



**MARIA ELISA ARAÚJO DE MELO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DOSES DO ADITIVO  
AVAIL<sup>®</sup> PARA TRATAMENTO EM MAP**

**LAVRAS – MG**

**2023**

**MARIA ELISA ARAÚJO DE MELO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DOSES DO ADITIVO AVAIL® PARA  
TRATAMENTO EM MAP**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

Me. Ana Paula Pereira Nunes

Co-orientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

**MARIA ELISA ARAÚJO DE MELO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DOSES DO ADITIVO AVAIL® PARA  
TRATAMENTO EM MAP**

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF DOSES OF THE AVAIL® ADDITIVE  
FOR TREATMENT IN MAP**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 27 de julho de 2023.

Dr. César Ferreira Santos

ICL América do Sul

Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo

UFLA

Me. Ana Paula Pereira Nunes

UFLA

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

Me. Ana Paula Pereira Nunes

Co-orientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecer à Deus pela proteção e força para não desistir no meio do caminho.

Ao meu pai, Adilson Ferreira de Melo (in memoriam), pelo carinho, apoio e incentivo enquanto presente.

A minha mãe, Edilene Beatriz Araújo, por todo amor, dedicação, paciência e apoio em todo o percurso de graduação, e principalmente, por sempre acreditar em mim.

A Universidade Federal de Lavras, por toda oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Professor Dr. Douglas Ramos Guelfi, por me acolher, motivar e inspirar tanto a seguir uma área tão importante.

Aos colegas de trabalho do Laboratório de Corretivos e Fertilizantes, por todos os ensinamentos, brincadeiras e parcerias, em especial Sr. Humberto, Ana Paula, Adrianne e Cristhian, também pela amizade, carinho e acolhimento.

Aos amigos que a Universidade Federal de Lavras me proporcionou, em especial Cecília, Isadora e Kevin, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando.

Graças as vocês, é possível a comemoração dessa trajetória.

Imensa gratidão a todos!

## RESUMO

A utilização de fertilizantes fosfatados com tecnologias é uma alternativa para reduzir as perdas que ocorrem devido ao processo de fixação do fósforo (P), melhorando a eficiência de uso do nutriente. Neste trabalho, foi utilizado para tratamento do monoamônio fosfato (MAP) o copolímero AVAIL<sup>®</sup> (ácido maleico-itacônico), tecnologia, que segundo os fabricantes, é capaz de sequestrar metais e cátions antagônicos na região do grânulo do fertilizante, o que pode reduzir a fixação de P e torná-lo mais disponível para as plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar se a tecnologia aumentaria a difusão de P no solo. O experimento foi disposto em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 6 x 2, sendo utilizado para tratamento do MAP cinco doses do AVAIL<sup>®</sup> (50, 75, 100, 125 e 150%) em relação a dose recomendada pelo fabricante e um tratamento controle sem tratamento (MAP), duas saturações por bases (50 e 70%), contendo 4 repetições, totalizando 48 parcelas. Um teste com o objetivo de visualizar a difusão de P foi realizado e coletas foram feitas em 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 240, 336 e 672 horas após a adição do fertilizante. Foram obtidas imagens da zona de difusão utilizando um software de imagem para quantificar sua extensão. Foi possível observar que a difusão de P (mm) ocorreu mais rapidamente nas primeiras horas após a aplicação do fertilizante, apresentando a seguinte ordem 1 hora (12,71) = 6 horas (11,74) > 24 horas (11,31) = 120 horas (11,10) = 48 horas (10,90) = 3 horas (10,89) = 72 horas (10,43) = 12 horas (10,40) = 96 horas (10,12) = 144 horas (9,81) > 240 horas (6,49) = 168 horas (6,21). Na primeira hora após a aplicação do fertilizante, as doses de 50, 75, 100 e 150 apresentaram maior difusão com as respectivas médias 13,46, 12,29, 15,1 e 13,29 mm. No entanto, pode-se observar que a dose de 125 apresentou difusão mais constante ao longo do tempo, se comparado as demais doses e ao MAP convencional, após 7 dias de incubação. É possível concluir que os fertilizantes tratados com o copolímero AVAIL<sup>®</sup> apresentaram maior potencial de difusão em comparação ao MAP convencional.

**Palavras-chave:** difusão; tecnologias para fertilizantes; fertilizantes fosfatados; fósforo; eficiência de P.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Solos brasileiros e a dinâmica de P</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>O P na agricultura</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Difusão e disponibilidade de P</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Tecnologias para aumento da eficiência de P</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Preparo do solo</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Fertilizantes</b> .....	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>Difusão de P</b> .....	<b>16</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise de imagens</b> .....	<b>17</b>
<b>3.5</b>	<b>Análise de disponibilidade de P</b> .....	<b>17</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>26</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial exigido em todas as fases de crescimento das culturas e sua nutrição está diretamente associada ao desenvolvimento de raízes, formação de flor e sementes e ao crescimento e desenvolvimento de hastes e caules (MALAVOLTA, 2006; MOHAMMADI, 2012). Porém, a maioria dos solos brasileiros são considerados altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade, além disso, apresentam minerais de argila e óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), chamados de coloides, em sua composição (LOPES E GUILHERME, 2016). O P possui forte interação com os coloides encontrados no solo, sofrendo um processo denominado fixação, que é responsável por reter o elemento por ligações estáveis e praticamente irreversíveis, fazendo com que se torne indisponível as plantas. A fixação pode ocorrer de duas formas, sendo a primeira denominada precipitação, que ocorre quando o P se liga aos óxidos de Fe e Al originando compostos pouco solúveis e a segunda, denominada de adsorção específica, que ocorre quando o P se liga as argilas (NOVAIS et al., 2007; SAMPLE et al., 1980; TIECHER et al., 2012).

Diante disso, após a aplicação de fertilizantes fosfatados, podem ocorrer perdas de grandes quantidades do nutriente, fazendo com que o P seja considerado o segundo nutriente mais limitante na agricultura brasileira, mesmo que sua aplicação seja feita em grandes quantidades e com fertilizantes de alta solubilidade, visando suprir a “fome de P” do solo e das culturas (NOVAIS et al., 2007). Nesse contexto, torna-se fundamental a adoção de manejos adequados que visem aumentar a eficiência da adubação fosfatada, como a adoção de práticas corretivas e condicionantes do solo, adoção de sistemas integrados de produção, uso de tecnologias para fertilizantes, entre diversas outras.

