. No mesmo período, observou-se um aumento do Po-Mlábil (Tabela 4), o que sugere que essa fração seja o produto dos processos mediados pela atividade microbiana.

Entre a aplicação dos fertilizantes e os 90 DAI, as transformações na fração orgânica de fósforo no solo resultaram no aumento do conteúdo de P na fração orgânica total, passando de 21,04 mg kg⁻¹ aos 30 dias para 55,85 e 77,95 mg kg⁻¹ aos 90 e 180 dias, respectivamente (Tabela 3). O principal incremento foi observado na fração Po-MLábil, confirmando que esta é a fração originada pelos processos de transformação mediados por microrganismos, mesmo na ausência de plantas (Tabela 4). A partir dos 180 DAI, os valores de Po-mic passaram a ser nulos ou muito próximos de zero (Tabela 4).

TABELA 4 Coeficientes de correlação entre o Po-mic e as frações de P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente lábil (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil) e os teores médios de P em cada fração orgânica em um Latossolo Vermelho Amarelo Acriférrico incubado com MAP e ST com e sem aditivos por 30, 90, 180, 270 e 360 dias.

	Dias de Incubação				
	30	90	180	270	360
	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic
Coeficientes de Correlação (r)					
Po-Lábil	-0,36ns	-0,46*	0,00ns	-0,21ns	-0,10ns
Po-MLábil	-0,18ns	0,51**	0,00ns	-0,01ns	-0,07ns
Po-NLábil	-0,17ns	-0,15ns	0,00ns	0,31ns	0,00ns
Teores médios (mg kg ⁻¹)					
Po-Lábil	5,04	8,74	13,59	3,50	0,22
Po-mic	2,67	7,98	0,00	1,04	0,45
Po-MLábil	0,0	38,29	58,41	79,04	2,42
Po-NLábil	13,20	0,84	5,95	11,90	0,00
Po-Total	21,04	55,85	77,95	95,48	3,09

Fonte: Autor (2025).

Entre 30 e 180 dias após incubação, as frações do Pi-sol e do Po-mic demonstram comportamento inverso, com aumento acompanhado da redução da outra (Figura 4A). Esse padrão indica que, após a aplicação dos fertilizantes, há estímulo à atividade da microbiota, promovendo a imobilização do P da solução, com pico observado até os 90 dias. A partir desse ponto, a atividade microbiana diminui (Po-mic), possivelmente em função da redução da disponibilidade de substrato e, ou, da morte dos microrganismos, resultando na liberação do P anteriormente imobilizado de volta à solução do solo (Figura 4A). Com o retorno do P à solução, os processos de interação do P inorgânico com os componentes do solo são reativados, especialmente os óxidos de Fe e Al. Isso resulta em aumento das perdas por precipitação, evidenciando que a liberação do P em

solução, decorrente da redução da atividade microbiana, favorece novamente o aumento das perdas de P precipitado com Fe e Al novamente (Figura 4B).

