

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FELIPE CUNHA SIMAN

**FOSFATO MONOAMÔNICO COM TECNOLOGIA ASSOCIADA: UMIDADE,
TEMPERATURA, ÉPOCA DE APLICAÇÃO E TEMPO DE CONTATO**

ALEGRE - ES

2023

FELIPE CUNHA SIMAN

**FOSFATO MONOAMÔNICO COM TECNOLOGIA ASSOCIADA: UMIDADE,
TEMPERATURA, ÉPOCA DE APLICAÇÃO E TEMPO DE CONTATO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia na área de concentração de Solo e Água e Interação com Plantas.

Orientador: Professor Dr. Felipe Vaz Andrade

ALEGRE – ES

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C972f Cunha Siman, Felipe, 1990-
Fosfato Monoamônico com Tecnologia Associada: Umidade,
Temperatura, Época de Aplicação e Tempo de Contato / Felipe
Cunha Siman. - 2023.
121 f. : il.

Orientador: Felipe Vaz Andrade.
Coorientador: Danilo de Lima Camêlo.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. fertilizante. 2. fósforo. 3. tecnologia. 4. adsorção. 5. solo. 6.
fertilidade. I. Vaz Andrade, Felipe. II. de Lima Camêlo, Danilo.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

FELIPE CUNHA SIMAN

**FOSFATO MONOAMÔNICO COM TECNOLOGIA ASSOCIADA: UMIDADE,
TEMPERATURA, ÉPOCA DE APLICAÇÃO E TEMPO DE CONTATO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia na área de concentração de Solo e Água e Interação com Plantas.

Aprovada em 15 de fevereiro de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. André Guarçoni Martins
Instituto Capixaba de Pesquisa,
Assistência Técnica e Extensão Rural

Prof. Dr. Carlos Henrique Eiterer de Souza
Centro Universitário de Patos de Minas

Prof. Dr. Edson Márcio Mattiello
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Felipe Vaz Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Aos meus queridos pais, Elaine e Carlos.
Ao meu irmão Fernando.
Aos familiares e amigos que me acompanharam nessa jornada
Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida e por estar presente todos os dias, guiando, protegendo, cuidando, direcionando caminhos e dando forças para vencer as batalhas. Só Deus a todos incondicionalmente e entende as nossas necessidades mais profundas. A Ele que sempre me ouviu e entendeu, minha gratidão.

Aos meus pais, Elaine e Carlos, e ao meu irmão Fernando, que pelo amor, exemplo de fé e superação, conduta digna na vida, por me mostrarem desde novo a importância do estudo, acreditarem e apostarem nos meus sonhos, minha sincera gratidão.

Difícil é agradecer a todos os envolvidos em uma jornada como esta. Há aqueles que ajudaram, consolaram, apoiaram e tantos outros serviram de inspiração.

Agradeço ao meu orientador, prof. Felipe Vaz Andrade pela amizade e por me conduzir no caminho do conhecimento ao longo dos 6,5 anos entre mestrado e doutorado. Minha eterna gratidão!

Agradeço aos amigos que fizeram parte da minha saga diária no processo de doutoramento, com destaque para o Caio, Ronaldo, Samuel, Maria Amélia e João Paulo, que acompanharam todas as fases até minha defesa.

Agradeço também aos amigos do laboratório de solos da Universidade Federal do Espírito Santo, que dentre eles, posso citar: Yago, Felipe Valadares, Maranhão, Hugo, Marcos, Raphael.

Agradeço aos meus tios, primos e avós in memoriam, por entenderem as minhas faltas e sempre me motivarem.

Agradeço aos membros da minha banca de defesa de tese, os professores André Guarçoni, Edson Mattiello, Renato Passos e Carlos Eiterer.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realizar o Doutorado. À CAPES, pelo apoio financeiro e concessão da bolsa.

A todos, o meu muito obrigado!

**FOSFATO MONOAMÔNICO COM TECNOLOGIA ASSOCIADA: UMIDADE,
TEMPERATURA, ÉPOCA DE APLICAÇÃO E TEMPO DE CONTATO**

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	viii
GENERAL ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA	
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4. CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO 2: CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM NA EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA	
RESUMO	26
ABSTRACT	27
1. INTRODUÇÃO.....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	44
CAPÍTULO 3: CAPACIDADES DE FORNECIMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS PREVIAMENTE ADUBADOS UTILIZANDO FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA	
RESUMO	49
ABSTRACT	50
1. INTRODUÇÃO.....	51
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4. CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS	64

CAPÍTULO 4: UMIDADE NA DISPONIBILIZAÇÃO DE P EM FERTILIZANTES COM TECNOLOGIA ASSOCIADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA *Zea mays* L