A utilização de fertilizantes fosfatados com tecnologias é uma alternativa para reduzir as perdas que podem ocorrer devido ao processo de fixação do P, melhorando a eficiência no uso do fertilizante (CRUZ et al., 2017; GUELFY et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2016). Nesse escopo existem diferentes inovações e tecnologias como os inibidores de fixação, quimicamente modificados, liberação controlada, sinérgicos, “*blends*” (“misturas”) e multifuncionais (GUELFY et al., 2022). Diante dos problemas observados nos solos brasileiros, o uso de inibidores de fixação é uma estratégia interessante para reduzir as perdas de P pelos processos de adsorção específica e precipitação (HOPKINS et al., 2018). Existem trabalhos com diferentes tratamentos na linha de inibidores de fixação, um deles é o copolímero ácido

maleico-itacônico, que atua no sequestro de metais e cátions antagônicos, inibindo a formação de precipitados e aumentando a biodisponibilidade de P as plantas (DOYDORA et al. 2017).

O presente trabalho utilizou fertilizantes fosfatados tratados com o copolímero AVAIL<sup>®</sup> (Verdesian Life Sciences [formerly Specialty Fertilizer Products, LLC], Visalia, CA). Em trabalho realizado por Doydora et al. (2017), os autores comprovaram o modo de ação do produto, o que possibilita considerar o uso do AVAIL<sup>®</sup> na recomendação de fertilizantes, o que apresenta benefícios sustentáveis, como a redução da demanda de fertilizantes fosfatados e consequentemente o uso de recursos naturais que participa do processo de fabricação destes (HOPKINS et al., 2018). Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar se o tratamento do MAP utilizando o AVAIL<sup>®</sup> aumentaria a difusão de P no solo. Para isto, foram avaliadas a difusão e a disponibilidade de P após o tratamento do MAP utilizando doses de 50, 75, 100, 125 e 150% da dose recomendada pelo fabricante, após a incubação do fertilizante em solo de textura argilosa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Solos brasileiros e a dinâmica de P

No Brasil, existe uma grande diversidade de solos devido a variabilidade espacial e aos fatores de formação do solo, o que acarreta em 13 classes de solos (EMBRAPA, 2013). Dentre as classes de solo, cerca de 39% dos solos em território brasileiro são classificados em Latossolos (EMBRAPA, 2011). No município de Lavras – MG, predomina-se as classes de solo Argissolo e Latossolo, configurando juntos 72% do território municipal (CURI et al., 2020). A classe dos Latossolos caracteriza solos altamente intemperizados. Durante o processo de intemperismo, ocorre a perda das sílicas e cátions básicos, consequentemente ocorre um acúmulo de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, estes que geralmente se apresentam nas formas de hematita, goethita e/ou gibsitita (ALLEONI et al., 1995). De forma geral, essa classe de solo apresenta uma baixa capacidade de troca de cátions, normalmente alta profundidade, baixo pH e baixa saturação por bases (EMBRAPA, 2013).

Segundo Novais et al. (2007), as características do solo estão diretamente ligadas a dinâmica do P pois quanto mais intemperizado, este se torna mais eletropositivo, reduzindo a sua capacidade de troca de cátions e aumentando a adsorção aniônica, além de reduzir a saturação por bases. A princípio, o solo pode ser fonte de P, no entanto, ele também pode ser dreno: quando for fonte, fornecerá suas reservas para a planta, mesmo sob condições adversas; quando for dreno, ocorrerá uma competição entre o solo e a planta pelo P aplicado. No entanto, alguns solos tropicais apresentam uma capacidade de drenagem maior do que a capacidade da planta em absorver o P, resultando em uma competição desfavorável para a planta.

Após a aplicação de P, ele será solubilizado e destinado a solução do solo, onde poderá seguir para três vias: 1) absorção radicular pelas plantas e transformação em P orgânico; 2) adsorção específica aos coloides; ou 3) precipitação com cátions (FINK et al., 2016; TIECHER et al., 2012). Na solução do solo, o P pode ser absorvido pelas raízes das plantas, mas também pode ser perdido por lixiviação ou adsorção. Quando o P está presente na solução, ele é chamado de P-disponível. Quando o P passa pelo processo de adsorção, ele se torna lábil, podendo ser liberado de volta para a solução por meio da dessorção ou ser completamente fixado, neste caso, será chamado P não-lábil. Essas diferentes formas estão relacionadas à disponibilidade do nutriente no solo (NOVAIS et al., 2007). É observado que as frações de P-lábil diminuem com o tempo, o que é chamado de “*legacy-P*” (“legado de P”) (GATIBONI, 2020; PAVINATO, 2007).

No entanto, tratando-se de dinâmica do P no solo, as reações mais importantes são a de adsorção específica e a de precipitação. A adsorção específica ocorre de forma que exista uma atração eletrostática no início da reação fazendo com que haja a troca de ligantes dos oxidróxidos pelo fosfato da solução, a precipitação ocorre com a reação entre o P e outros íons, como Al, Fe e cálcio (Ca), formando compostos pouco solúveis (NOVAIS et al., 2007). Segundo Parfitt (1979), existe uma ordem preferencial do solo para adsorção de ânions, sendo o fosfato o de maior preferência, seguido por arseniato, selenito, molibdato, sulfato, fluoreto, cloreto e nitrato. Isso se dá devido à alta densidade de cargas do fosfato, quando comparado aos demais.

## **2.2 O P na agricultura**

O P é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, onde é considerado um macronutriente devido a quantidade exigida. O P está diretamente associado a fotossíntese, ao metabolismo de carboidratos, formação de energia (ATP), respiração e transferência de informações genéticas (DNA e RNA) (NOVAIS et al., 2007; PANTANO et al., 2016).

A absorção de P pelas plantas se dá principalmente pela forma química de ácido fosfórico ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), mas também é possível que ocorra minimamente pela forma de hidrogenofosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), independente da fonte aplicada, no entanto, as reações com o solo determinam a forma que estará disponível para a absorção vegetal (PEREIRA et al., 2021). Diferentemente da baixa mobilidade do P no solo, na planta é considerado completamente móvel, sendo possível observar em plantas bem nutridas que grande parte do P orgânico não metabolizado está concentrado no vacúolo e prontamente disponível para se redistribuir na presença de deficiência (NICCHIO, 2015). A deficiência de P tem grandes impactos na produtividade, visto que o principal sintoma observado é a redução do crescimento vegetal no início do estabelecimento da cultura, onde há uma maior demanda energética (NICCHIO, 2015).