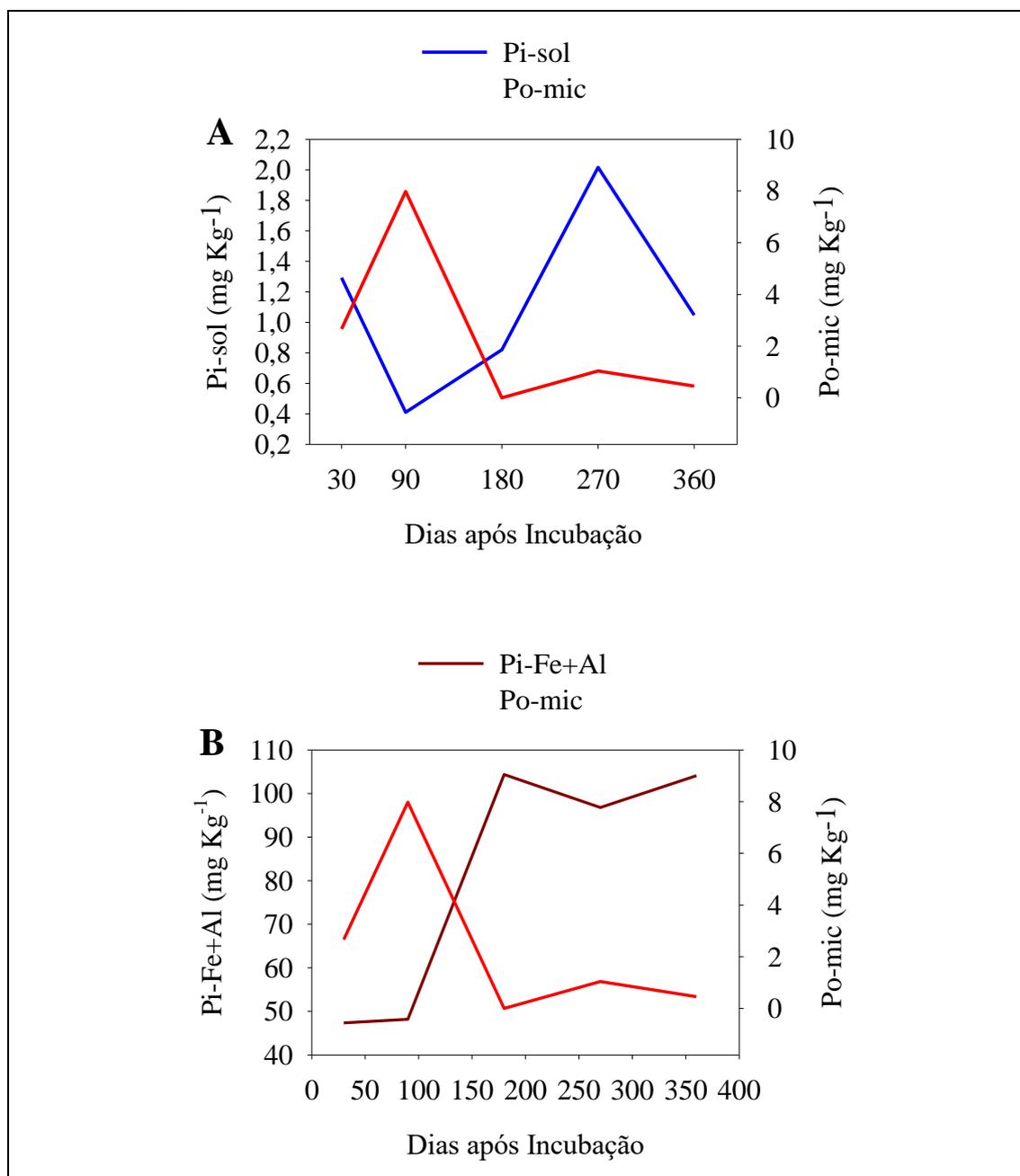


FIGURA 4 Relação entre os valores médios de Pi-sol e Po-mic em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO ACRI-FÉRRICO dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos.

Considerando as frações orgânicas, após 90 dias de incubação, observou-se redução da fração orgânica lábil com a aplicação dos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, em contraste com os tratamentos sem aditivo e o controle (Figura 3D). Esse comportamento está correlacionado ao aumento concomitante do fósforo orgânico na

massa microbiana (Po-mic), que passou de 2,67 para 7,98 mg kg⁻¹ (Tabela 4), especialmente na combinação do aditivo IFCoat com o MAP (Figura 3E).

A imobilização de P na biomassa microbiana pode estar associada à redução observada na fração Pi-Fe+Al aos 30 DAI (Figura 2B), em que o tratamento MAP com IFCoat apresentou os menores valores dessa fração. Esse efeito também é evidenciado na Figura 4B, onde o aumento do Pi-Fe+Al ocorre apenas após os 90 dias, coincidindo com a redução da atividade microbiana.

Esses resultados indicam que, no LVAwf, a manutenção de elevada atividade microbiana é essencial para reduzir perdas de P por precipitação com Fe e Al. A microbiota transforma o Pi em solução em P orgânico, o qual pode ser liberado gradualmente, constituindo-se como o principal legado de fósforo com potencial de uso futuro, contribuindo para uma agricultura mais sustentável.