RESUMO	67
ABSTRACT	68
1. INTRODUÇÃO.....	69
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS	82
CAPÍTULO 5: UMIDADE DO SOLO NA DISPONIBILIZAÇÃO DE P EM FERTILIZANTES COM TECNOLOGIA ASSOCIADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE <i>Coffea canephora</i>	
RESUMO	85
ABSTRACT	86
1. INTRODUÇÃO.....	87
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	88
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4. CONCLUSÃO.....	101
REFERÊNCIAS	102
CAPÍTULO 6: FRACIONAMENTO DE P APÓS SUCESSIVAS ADUBAÇÕES COM FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA EM LAVOURA DE CAFÉ	
RESUMO	105
ABSTRACT	106
1. INTRODUÇÃO.....	107
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	108
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
4. CONCLUSÃO.....	118
REFERÊNCIAS	119

RESUMO GERAL

SIMAN, Felipe Cunha, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Fevereiro de 2023. **Fosfato Monoamônico com Tecnologia Associada: Umidade, Temperatura, Época de Aplicação e Tempo de Contato.** Orientador: Professor Dr. Felipe Vaz Andrade. Coorientador: Professor Dr. Danilo de Lima Camêlo.

A predominância de solos com acentuado grau de intemperismo e altos teores de óxidos de Fe e Al resultam em baixa disponibilidade de nutrientes e alta capacidade de adsorção de fósforo (P). Nesses solos, a competição solo-planta pelo P adicionado via adubação é elevada, o que reduz a eficiência, assim como o efeito residual para cultivos sucessivos. Nesse contexto, a utilização de fertilizantes com tecnologia associada pode ser uma alternativa para reduzir a intensidade de adsorção de P e aumentar a disponibilidade para as plantas, aumentando a absorção e posterior resposta da cultura. Objetivou-se com este trabalho avaliar a dinâmica de P a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada. No primeiro capítulo o intuito foi fazer a caracterização das fontes fosfatadas, convencional e com tecnologias associadas, identificando o comportamento termogravimétrico, as principais fases cristalinas de ocorrência nos fertilizantes e o teor de P e C. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar a os teores de P no solo ao longo do tempo a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada sob variação de temperatura, diferentes conteúdos volumétricos de água no solo e ao longo dos períodos de avaliação. Com este experimento concluiu-se que os fertilizantes com tecnologia associada alteraram a disponibilidade de P se comparado à fonte convencional em conteúdo volumétrico de água mais baixo (60 % CC) e podem ser usados de forma combinada para atender a demanda das culturas a curto e longo prazo. O terceiro capítulo teve como objetivo avaliar o teor de P no solo extraído por água e Mehlich-1, massa de matéria seca da parte aérea e área foliar na cultura do milho após incubação do solo com as fontes fosfatadas com tecnologia associada ao longo de 150 dias e por dois cultivos sucessivos. Como resultado foi observado que os fertilizantes com tecnologia associada foram superiores à fonte solúvel para o teor de P em água e Mehlich-1 e para o desenvolvimento inicial da cultura do milho no segundo ciclo de cultivo. O capítulo 4 foi um experimento realizado em casa de vegetação e teve o intuito avaliar o desenvolvimento inicial do cafeeiro a partir a utilização de fonte fosfatada convencional (monoamônio fosfato) e com tecnologias associadas aplicadas em solo de textura argilosa com três conteúdos volumétricos de água. Os resultados indicaram que a maior eficiência das tecnologias associadas ocorreu nos conteúdos volumétricos de água mais baixos, em geral 60 e 70 % da capacidade de campo (CC), evidenciando sua eficiência para condições de estresse hídrico ou baixo conteúdo de água no solo. O capítulo 5 teve o objetivo de avaliar o desenvolvimento inicial da cultura do milho sob aplicação de fonte fosfatada convencional associado ao uso de tecnologias associadas submetido a três conteúdos volumétricos de água e em três cultivos sucessivos. Observou-se que os fertilizantes com revestimento foram mais eficientes em relação à fonte convencional para todas as variáveis, nos três ciclos de cultivo e em conteúdos volumétricos de água mais baixos, o que indica potencial uso em condições de campo para cultivos não irrigados. Por fim, o capítulo 6 teve objetivo avaliar os efeitos de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada e a disponibilidade de fósforo no solo após cultivos sucessivos do cafeeiro. Concluiu-se que o principal efeito dos fertilizantes com tecnologia associada ocorreu na fração lábil do solo, moderadamente lábeis e de labilidade restrita.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

GENERAL ABSTRACT

SIMAN, Felipe Cunha, Center for Agricultural Sciences and Engineering of the Federal University of Espírito Santo, January 2023. **Monoammonium Phosphate with Associated Technology: Humidity, Temperature, Time of Application and Contact Time.** Advisor: Professor Doctor Felipe Vaz Andrade. Co-supervisor: Professor Doctor Danilo de Lima Camêlo.