Sabendo que o P exerce funções essenciais as plantas, se dá a importância do suprimento deste as plantas, visto que este é o segundo nutriente mais limitante para o crescimento vegetal (BUCHER et al., 2018). Para realizar o suprimento de P às plantas, a forma mais tradicional é o fornecimento via solo através de fertilizantes fosfatados, que em sua maioria são extraídos de rochas fosfáticas (NICCHIO, 2015). As rochas fosfáticas após extraídas podem ser

denominadas como fosfatos naturais, termofosfatos, fosfatos alternativos e fosfatos acidulados, podendo ter sua solubilidade classificada em água e citrato neutro de amônio (CNA) ou em ácido cítrico (GUELFÍ et al., 2022; PROCHNOW et al., 2004). Os fosfatos naturais e alternativos são obtidos através da moagem de rochas fosfáticas, os termofosfatos são obtidos pelo aquecimento das rochas fosfáticas em temperaturas extremamente elevadas e os fosfatos acidulados são obtidos por um processo de ataque ácido diretamente a rocha fosfática (GUELFÍ et al., 2022; NICCHIO, 2015).

O grande uso dos fertilizantes fosfatados se dá devido à alta solubilidade das fontes de P, como: superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (STP), monoamônio fosfato (MAP) e diamônio fosfato (DAP) (CÉSAR, 2016; SILVA, 2013). O Brasil é o quarto maior consumidor da produção mundial de fertilizantes e possui uma baixa produção interna, tornando o país dependente da importação de cerca 80% da demanda nacional de fertilizantes (BRASIL, 2020; PAVINATO, 2020). Considerando o elevado uso dos fertilizantes fosfatados, é importante salientar que as rochas fosfáticas são recursos finitos e são necessárias medidas para tornar o seu uso eficiente visto que há uma crescente demanda do P na agricultura (BRASIL, 2021).

### **2.3 Difusão e disponibilidade de P**

O P é considerado um elemento pouco móvel no solo, isso se dá a capacidade de se ligar covalentemente aos colóides do solo ou se precipitar com outros elementos, como Fe, Al e Ca (PEREIRA, 2009). A principal forma de absorção do P pelas raízes é através da difusão, que consiste no movimento de nutrientes a uma curta distância de uma região de maior concentração para uma de menor concentração (MENDES et al., 2015). Esse processo é fortemente interferido por diversos fatores, como a disponibilidade de água, distância até a raiz da planta, temperatura, quantidade de P, teor e tipo de argila do solo (COSTA et al., 2006). Principalmente o teor e o tipo de argila do solo são responsáveis por conferir diferentes fluxos difusivos, visto que um solo arenoso terá uma maior difusão quando comparado a um solo argiloso, devido ao menor teor de colóides para adsorção do P (BASTOS et al., 2008; COSTA et al., 2009). Um alto teor de água presente no solo também é responsável por conferir maior movimentação do P no solo, além disso, uma fonte de P de maior solubilidade em água também pode tornar o fluxo difusivo maior (COSTA et al., 2009). Segundo Costa et al. (2006), outros fatores, como a tortuosidade a ser percorrida, a redução do gradiente de concentração ao longo da distância e

o aumento da viscosidade da água próxima às partículas do solo, também têm um impacto na mobilidade do P, resultando em uma menor difusão.

Assim como a difusão, diversos fatores afetam a disponibilidade de P no solo, como o pH, matéria orgânica, microrganismos, níveis de P no solo, umidade e temperatura (MALAVOLTA, 1996; SIQUEIRA et al., 2004). O pH afeta a disponibilidade do P devido a composição em seus níveis, quando o pH está baixo há maiores teores de Al e quando alto há maiores teores de cálcio (Ca), portanto em ambos extremos é possível a perda de P por precipitação (MALAVOLTA, 1996). A matéria orgânica afeta a disponibilidade devido a competição dos ácidos orgânicos com os fosfatos pelos sítios de adsorção, tornando o P mais disponível quando há um teor mais elevado de matéria orgânica (PAVINATO, 2007). Os microrganismos também estão ligados a disponibilidade de P devido aos processos de mineralização da fração orgânica e de solubilização de formas inorgânicas de P (AGUIAR, 2020; SIQUEIRA et al., 2004). O teor de umidade do solo também é responsável pela disponibilidade devido ao fato do P precisar de um meio para ser dispersado em área (COSTA et al., 2009). Além disso, outro fator que afeta a disponibilidade é a temperatura, observado por Oliveira et al. (2014), que em altas temperaturas o P é menos disponível.

É de grande importância compreender o mecanismo de movimentação dos nutrientes no solo devido à sua relação direta com a absorção destes pelas plantas, visto que a disponibilidade está diretamente ligada ao seu movimento no solo, e quando se trata de P, o processo de movimentação é mínimo, o que dificulta o processo de absorção pelas plantas devido a sua baixa disponibilidade nas proximidades das raízes (BASTOS, 2008; NICCHIO, 2015).

## **2.4 Tecnologias para aumento da eficiência de P**

O uso de fertilizantes fosfatados é uma prática comum na agricultura para o fornecimento de P as culturas (CÉSAR, 2016; SILVA, 2013). O P é um dos nutrientes aplicados em maior quantidade no país, precedido apenas pelo potássio, o que justifica tamanho uso de fertilizantes fosfatados é a baixa eficiência de uso do P, geralmente inferior a 30% (BRASIL, 2021; LUZ & BRITO, 2022). No Brasil, estima-se que há um desperdício de cerca de 40% dos fertilizantes aplicados, isso se dá ao fato de baixos investimentos em tecnologia de produção e utilização, o que demonstra a importância de se buscar o aumento da eficiência e otimização do aproveitamento dos fertilizantes (BRASIL, 2020; 2021; WITHERS et al., 2018). Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a disponibilidade e a eficiência de

absorção de nutrientes pelas plantas tem se tornado uma área de grande interesse na pesquisa agrícola (CALABI-FLOODY et al., 2018).

Existem diversos caminhos para redução das perdas de P, como: a utilização de técnicas corretas no processo de amostragem e análises de solo, uso da agricultura de precisão e tecnologia de aplicação, correção e condicionamento do solo, uso de sistemas integrados de produção, práticas conservacionistas do solo, uso de cultivares vegetais mais eficazes no aproveitamento de P, uso de fertilizantes com tecnologias, utilização de ácidos orgânicos e bioestimulantes, entre diversas outras formas (GUELFY et al., 2022; NUNES et al., 2022; SERRANO et al., 2019).