A aplicação de MAP apresentou maior valor de Po-MLábil em comparação com o ST, aos 90 DAI (Figura 3F), evidenciando que o P liberado por mineralização pode estar sendo retido em formas orgânicas de estabilidade intermediária. Entre os aditivos, o IFCoat se destacou em comparação ao aditivo KimcoatBioHP® e sem aditivo, apresentando maior valor de Po-MLábil (Figura 3F). A evolução da fração Po-MLábil, de 0,0 mg kg⁻¹ aos 30 DAI para 38,29 mg kg⁻¹ aos 90 DAI (Tabela 3), destaca o papel positivo dos aditivos, principalmente do IFCoat na imobilização de P proveniente de fontes solúveis em frações orgânicas de média estabilidade. Essa dinâmica pode contribuir para a redução das perdas por fixação de fósforo em formas inorgânicas menos lábeis, típicas de solos tropicais.

Por outro lado, a fração Po-Nlábil, embora não tenha sido afetada pelos tratamentos, apresentou redução após os 90 dias de incubação, passando de 13,20 para 0,84 mg kg⁻¹ em relação à avaliação aos 30 DAI (Tabela 3). Isso indica que, apesar de sua maior resistência à mineralização, essa fração pode ser transformada sob condições específicas.

Aos 180 DAI, houve um pequeno aumento da liberação de fósforo inorgânico em solução em relação aos 90 DAI, passando de 0,41 para 0,57 mg kg⁻¹ (Tabela 3), embora os valores ainda sejam considerados baixos. No tratamento com ST, a aplicação do aditivo KimcoatBioHP® resultou nos maiores valores de Pi-solução em comparação ao IFCoat e a aplicação sem aditivo (Figura 1F). Para o MAP, não houve diferença entre os aditivos, porém a aplicação com IFCoat levou à valores de Pi-solução superiores àqueles observados para a combinação de ST com o mesmo aditivo (Figura 1 F).

O fósforo inorgânico lábil, aos 180 DAI, foi alterado pela aplicação de aditivos e pela interação desses com os fertilizantes (Tabela 5). A aplicação de ST com o aditivo KimcoatBioHP® resultou em valores de Pi-Lábil superiores ao controle e também à combinação de MAP com o mesmo aditivo (Figura 1G). Em contrapartida, a aplicação de MAP com IFCoat, promoveu maior valor de Pi-Lábil em comparação à aplicação de ST com IFCoat, diferindo também do controle (Figura 1G). No caso do MAP, ambos os aditivos (IFCoat ou KimcoatBioHP®) elevaram os valores de Pi-Lábil (Figura 1G). Enquanto para o ST, a adição com KimcoatBioHP® proporcionou os maiores valores entre os tratamentos com aditivos (Figura 1G).

Esses resultados sugerem que o aditivo IFCoat, quando combinado ao ST, tende a gerar menor quantidade de Pi-Lábil em relação à sua aplicação com MAP, demonstrando maior compatibilidade com fontes de alta solubilidade, como o MAP. Além disso, considerando a redução das perdas por precipitação com Fe e Al, o fósforo liberado em solução nos tratamentos que associam fontes fosfatadas a aditivos pode favorecer a adsorção do ânion fosfato livre em formas lábeis, prontamente disponíveis para retornar à solução do solo.

A partir de 180 DAI, a aplicação de aditivos deixou de interferir na fração Pi-NLábil em um LVAwf (Tabela 3; Figuras 1H e 1L). Nesse período, se observou efeito significativo apenas dos fertilizantes, com maiores valores de Pi-NLábil resultantes da aplicação de MAP (155,40 mg kg⁻¹), em comparação ao ST (113,34 mg kg⁻¹), diferindo também do solo sem adubação fosfatada (Figura 1H).

Em solos tropicais, altamente intemperizados como o Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico, que possuem alta capacidade de adsorção de P, a aplicação de fontes fosfatadas de alta solubilidade pode favorecer o aumento das frações não lábeis desse nutriente, com posterior evolução para frações oclusas em um processo lento e contínuo (Novais e Smyth, 1999; Fixen e Groven, 1990).