The predominance of soils with a marked degree of weathering and high levels of Fe and Al oxides result in low nutrient availability and high phosphorus (P) adsorption capacity. In these soils, soil-plant competition for P added via fertilization is high, which reduces efficiency, as well as the residual effect for successive crops. In this context, the use of fertilizers with associated technology can be an alternative to reduce the intensity of P adsorption and increase availability to plants, increasing absorption and subsequent crop response. The objective of this work was to evaluate the dynamics of P from the application of phosphate fertilizers with associated technology. In the first chapter, the aim was to characterize the conventional phosphate source and associated technologies, identifying the thermogravimetric behavior, the main crystalline phases occurring in fertilizers and the P and C content. The second chapter aimed to evaluate the P levels in the soil over time from the application of phosphate fertilizers with associated technology under temperature variation, different volumetric soil water contents and over the evaluation periods. With this experiment, it was concluded that fertilizers with associated technology altered the availability of P compared to the conventional source in lower volumetric water content (60 % CC) and can be used in combination to supply crop demand in the short and long term. The third chapter aimed to evaluate the P content in the soil extracted by water and Mehlich-1, dry matter mass of the aerial part and leaf area in the corn crop after incubation of the soil with phosphate sources with associated technology over 150 days and by two successive cultivations. As a result, it was observed that fertilizers with associated technology were superior to the soluble source for the P content in water and Mehlich-1 and for the initial development of the corn crop in the second cropping cycle. Chapter 4 was an experiment conducted in a greenhouse and aimed to evaluate the initial development of the coffee tree from the use of a conventional phosphate source (monoammonium phosphate) and with associated technologies applied in clayey soil with three volumetric water contents. The results indicated that the highest efficiency of the associated technologies occurred in the lowest volumetric water contents, in general 60 and 70 % of the field capacity (CC), evidencing its efficiency for water stress conditions or low water content in the soil. Chapter 5 aimed to evaluate the initial development of the corn crop under the application of a conventional phosphate source associated with the use of technologies subjected to three volumetric water contents and in three successive crops. In general, it was observed that the coated fertilizers were more efficient compared to the conventional source for all variables and in the three crop cycles and at lower volumetric water contents, which indicates potential use in field conditions for crops not irrigated. Finally, chapter 6 aimed to evaluate the effects of phosphate fertilizers with associated technology and the availability of phosphorus in the soil after successive coffee crops. It was concluded that the main effect of fertilizers with associated technology occurred in the labile fraction of the soil, but an increase in P levels was also observed in the moderately labile and restricted labile fractions.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus

INTRODUÇÃO GERAL

O P é o segundo nutriente mais utilizado na agricultura e a sua extração prové atividades minerárias em rochas (Troeh & Thompson, 2007). A maior parte do P em solos altamente intemperizados está adsorvida na fase mineral (Teixeira et al., 2016) e por isso, os mesmos apresentam geralmente baixo teor disponível. Novais & Smyth (1999) consideram a baixa disponibilidade de P nos solos um dos fatores mais limitantes na produtividade das culturas de regiões tropicais.

A adsorção de P nos solos é majorada à medida em que se aumenta os teores de óxidos de Fe e Al, em que ocorre a interação do nutriente com sítios específicos de adsorção dos óxidos (Liu et al., 2018), causando baixa eficiência de uso de P e baixos valores residuais das fertilizações (Li et al., 2020). A precipitação de P, fenômeno que também deprime a concentração do nutriente, ocorre na solução do solo com formas iônicas de Fe, Al e Ca, formando um novo composto de baixa solubilidade (Novais & Smyth, 1999). Os fenômenos de adsorção e/ou precipitação, atuam de maneira conjunta, e são os principais fatores que causam baixa eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais (Chien et al., 2011).

Além da mineralogia da fração argila, outros fatores também influenciam a disponibilidade de P, com destaque para umidade do solo, temperatura do solo, tempo de contato, fonte fertilizante utilizada, forma de aplicação e utilização de mecanismos de controle de solubilidade nas fontes fosfatadas (McLaughlin et al., 2011; Li et al., 2020; Lustosa Filho et al., 2020).

O conteúdo volumétrico de água influencia diretamente na disponibilidade de P no solo. Este fato ocorre, pois, o principal mecanismo de transporte do fósforo no solo é a difusão, sendo esta não somente influenciada pela umidade, mas também pela interação P-coloide, distância a percorrer até as raízes, teor do elemento, textura e temperatura do solo (Costa et al., 2006).

A fonte de fertilizante fosfatado utilizada também influencia na disponibilidade de P, pois, está relacionada à cinética de liberação deste nutriente no solo. A velocidade de liberação é dependente das características de solubilidade da fonte fertilizante utilizada e o fornecimento do P dependerá da reatividade do fosfato e da capacidade de retenção de P pelo solo. De maneira geral, pode-se dizer que quanto maior o tempo de contato do fertilizante com o solo, as ligações, inicialmente formadas por complexos monodentados

entre o íon fosfato e a superfície dos minerais se convertem em formas menos disponíveis no solo pelo processo de adsorção (Liu et al., 2018).