No âmbito dos fertilizantes, existem diferentes inovações e tecnologias incluindo inibidores de fixação, quimicamente modificados, liberação controlada, sinérgicos, “*blends*” (“misturas”) e multi-funcionais (GUELFY et al., 2022). Os inibidores de fixação podem atuar modificando o pH e gerando cargas negativas na microrregião do grânulo, estes sequestram metais e cátions antagonicos, mas também podem bloquear os sítios de adsorção (GUELFY et al., 2022; HOPKINS et al., 2018). Os fertilizantes quimicamente modificados são os que passam por processos de reações físico-químicas na sua produção, estas que visam promover uma interação com outros compostos visando aumentar a solubilidade e melhorar o transporte de nutrientes (GUELFY et al., 2022; LU et al., 2022). Os fertilizantes de liberação controlada são fertilizantes convencionais que passam por um processo de revestimento visando reduzir a velocidade de liberação do P solúvel no interior do revestimento, tornando o P disponível a medida que a cultura necessita (GUELFY et al., 2022; WEEKS et al., 2019) Os fertilizantes sinérgicos são fertilizantes convencionais que passam pela adição de outros componentes (como: nutrientes, microrganismos, ácidos orgânicos, entre outros) visando o aumento da eficiência do P (GUELFY et al., 2022). Os “*blends*” (“misturas”) são fertilizantes obtidos através da mistura física entre fertilizantes convencionais e com tecnologias (GUELFY et al., 2022). Os multifuncionais são fertilizantes obtidos através da mistura de diferentes tecnologias em um mesmo grânulo de fertilizante (GUELFY et al., 2022).

Chagas et al. (2016) observou que o uso de polímeros que atuam como inibidores de fixação é capaz de reduzir as perdas de P na microrregião do grânulo, além de promover incrementos na biomassa de plantas de café, mas também existem trabalhos que alegam que alguns polímeros, como o ácido maleico-itacônico, não são capazes de promover tal incremento (CHIEN et al., 2014; CHIEN et al., 2016; DEGRYSE et al., 2013).

Dentre as tecnologias para fertilizantes, existe o AVAIL<sup>®</sup>, nome comercial do copolímero ácido maleico-itacônico, que atua como um inibidor de fixação, sequestrando cátions capazes de se ligar ao P e formar precipitados, assim o uso do copolímero pode aumentar a biodisponibilidade do P (DOYDORA et al., 2017). Além disso, o uso do copolímero também pode estar associado a aumentar o movimento de P no solo (HOPKINS et al., 2018). Alguns autores acreditam que uma baixa dose do produto não é capaz de proporcionar incrementos significativos que justifiquem o seu uso, como a dose recomendada pelo fabricante (CHIEN et al., 2014; 2016; DEGRYSE et al., 2013). No entanto, no estudo de Hopkins et al. (2018), foi observado que diversos trabalhos foram conduzidos em condições não responsivas, diante disso, observou-se a importância de se conduzir experimentos em condições de baixos teores de P no solo, pH extremos e a capacidade de adsorção do solo (DOYDORA et al., 2017; HOPKINS et al., 2018). Essas discussões demonstram que há a necessidade de novas pesquisas com o copolímero (HOPKINS et al., 2018).

Diante da necessidade de novas pesquisas com o AVAIL<sup>®</sup>, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade do copolímero em aumentar a difusão e a disponibilidade de P no solo em diferentes saturações por base, tal como a capacidade de reduzir perdas de P em solos com alta capacidade de adsorção, como os latossolos brasileiros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Preparo do solo

O solo utilizado no presente trabalho foi coletado em uma mata na Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde amostras deste foram enviadas ao Laboratório de Análises de Solo (DCS/UFLA) para realizar a análise química. Este se trata de um latossolo vermelho distrófico.

Diante da análise química (Tabela 2), o solo foi peneirado e corrigido para as saturações por base utilizadas no trabalho (V50 e V70), utilizando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ). Foram realizados os cálculos necessários para a correção do solo a partir do método de saturação por bases (RIBEIRO et al., 1999), considerando o uso de duas partes de carbonato de cálcio para uma parte de carbonato de magnésio. Para a correção da saturação por bases de 50% e 70% utilizou-se respectivamente 3,15g + 1,57g e 4,99g + 1,66g de  $\text{CaCO}_3$  +  $\text{MgCO}_3$  para a quantidade de solo de 5  $\text{dm}^3$ . Após a correção, o solo foi incubado por 45 dias com a umidade em capacidade de campo.

Tabela 1 - Análise de solo

pH	P K		Al	H+Al	Ca	Mg	SB	t	T	P-Rem	Cu Fe Mn Zn				V
	mg/dm <sup>3</sup>										cmolc/dm <sup>3</sup>				
4,6	0,09	4,56	0,54	7	0,08	0,06	0,15	0,68	7,14	11,56	0,27	10,3	0,56	0,53	2,1

\*pH em água - Relação 1:2,5; P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich<sup>-1</sup>; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; SB= Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva ; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V= Índice de Saturação de Bases; P-rem: Fósforo Remanescente; B- Extrator água quente; S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético. Fonte: Do autor (2023).

#### 3.2 Fertilizantes

Os fertilizantes fosfatados utilizados como fonte de estudo possuíram como matéria-prima o fosfato monoamônio (MAP). O MAP convencional foi tratado por um aditivo inibidor de fixação, comercialmente chamado de AVAIL<sup>®</sup> (copolímero ácido maleico-itacônico), aplicado aos grânulos em cinco concentrações distintas. Desta forma, após o tratamento o fertilizante MAP obteve-se os tratamentos (Tabela 1).

Para o preparo de cada fertilizante, este aditivo foi aplicado manualmente em cerca de 500g de MAP, visando o recobrimento total dos grânulos. Para o preparo dos tratamentos AV50, AV75, AV100, AV125 e AV150 foram utilizados 1,05 ml, 1,57 ml, 2,1 ml, 2,62ml,

3,15ml do aditivo considerando a dose recomendada de 4,2 L ton<sup>-1</sup> (Verdesian Life Sciences, 2018).

Tabela 2 - Tratamentos e doses

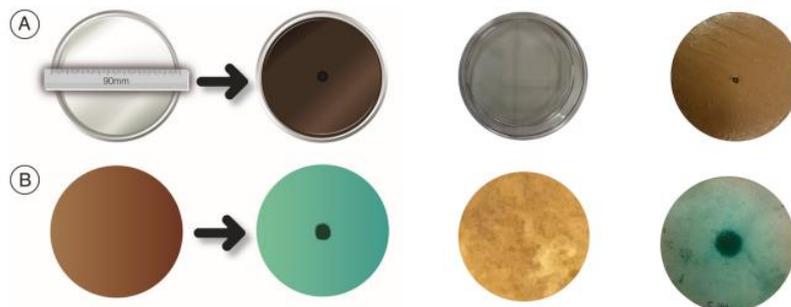
Identificação	Dose	Dose (ml)
AV50	50%	1,05
AV75	75%	1,57
AV100	100%	2,1
AV125	125%	2,62
AV150	150%	3,15
MAP	—	—

Fonte: Do autor (2023).