A adsorção específica de P, inicialmente em ligações mononucleadas (Pi-NLábil) e posteriormente, em formas binucleadas (Pi-ocluso), se estabilizou a partir dos 180 DAI (Tabela 3). Após esse período, houve diferenças apenas entre os tratamentos com aplicação de fertilizantes e o tratamento controle. Para Pi-NLábil, aos 360 DAI, o tratamento com fertilizantes apresentou valores superiores (334,63 mg Kg⁻¹) ao controle (194,17 mg Kg⁻¹) (Figura 1L). Da mesma forma, Pi-ocluso aos 270 DAI, os fertilizantes resultaram em maior acúmulo dessa fração (418,25 mg Kg⁻¹) em relação ao controle (308,51 mg Kg⁻¹) (Figura H).

Esses resultados demonstram que o P aplicado via fontes externas tende a ser gradualmente fixado em frações menos disponíveis, evidenciando um processo lento de imobilização. Embora as frações Pi-NLábil e Pi-ocluso representem um “legado” de fósforo no solo, sua disponibilização é limitada no curto prazo. Assim, os tratamentos aplicados não foram eficazes em impedir a fixação do P nessas frações, tampouco promoveram sua liberação progressiva.

A partir dos 180 dias de incubação até o final das análises aos 360 DAI, foi observada uma tendência de estabilização nas frações de fósforo inorgânico menos disponíveis (Pi-Fe+Al, Pi-Ca e Pi-ocluso) independentemente de fertilizantes, aditivos ou suas combinações. A predominância da fração Pi-Fe+Al reforça o comportamento típico de solos altamente intemperizados, como o LVAwf, caracterizado pela elevada capacidade de precipitação com Fe e Al livres em solução (Novais; Smyth; Nunes, 2007). A fração de Pi-Ca se manteve pouco expressiva, como esperado para esse tipo de solo, sendo as variações observadas até os 90 DAI (Tabela 3), provavelmente reflexo transitório da aplicação de corretivos ou da composição dos fertilizantes.

Embora aos 270 DAI tenha ocorrido diferença significativa entre os tratamentos para Pi-Ca (Figura 2J), com maior perda de P precipitado com Ca quando tratado o MAP com o IFCoat (Figura 3 J), os valores permaneceram baixos ($2,05 \text{ mg kg}^{-1}$). Da mesma forma, o Pi-ocluso, embora tenha aumentado gradualmente até 270 dias ($402,6 \text{ mg kg}^{-1}$), foi reduzido aos 360 dias ($148,80 \text{ mg kg}^{-1}$), evidenciando o caráter lento e progressivo da oclusão do fósforo em óxidos de Fe e Al (Novais e Smyth, 1999; Fixen e Groven, 1990). Esses resultados indicam que, após 180 dias, a dinâmica dessas frações se tornou menos responsiva aos manejos, reforçando a necessidade de focar em formas mais lábeis e biodisponíveis de P para aumentar a eficiência do uso do nutriente em solos tropicais. Importante ressaltar que o uso de sistemas de cultivo que mantem plantas vivas pode ser uma técnica eficiente para reduzir as perdas de P residual para frações menos lábeis, associando esse à matéria orgânica, o qual pode contribuir no futuro para o tamponamento do nutriente em solução.

A fração de Po-Lábil alterou com os fertilizantes, aditivos e com a interação entre ambos, aos 180 DAI (Tabela 3). Para o MAP, a adição dos aditivos IFCoat e KimcoatBioHP®, resultaram em menores valores de Po-Lábil em comparação à aplicação do MAP sem aditivo, além de diferirem do controle (Figura 3G). No caso do ST, não foram observadas diferenças entre os aditivos, sendo que apenas a combinação com KimcoatBioHP® não diferiu do controle (Figura 3G). Comparando os fertilizantes,

na ausência de aditivos, não houve diferença significativa entre MAP e ST (Figura 3G). Contudo, quando associados aos aditivos, o MAP apresentou menores valores de Po-Lábil em relação ao ST (Figura 3G).

Aos 270 DAI, também houve efeito da interação entre fertilizantes e aditivos no Po-Lábil (Tabela 3). Porém, com redução expressiva da média e sem diferença do tratamento controle (Tabela 3). Somente para o MAP, a aplicação do aditivo KimcoatBioHP® se destacou dos demais aditivos, e da combinação ST com o mesmo aditivo (Figura 3J).