### 3.3 Difusão de P

O estudo da difusão de P dos fertilizantes fosfatados foi realizado através do método descrito por Degryse e McLaughlin (2014). Esta metodologia consiste em capturar o P difusível em papel filtro banhado com óxido de Fe (Figura 1). O experimento foi disposto em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 6 x 2, sendo cinco doses do AVAIL<sup>®</sup> para o MAP e um tratamento controle (MAP convencional), duas saturações por bases (V50 e V70), contendo 4 repetições, totalizando 48 parcelas.

Figura 1 – Metodologia para análise de difusão de P



Fonte: Nunes et al. (2022).

As placas de Petri foram preenchidas com solo e compactadas a uma densidade de 1,2 g cm<sup>-3</sup>, sendo em sequência umedecidas a 70% da capacidade de campo do solo utilizando-se água deionizada. Nestas foram realizados pequenos orifícios de cerca de 3 mm no centro de cada placa, onde grânulos dos fertilizantes (contendo cerca de 8,8 mg de P) foram depositados e em seguida fechados com solo. As placas de Petri foram fechadas, seladas e incubadas a 25°C.

As coletas foram realizadas em 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 240, 336 e 672 horas após a adição do fertilizante.

### 3.4 Análise de imagens

As imagens espelhadas da zona de difusão foram geradas após a digitalização do papel filtro mediante uso de software de imagem GIMP (GNU Image Manipulation Program) versão 2.10.34, para quantificar a extensão e a intensidade da zona de difusão.

### 3.5 Análise de disponibilidade de P

Ao final da última coleta de difusão, as placas de Petri foram abertas e três zonas concêntricas (com raios de 5, 25 e 45 mm) do solo contido na placa foram amostradas (Figura 2) para determinação de P disponível por extração Mehlich<sup>-1</sup> (MEHLICH, 1953) através do ICP-OES.

Figura 2 – Metodologia para análise de disponibilidade de P



Fonte: Nunes et al. (2022).

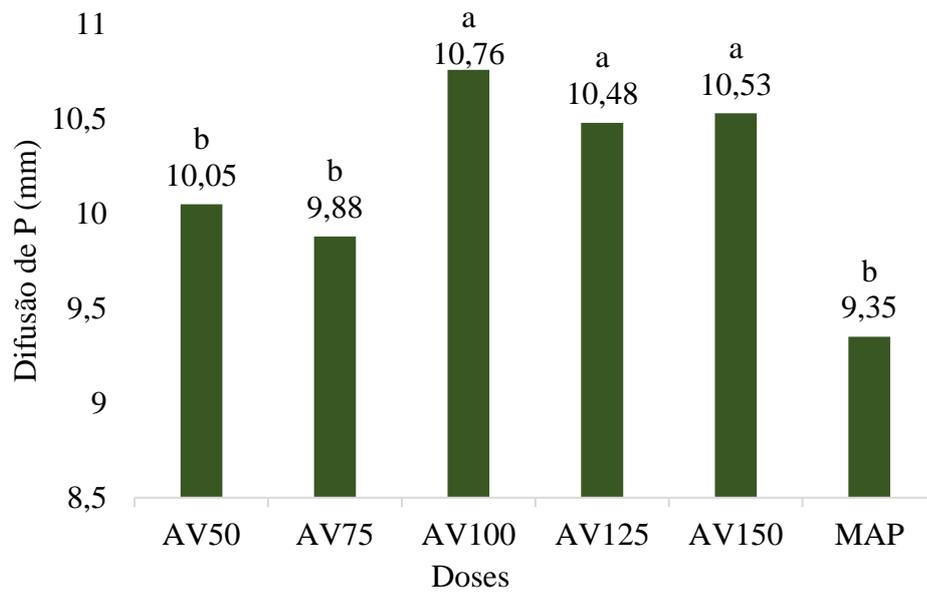
### 3.6 Análise estatística

Os resultados obtidos de difusão e disponibilidade de P foram analisados através da análise de variância (ANOVA) e comparados pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2011).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados submetidos a análise de variância apresentaram diferenças estatísticas significativas ( $p \leq 0,05$ ). Para difusão, observou-se que os tratamentos AV100, AV125 e AV150 obtiveram resultados superiores a AV50, AV75 e MAP, com médias respectivas de 10,76, 10,48, 10,53, 10,05, 9,88 e 9,35 mm (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Difusão de P (mm) em função das doses de copolímero AVAIL<sup>®</sup> utilizadas para tratamento do MAP



\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2023).

A difusão também foi observada em função do tempo de incubação, havendo diferença estatística significativa (Tabela 3). A difusão apresentou os maiores resultados observados na seguinte ordem decrescente: 1 hora = 6 horas > 24 horas = 120 horas = 48 horas = 3 horas = 72 horas = 12 horas = 96 horas = 144 horas > 240 horas = 168 horas.

Tabela 2 - Difusão de P (mm) após a incubação de grânulos de MAP tratados pelo copolímero AVAIL<sup>®</sup>

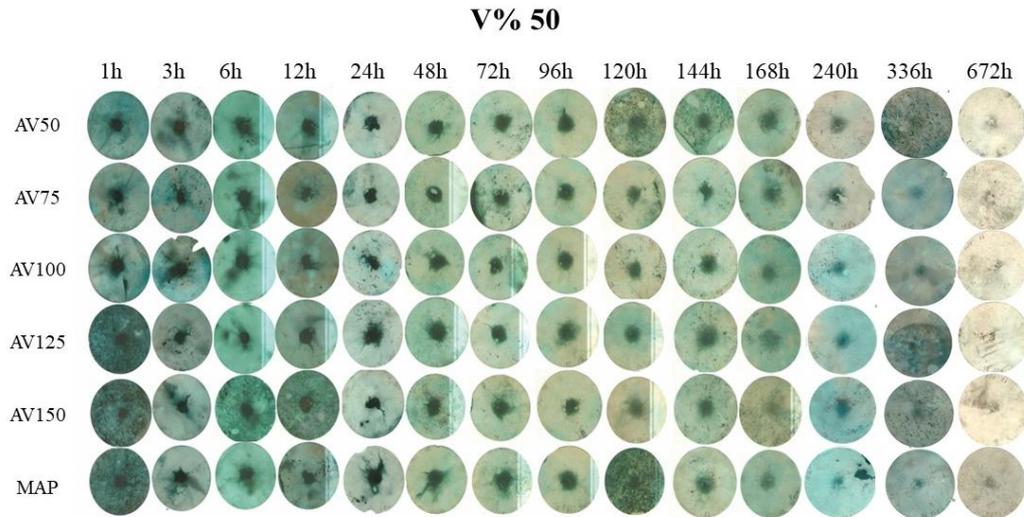
<b>Tempo após incubação (h)</b>	<b>Difusão de P(mm)</b>
1	12,71 <sup>a</sup>
3	10,89 <sup>b</sup>
6	11,74 <sup>a</sup>
12	10,40 <sup>b</sup>
24	11,31 <sup>b</sup>
48	10,90 <sup>b</sup>
72	10,43 <sup>b</sup>
96	10,12 <sup>b</sup>
120	11,10 <sup>b</sup>
144	9,81 <sup>b</sup>
168	6,21 <sup>c</sup>
240	6,49 <sup>c</sup>

\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )

Fonte: Do autor (2023).