Aos 360 DAI, não houve efeito dos tratamentos sobre o Po-Lábil (Tabela 3). Além disso, os valores obtidos com a aplicação dos fertilizantes foram inferiores aos do tratamento controle (Figura 3M).

A fração do Po-mic não apresentou variações significativas em resposta aos tratamentos no período de 180 até 360 DAI (Tabela 3 e Figura 3). Essa estabilidade pode estar associada às características físico-químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf), que, por ser altamente intemperizado e rico em óxidos de Fe e Al, apresenta elevada capacidade de fixação de fósforo, resultando em baixa disponibilidade do nutriente no solo. Além disso, a ausência de plantas durante o experimento pode ter contribuído para a baixa atividade microbiana, uma vez que a rizosfera é o principal ambiente de estímulo à microbiota do solo. Esse resultado corrobora a afirmação de que um solo sem plantas se assemelha a um deserto nutricional, com baixa ciclagem e biodisponibilidade de nutrientes (Moreira; Siqueira, 2006).

A média total da fração do Po-MLábil aumentou de 38,3 mg kg⁻¹ aos 90 DAI para 58,41 mg kg⁻¹ aos 180 DAI, momento em que também foi observada alteração com a aplicação de aditivos além de interação significativa entre fertilizantes e aditivos (Tabela 3). Para a fonte MAP, não houve diferença entre os aditivos, porém a combinação com KimcoatBioHP® resultou em maiores valores de Po-MLábil em comparação ao ST com o mesmo aditivo (Figura 3H). Entretanto, para o ST, a aplicação do aditivo IFCoat promoveu maior acúmulo de Po-MLábil em relação à combinação de ST sem aditivo, sendo que ambos superaram os valores obtidos a aplicação de ST com KimcoatBioHP® (Figura 3H). Além disso, o ST aplicado com o aditivo IFCoat e aplicado sem aditivo, apresentaram maiores valores da fração Po-MLábil em comparação as aplicações de MAP com IFCoat e sem aditivo (Figura 3H). No entanto, aplicações de MAP com IFCoat ou com KimcoatBioHP®, e as aplicações de ST com

IFCoat ou sem aditivo apresentaram valores de Po-MLábil abaixo do tratamento controle (Figura 3H).

Com o MAP, se observa que o aumento do Po-MLábil com o uso dos aditivos contrasta com a redução do Po-Lábil dos mesmos tratamentos (Tabela 4). Essa redução pode estar associada à transformação do Po-Lábil em compostos mais recalcitrantes, mediada por microrganismos, o que corrobora os resultados observados aos 90 DAI, quando houve aumento do Po-MLábil e redução do Po-Lábil, acompanhados de elevação do Po-mic (Tabela 4).

A partir dos 180 DAI o Po-MLábil passou a mostrar uma tendência de estabilização (Tabela 3). Embora, aos 270 DAI, tenha ocorrido novo efeito significativo da aplicação isolada dos fertilizantes, em que o MAP apresentou maior valor de Po-MLábil que o ST (Figura 3K), comportamento já observado aos 90 DAI (Figura 3F), e ambos diferindo do controle. No entanto, aos 360 DAI não foram mais observadas diferenças estatísticas, indicando que essa fração orgânica se estabilizou no solo após 270 dias de incubação, com pouca influência dos aditivos. Essa evolução está alinhada com a dinâmica de outras frações, como do Po-mic, que apresentou teores muito baixos ao longo da incubação (Tabela 3), refletindo limitação da atividade microbiana. Da mesma forma as frações inorgânicas menos lábeis (Pi-NLábil e Pi-ocluso) também se estabilizaram aos 180 DAI, indicando que o Po-MLábil atua como uma ponte transitória entre as formas mais disponíveis, como o Po-lábil, e as mais recalcitrantes, sendo influenciado pelas fontes de fósforo aplicadas e pela atividade microbiana nas fases iniciais do ciclo.