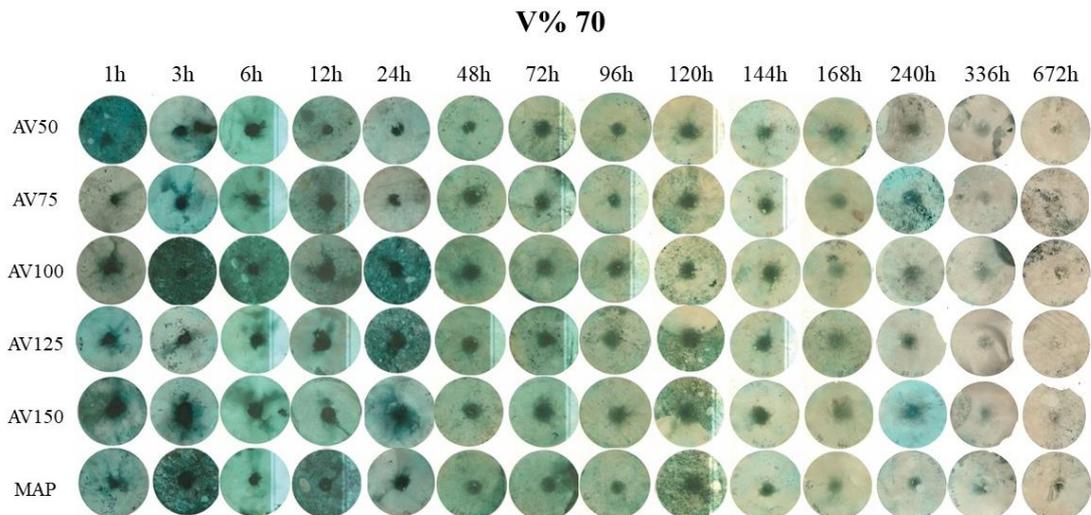
Podemos observar que em função de tempo, a difusão de P ocorreu mais rapidamente nas primeiras horas após a aplicação do fertilizante, o que pode ser justificado pela liberação de liberação de 95% do P disponível em até 24h nos fertilizantes solúveis (NUNES et al., 2022). No entanto, quando o P disponível entra em contato com os coloides do solo, este é adsorvido, o que possivelmente justifica a redução da difusão ao longo do tempo (RAIJ, 2011; TIECHER et al., 2012). Vale ressaltar que foram realizadas coletas de difusão com 336 e 672 horas após a aplicação do fertilizante (Figuras 3 e 4), no entanto, não foi possível capturar e quantificar a difusão destas coletas, visto que já havia ocorrido a liberação total do P, além da provável adsorção aos coloides do solo (NUNES et al., 2022; RAIJ, 2011).

Figura 3 - Difusão de P na saturação por bases de 50%



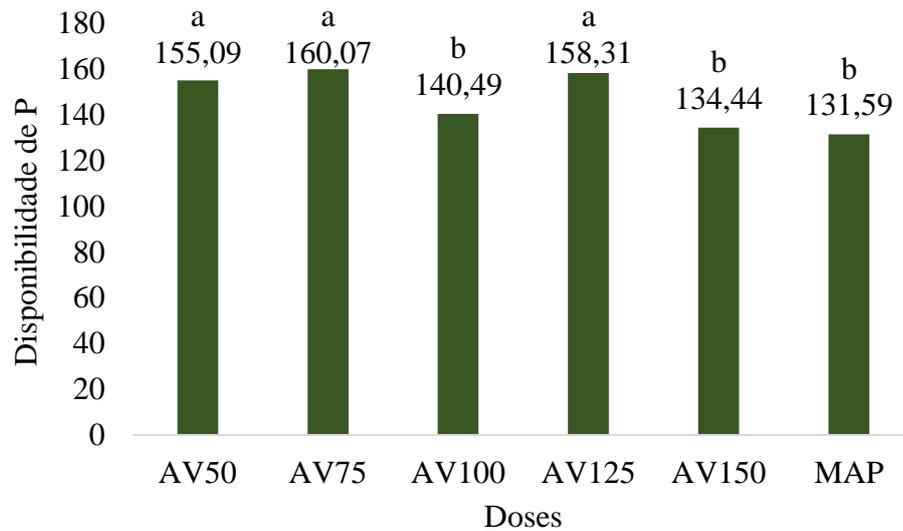
Fonte: Do autor (2023).

Figura 4 - Difusão de P na saturação por bases de 70%



Fonte: Do autor (2023).

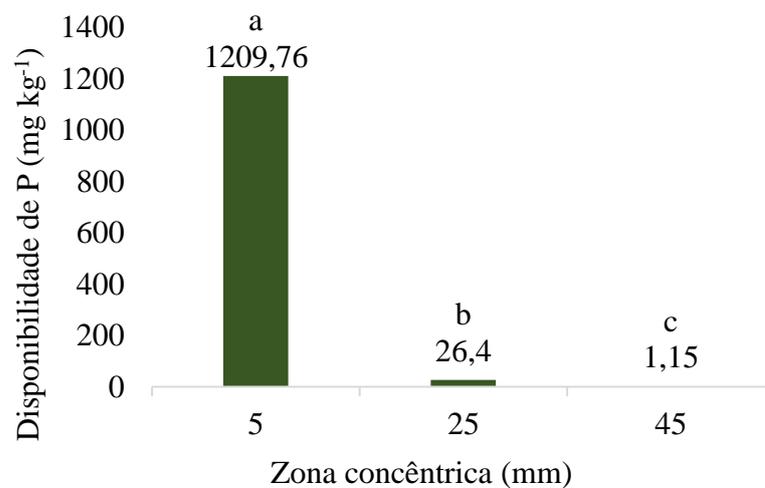
Se tratando de disponibilidade de P, os tratamentos AV50, AV75 e AV125 e apresentaram médias respectivas 155,09, 160,07 e 158,31 mg kg<sup>-1</sup> de P, que foram estatisticamente iguais entre si e superiores a AV100, AV150 e MAP, estes que apresentaram médias de 140,49, 134,44 e 131,59 mg kg<sup>-1</sup> de P (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Disponibilidade de P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em função de doses

\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2023).

Quanto aos locais de coleta nas placas de Petri, as zonas concêntricas apresentaram diferenças estatísticas significativas ( $p \leq 0,05$ ). As áreas coletadas de 5, 25 e 45 mm apresentaram, respectivamente, médias de 1.209,76, 26,40 e 1,15  $\text{mg kg}^{-1}$  de P. Portanto, a disponibilidade de P foi maior seguindo a sequência decrescente de: 5mm > 25mm > 45mm (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Disponibilidade de P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em função das zonas concêntricas

\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

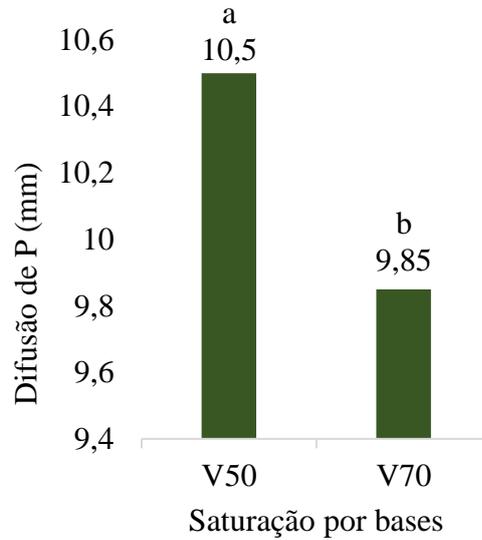
Fonte: Do autor (2023).

É possível observar que a maior disponibilidade de P ocorreu na zona concêntrica de 5 mm, sendo tal comportamento justificado pela limitada movimentação do P que ocorre principalmente via difusão. Além disso, essa região era correspondente ao local de aplicação do fertilizante, e conforme ocorre o distanciamento do local de aplicação, ocorre a diminuição da disponibilidade de P, como já observado em outros estudos (DEGRYSE & MCLAUGHLIN, 2014; NUNES et al, 2022; VOLF & RESOLEM, 2021). Na zona concêntrica de 5mm, onde o fertilizante foi aplicado, provavelmente parte do P disponível foi o suficiente para ocupar os sítios de adsorção, onde o P não difundido e não adsorvido se mantivesse e fizesse com que a disponibilidade de P fosse maior, diferentemente das zonas mais distantes da aplicação do fertilizante, onde possivelmente existiam sítios de adsorção não ocupados, fazendo com que o P difundido fosse adsorvido e não estivesse mais disponível (TEIXEIRA et al., 2016).

A partir das análises de difusão foi possível observar que o P atingiu a zona concêntrica de 45mm, no entanto, a análise de disponibilidade só foi realizada após a conclusão do tempo experimental e o processo de difusão do P é um processo de baixa movimentação, o que possibilita que o P tenha ficado tempo o suficiente em contato com o solo para ser adsorvido pelos coloides, fazendo com que esse não estivesse mais disponível ao fim do tempo experimental.

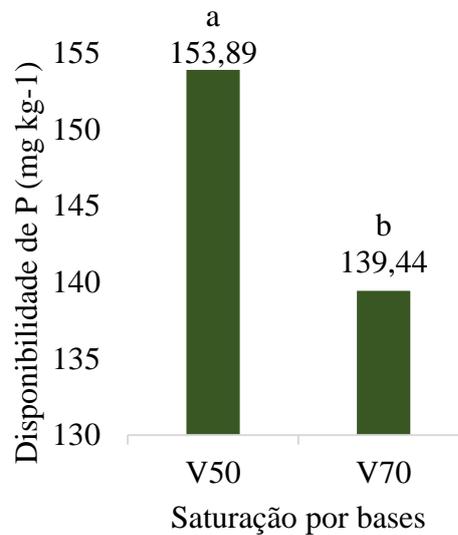
A difusão de P em função da saturação por bases foi maior para V50 apresentando uma média de 10,50, enquanto V70 apresentou uma média de 9,85 mm (Gráfico 4). A disponibilidade também foi maior para V50 com uma média de 153,89 mg kg<sup>-1</sup> de P, enquanto V70 apresentou 139,44 mg kg<sup>-1</sup> de P (Gráfico 5).

Gráfico 4 - Difusão de P (mm) em função das saturações por base



\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2023).

Gráfico 5 - Disponibilidade de P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em função das saturações por bases

\*Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2023).

Observou-se que nas doses AV50 e AV75 a difusão foi maior em V50. Nas doses AV100, AV125 e AV150 não houve diferença estatística entre as saturações. Segundo Chien et al. (2014), a dose recomendada pelo fabricante (AV100) não é o suficiente para promover incrementos significativos, o que justifica que as doses AV50 e AV75 não tenham proporcionado uma maior difusão em condições menos responsivas, visto que essas são doses menores do que as recomendadas pelo fabricante. Não há estudos na literatura que demonstrem

resultados semelhantes quanto a saturação por bases, no entanto, infere-se que em V70 teria uma condição adequada para a difusão e disponibilidade de P devido a correção do solo e do teor de Al (RIBEIRO et al., 1999), diferentemente de V50 que provavelmente ainda haveria algum teor de Al, fazendo com que a tecnologia do copolímero auxiliasse no processo de difusão e disponibilidade do P, assim as condições em V50 seriam mais responsivas ao modo de ação do copolímero.

Os fertilizantes tratados com o copolímero afetaram a difusão de P e disponibilidade de P em comparação ao fertilizante fosfatado convencional (MAP), assim pode-se observar que é relevante o uso deste copolímero no tratamento dos fertilizantes, visto que o AVAIL<sup>®</sup> se utilizado corretamente é eficiente no que o fabricante propõe (HOPKINS et al., 2018). O aumento na disponibilidade de P se deve provavelmente ao modo de ação do copolímero, fazendo com que ocorra uma menor formação de compostos insolúveis a partir da interação do P com metais antagônicos, tornando esse mais disponível no solo (DOYDORA et al, 2017).