Aos 180 DAI, o Po-NLábil foi influenciado pela aplicação de aditivos de forma isolada, e com a interação entre aditivos e fertilizantes (Tabela 3). Na aplicação do MAP, não houve diferença entre os aditivos (Figura 3I). Contudo, para o ST, a adição do aditivo IFCoat resultou em maiores valores de Po-NLábil em comparação aos demais aditivos (Figura 3I). Além disso, a aplicação de ST com o aditivo IFCoat promoveu maior acúmulo de Po-NLábil que a aplicação de MAP com o mesmo aditivo (Figura 3I). Apenas o tratamento do ST com o aditivo IFCoat aumentou significativamente os teores de Po-NLábil ($11,49 \text{ mg kg}^{-1}$) em relação ao solo sem adubação fosfatada ($4,41 \text{ mg kg}^{-1}$). Essa forma de fósforo, embora não prontamente disponível, pode representar um legado potencialmente acessível às plantas a médio ou longo prazo.

Aos 270 DAI, o Po-NLábil voltou a apresentar alterações significativas em resposta à aplicação dos fertilizantes, dos aditivos e da interação entre ambos (Tabela

6). No entanto, os teores foram nulos nas combinações entre MAP e aditivos, ST sem aditivo e no tratamento controle (Figura 3L). Somente os tratamentos com ST associados aos aditivos KimcoatBioHP® (57,40 mg kg⁻¹) e IFCoat (26,04 mg kg⁻¹) resultaram em acúmulo detectável dessa fração (Figura 3L).

Após 360 dias de incubação, os teores de Po-NLábil não foram mais detectados (Tabela 7), impossibilitando a verificação de diferenças entre os tratamentos. Embora o Po-NLábil seja uma fração considerada estável e de difícil transformação, os valores nulos ao final do período sugerem possível mineralização microbiana completa, com posterior conversão para formas inorgânicas menos acessíveis.

5 CONCLUSÕES

Os aditivos testados apresentaram diferentes interações com cada um dos fertilizantes. Sendo que o MAP foi a fonte que apresentou maior eficiência quando combinado com os aditivos, com KimcoatBioHP® atuando principalmente na fase de liberação inicial do fósforo, e o IFCoat mostrando maior persistência temporal, atuando tanto na redução da precipitação quanto na manutenção de formas lábeis. Enquanto isso com ST, ambos aditivos apresentaram desempenho limitado por favorecer o aumento de formas mais estáveis de fósforo.

Os aditivos também apresentaram eficiência temporal, pois no período inicial, primeiros 90 dias, apresentaram influencia na dinâmica do fosforo presente no solo. Com o passar do tempo os aditivos passaram a não mostrar mais eficiência na interação em relação ao fosforo presente no solo, passando a não impossibilitar a transformação em formas de baixa disponibilidade ou indisponíveis em solução.

Portanto, se pode concluir que os aditivos são uma tecnologia promissora para o melhor aproveitamento dos fertilizantes fosfatados. Entretanto, se deve levar em consideração que a eficiência destes aditivos é governada pela composição do fertilizante utilizado, e que os mesmos possuem período de eficiência limitado.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. H.; ANDRADE, C. A.; SILVA, R. R. et al. **Solubilização de fósforo por bactérias isoladas de solos do Cerrado sob diferentes manejos agrícolas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 41, p. e0160445, 2017.
- ACHARY, V. M. M. et al. **Phosphorus supply influences high-affinity phosphate transporter gene expression and phosphorus acquisition in wheat cultivars.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 142, p. 454–460, 2017.
- ALI, A.; AL-JUTHERY, H. W. **Effect of coated phosphorus fertilizer on maize yield and phosphorus use efficiency under calcareous soil conditions.** International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, v. 6, p. 49–55, 2017.
- ASHRAF, M. A. et al. **Coating materials for slow release of fertilizers: A review.** Journal of Plant Nutrition, v. 42, p. 2343–2364, 2019.
- BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. **Dinâmica do fósforo em solos tropicais.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 1309–1319, 2014.
- BARROW, N. J. **Reactions of anions and cations with variable-charge soils.** Dordrecht: Springer, 1985.
- CHAGAS, J. F. et al. **Aplicação de polímeros na eficiência de fertilizantes fosfatados.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, p. 1258–1265, 2015.
- CHOWDHURY, R. B. et al. **Global phosphorus scarcity: Understanding the full spectrum of driving forces and impacts.** Sustainability, v. 9, n. 5, p. 735, 2017.
- CORDELL, D.; NESET, T. S. S. **Phosphorus: A global resource scarcity.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, v. 3, p. 240–255, 2014.
- COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. **Iron oxide mineralogy of soils developed from volcanic rocks in the Northwestern United States.** Soil Science Society of America Journal, v. 73, p. 179–190, 2009.
- DA CRUZ, M. C. P. et al. **Polímeros e recobrimento de fertilizantes: uma alternativa para a agricultura moderna.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 41, p. e0160392, 2017.
- DALY, P. et al. **Phosphorus – The Nutrient Limiting Plant Growth in Soils.** Plant Soil, v. 419, p. 1–6, 2015.
- ELSER, J.; BENNETT, E. **Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle.** Nature, v. 478, p. 29–31, 2011.
- EVERAERT, M. et al. **Fertilizers with enhanced phosphorus availability: A review of advances in fertilizer technology.** Soil Use and Management, v. 33, p. 34–48, 2017.

- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. **Enhancing phosphorus use efficiency in crop plants.** *Advances in Agronomy*, v. 88, p. 185–222, 2005.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.** R Package Version 1.2.0, 2021.
- FINK, J. R. et al. **Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy.** *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 1–9, 2015.
- FIXEN, P. E.; GROVEN, C. V. **Factors affecting phosphorus fixation in soils.** *Agronomy Journal*, v. 82, p. 445–449, 1990.
- FIXEN, P. E.; LUDWICK, A. E. **Phosphorus availability and soil pH.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 46, p. 970–972, 1982.
- GATIBONI, L. C. et al. **Determination of phosphorus fractions in highly weathered soils: efficiency of extraction solutions and laboratory procedures.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 589–598, 2013.
- GIROTO, A. S. et al. **Slow-release fertilizers: What they are and how they work.** *Scientia Agricola*, v. 74, p. 397–408, 2017.
- GOMES, E. A. et al. **Desempenho de isolados de Bacillus spp. em relação a características de promoção de crescimento de plantas.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, p. 791–798, 2014.
- GUEDES, R. E. et al. **Efficiency of phosphorus fertilizers in tropical soils.** *Scientia Agricola*, v. 73, p. 284–291, 2016.
- GUELFY, D. R. et al. **Polímeros como tecnologia de liberação controlada de nutrientes em fertilizantes: uma revisão.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 782–788, 2018.
- GUPTA, R. K. et al. **Role of phosphate solubilizing microbes in sustainable agriculture – A review.** *International Journal of Plant Production*, v. 9, p. 20–27, 2015.
- HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management.** 8. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2017.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. **Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 46, p. 970–976, 1982.
- HINGSTON, F. J. et al. **Anion adsorption by goethite and gibbsite.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 36, p. 804–810, 1972.
- JASINSKI, S. M. **Phosphate Rock.** *Mineral Commodity Summaries*, p. 120–121, 2021.
- KABAT-ZINN, J. **Mindfulness for beginners.** Boulder: Sounds True, 2004.
- KALAYU, G. **Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers.** *International Journal of Agronomy*, v. 2019, p. 1–7, 2019.