## 5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que os fertilizantes tratados com o copolímero AVAIL<sup>®</sup> apresentaram maior potencial de difusão e disponibilidade de P em comparação ao MAP convencional, provavelmente devido ao modo de ação do copolímero, que reduz a interação com metais e cátions antagônicos, consequentemente reduzindo a formação de precipitados insolúveis. Foi possível observar que o tratamento AV125 apresentou melhores resultados em aumentar a difusão e a disponibilidade do P. No entanto, vale ressaltar que há um grande déficit de informações do aditivo na literatura, o que demonstra a importância de novas pesquisas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, Dione. **Mecanismos microbiológicos de solubilização (Hidroxiapatita) e dessorção (Goethita) de fósforo**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de latossolos ácidos. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 3, p. 416–421, 1995.
- AUGUSTO, D. et al. Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 2017.
- BASTOS, A. L. et al. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 136–142, 2008.
- BRASIL, 2020. **Produção nacional de fertilizantes: Estudos estratégicos**. Secretaria especial de assuntos Estratégicos 26.
- BRASIL, 2021. **Plano nacional de fertilizantes: Estudo estratégico**. Secretaria especial de assuntos estratégicos 1, 195.
- BUCHER, C. A. et al. Fósforo. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 401–419.
- CALABI-FLOODY, M. et al. Smart Fertilizers as a Strategy for Sustainable Agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 147, p. 119–157, 2018.
- CÉSAR, Fábio Ricardo Coutinho Fontes. **Eficiência agrônômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2016.
- CHAGAS, W. F. T. de et al. Eficiência agrônômica do superfosfato triplo revestido por polímeros no crescimento inicial do cafeeiro. **Coffee Science**, 11:426-434, 2016.
- CHIEN, S. et al. Review of Maleic–Itaconic Acid Copolymer Purported as Urease Inhibitor and Phosphorus Enhancer in Soils. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 423–430, 2014.
- CHIEN, S.; REHM, G. Theoretical equilibrium considerations explain the failure of the maleic-itaconic copolymer to increase efficiency of fertiliser phosphorus applied to soils. **Soil Research**, v. 54, n. 1, p. 120–120, 2016.
- COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, 2006.
- COSTA, J. P. V. DA et al. Difusão de fósforo em solos de alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, 2009.
- CURI, N. et al. **Mapeamento de solos, aptidão agrícola e taxa de adequação do uso das terras do município de Lavras (MG)**. Lavras: Editora UFLA, 2020.

DEGRYSE, F. et al. Sequestration of Phosphorus-Binding Cations by Complexing Compounds is not a Viable Mechanism to Increase Phosphorus Efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 2050–2059, 2013.

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 832–842, 2014.

DOYDORA, S.; HESTERBERG, D.; KLYSUBUN, W. Phosphate Solubilization from Poorly Crystalline Iron and Aluminum Hydroxides by AVAIL® Copolymer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 1, p. 20–28, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Brasília: EMBRAPA, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: EMBRAPA Produção De Informação, 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FINK, J. R. et al. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 369–379, 2016.

GATIBONI, L. et al. Editorial: Legacy Phosphorus in Agriculture: Role of Past Management and Perspectives for the Future. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, 2020.

GUELFY, D. et al. Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14266, 2022.

GUELFY, D. R. et al. Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 2018.

HOPKINS, B. G. et al. AVAIL® Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 1, p. 389–398, 2018.

LOPES, A.; GUIMARÃES, R. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Elsevier eBooks**, v. 137, p. 1–72, 2016.

LU, J. et al. Application of lignin in preparation of slow-release fertilizer: Current status and future perspectives. **Industrial Crops and Products**, v. 176, p. 114267, 2022.

LUZ, J. H. S. DA; BRITO, L. E. M. A eficiência do uso de fósforo pode ser melhorada com o uso de substâncias húmicas? Uma revisão. **AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES**, v. 8, n. 2, p. 13, 2022.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronomica Ceres Ltda, 2006.

MALAVOLTA, E. Fósforo Na Planta e Interação Com Outros Elementos. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S (Ed.). **Fósforo Na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira Para Pesquisa Da Potassa E Do Fosfato. 2004. 20p.

- MALAVOLTA, E. Nutrifatos. *Arquivo do agrônomo*, Piracicaba, n. 10, p. 1-24, 1996.
- MEHLICH, A., 1953. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina soil testing laboratories. University of North Carolina, Raleigh.
- MENDES, R. M. S.; LUCENA, E. M. P.; MEDEIROS, J. B. L. P. **Princípios de Fisiologia Vegetal**. 2. ed. Fortaleza: EdUECE, 2015.
- MOHAMMADI, K. 2012. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **Resources And Environment**, v. 2, 80–85.
- NICCHIO, Bruno. **Agricultural efficacy of alternative phosphorus sources**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo, 2007. p. 472–500.
- NUNES, A. P. P.; SANTOS, C. F.; GUELFI, D. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 2022.
- OLIVEIRA, L. B. et al. Formas de fósforo no solo sob pastagens naturais submetidas à adição de fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 867–878, 2014.
- PANTANO, G. et al. SUSTAINABILITY IN PHOSPHORUS USE: A QUESTION OF WATER AND FOOD SECURITY. **Química Nova**, v. 39, n. 6, 2016.
- PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. **Advances in Agronomy**, v. 30, p. 1–50, 1979.
- PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. 2007. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.
- PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15615, 2020.
- PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. K. S. DA; CARVALHO, L. B. DE. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 5, n. 2021, 2021.
- PEREIRA, H. S. Fósforo e potássio exigem manejos diferenciados. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 9, p. 43-46, 2009.
- POIRIER, Y.; BUCHER, M. Phosphate Transport and Homeostasis in Arabidopsis. **The Arabidopsis Book**, v. 1, p. 0–24, 2002.
- RHEINHEIMER, D. DOS S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 151–160, 2001.
- SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.), **The role of phosphorus in agriculture**. American Society Of Agronomy, Crop Science Society Of America, Soil Science Society Of America, Wisconsin, 1980, p. 263–310.

SILVA, Rodrigo Coqui da. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 2013. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2013.

SIQUEIRA, J. O.; ANDRADE, A. T.; FAQUIN, V. O papel dos microrganismos na disponibilidade de fósforo da rizosfera para as plantas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S (Ed.). **Fósforo Na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, SP: Associação Brasileira Para Pesquisa Da Potassa E Do Fosfato. 2004. 20p.

TEIXEIRA, R. DA S. et al. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 16, n. 4, 2016.

TIECHER, T.; DOS SANTOS, D. R.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 57–67, 2012.

VERDESIAN LIFE SCIENCES. **AVAIL® T5 - Phosphorus Fertilizer Enhancer**. Disponível em: <https://vlsci.com/products/AVAIL-t5/>. Acesso em: 8 jul. 2023.

WEEKS, J. J.; HETTIARACHCHI, G. M. A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology: Possibilities and Pragmatism. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 5, p. 1300–1313, 2019.

WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018.