- LEHNINGER, A. L. **Princípios de bioquímica**. 1. ed. São Paulo: Sarvier, 1973.
- LI, H. et al. **Slow-release fertilizers regulate soil nutrient supply and improve crop productivity**. *Agronomy Journal*, v. 108, p. 1749–1757, 2016.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. **The solubility and availability of phosphorus fertilizers in soils**. *Advances in Agronomy*, v. 11, p. 1–48, 1959.
- MACDONALD, G. K. et al. **Improving phosphorus management to enhance food security and environmental protection**. *Global Food Security*, v. 1, p. 15–24, 2011.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: Nutrientes minerais e adubação**. São Paulo: Ceres, 1981.
- MCLAREN, R. G. et al. **Polymer-coated fertilizers for improved nutrient efficiency in agriculture**. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 65, p. 5580–5590, 2017.
- MIHAILESCU, C. C. et al. **Phosphorus loss from agricultural land: A critical review**. *Agricultural Water Management*, v. 150, p. 111–123, 2015.
- MONTALVO, D. et al. **Nanotechnology applications for sustainable agriculture and food security: Phosphorus nanofertilizers**. *Scientific Reports*, v. 5, p. 10899, 2015.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.
- NASCIMENTO, C. A. C. et al. **Soil phosphorus fractions and their relation to properties of Ultisols under different management systems**. *Soil Research*, v. 56, p. 715–724, 2018.
- NESET, T. S.; CORDELL, D. **Global phosphorus scarcity: Identifying synergies for a sustainable future**. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 92, p. 2–6, 2012.
- 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.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. **Isotermas de adsorção de fósforo em solos**. In: *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: SBCS, 2007.
- OLIVEIRA, C. A. et al. **BiomaPhos®: A tecnologia que aumenta a eficiência da adubação fosfatada**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. e0200050, 2020.
- PARFITT, R. L. **Phosphate adsorption on variable charge minerals: A review**. *Soil Science Society of America Journal*, v. 42, p. 483–489, 1978.
- PAVINATO, P. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas agrícolas tropicais**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1431–1441, 2007.

- PAVINATO, P. S. et al. **Phosphorus legacy in tropical soils**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, p. e0200114, 2020.
- PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. **A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants**. Agriculture, v. 9, p. 120, 2019.
- PIERZYNSKI, G. M. et al. **Soils and environmental quality**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1991.
- REETZ, H. F. **Managing phosphorus for crop production**. International Plant Nutrition Institute, Norcross, Georgia, 2017.
- RHEINHEIMER, D. S. **A dinâmica do fósforo no solo: fontes, retenção e disponibilidade**. Porto Alegre: UFRGS, 2000.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. **Phosphorus buffering capacity and availability in soils: A critical review**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1009–1017, 2008.
- RIBEIRO, R. A. et al. **Microrganismos solubilizadores de fósforo e sua aplicação na agricultura**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 13, p. e5542, 2018.
- SAMPLE, E. C. et al. **Reactions of phosphate fertilizers in soils**. Advances in Agronomy, v. 31, p. 1–41, 1980.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.
- SARKAR, D. et al. **Controlled release phosphorus fertilizers: A review**. Journal of Environmental Quality, v. 47, p. 1241–1254, 2018.
- SCHOLZ, R. W.; WELLMER, F. W. **Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: what we may learn from the case of phosphorus?** Global Environmental Change, v. 23, p. 11–27, 2013.
- SHEN, J. et al. **Innovative phosphorus fertilizers in sustainable agriculture**. Earth-Science Reviews, v. 169, p. 106–118, 2019.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.
- SILVA, J. A. A. et al. **Fertilizantes fosfatados: Eficiência agrônômica e impactos ambientais**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 29, p. 53–66, 2005.
- SOUSA, D. M. G. et al. **Dinâmica e manejo do fósforo no solo**. In: Fertilidade do Solo. Viçosa: SBCS, 2016.
- SOUSA, R. T. et al. **Biomass and phosphorus uptake by maize in response to phosphate-solubilizing bacteria**. Scientia Agricola, v. 77, p. 1–7, 2020.

TEIXEIRA, T. M. et al. **Uso de polímeros como revestimento de fertilizantes fosfatados.** *Ciência Rural*, v. 46, p. 2098–2104, 2016.

TIECHER, T. L. et al. **Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management systems and mineralogy.** *Soil and Tillage Research*, v. 121, p. 1–6, 2012.

VELLOSO, A. C. X. et al. **Fatores que afetam a disponibilidade de fósforo no solo.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. e0200013, 2020.

VIANA, J. H. M. et al. **Determinação de frações de fósforo inorgânico em solos pelo método de Hedley modificado.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, p. e0150541, 2016.

VOGEL, C. et al. **Phosphate availability and the microbial community in agricultural soils: The influence of fertilizer type and application rate.** *Applied Soil Ecology*, v. 147, p. 103364, 2020.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils.** 15. ed. London: Pearson, 2017.