Os monoamônio e diamônio fosfatos são comumente os fertilizantes fosfatados mais utilizados e por serem fontes solúveis, possuem maior velocidade de liberação de P para a solução do solo em relação a outras fontes, como os fosfatos naturais reativos. Porém, essa elevação de concentração no meio aumenta o tempo de contato do P com os colóides do solo, reduzindo a disponibilidade desse nutriente (Li et al., 2020).

Atualmente, vem-se buscando alternativas tecnológicas para aumentar a eficiência da adubação fosfatada, como o recobrimento do grânulo de fertilizante solúvel com polímeros ou biochars ou adição de material orgânico, como torta de filtro (Borges et al., 2019; Li et al., 2020; Lustosa Filho et al., 2020).

A eficiência das tecnologias associadas à fonte solúvel consiste na alteração da cinética de liberação de nutriente, de forma a favorecer sua liberação em condições de solo que permitam o seu transporte, e na minimização das reações entre o nutriente e os componentes do solo que circundam os grânulos. Porém, cada uma das tecnologias associadas possui particularidades em seu funcionamento.

O revestimento com polímeros pode alterar a cinética de liberação de P no solo, liberando o nutriente em conteúdos volumétricos de água mais elevados. Esse resultado é alcançado, pois o revestimento limita o contato do P com a água, tornando sua solubilização mais lenta. Para que ocorra a liberação do nutriente, a água precisa penetrar as microfissuras do revestimento, aumentar a pressão osmótica do interior do grânulo, que por sua vez aumenta o tamanho das microfissuras e possibilita a difusão do fertilizante para o solo (Tomaszewska et al., 2001).

Por alterar a cinética de liberação de P, também ocorre redução do tempo de contato do P com óxidos de Fe e Al, favorecendo a liberação por um período maior de tempo, ficando mais disponível às plantas e com maior possibilidade de ser absorvido (Gazola et al., 2013).

No caso dos fertilizantes organominerais, seja através do revestimento com biochar ou adição de torta de filtro, existe aumento de cargas negativas proporcionado pelo acréscimo de matéria orgânica, que tem fundamental importância na dinâmica de P, pois reduz a adsorção deste elemento no solo e permite sua maior disponibilidade para as plantas (Li et al., 2020).

Isso ocorre, pois, o P é capaz de formar complexos com a matéria orgânica (fósforo-metal-húmicos), podendo ser dissolvidos por ácidos orgânicos, tendo assim grande

relevância na disponibilidade do fósforo presente na solução do solo (Gerke, 2010). A matéria orgânica adicionada também é capaz de revestir os óxidos de Fe e Al, formando uma cobertura protetora, e os ácidos orgânicos liberados competem pelos sítios de adsorção de P nos óxidos, reduzindo a intensidade de adsorção e aumentando a disponibilidade às plantas (Fernandes et al., 2015).

Pesquisas recentes buscam alternativas que controlam a liberação de P na solução do solo e reduzam o tempo de contato com os argilominerais, visando minimizar a intensidade de adsorção de fosfato e minorar a competição solo-planta por este nutriente, tornando-o mais disponível. Tem-se buscado também o entendimento de como a utilização das tecnologias associadas a fertilizantes fosfatados solúveis se relacionam com os fatores temperatura, umidade e tempo de contato com o solo e como essa dinâmica afeta a liberação de nutrientes dos fertilizantes. Porém, a eficiência de um fertilizante fosfatado não é facilmente determinada, pois os atributos do solo, as características do material utilizado e a cultura também interferem nos resultados, tornando-se imprescindível os ensaios com solo e planta.

Posto isso, trabalhou-se com a hipótese de que os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada comparados ao fertilizante convencional proporcionam maior disponibilidade de P para as plantas em função do conteúdo volumétrico de água no solo, dos ciclos de umedecimento e secagem e do tempo de contato com o solo.

Nesse sentido, objetivou-se avaliar a dinâmica de P, no sistema solo-planta, a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada. Para tal, foram realizados experimentos em condições de laboratório, casa de vegetação e campo. Os experimentos foram divididos para serem apresentados nesta tese em formato de capítulos, intitulados:

- (1) Caracterização dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada;
- (2) Ciclos de umedecimento e secagem na eficiência de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada;
- (3) Capacidades de fornecimento de fósforo em solos previamente adubados utilizando fertilizantes fosfatados com tecnologia associada;
- (4) Umidade na disponibilização de P em fertilizantes com tecnologia associada no desenvolvimento inicial de *Coffea canephora*;
- (5) Umidade do solo na disponibilização de P em fertilizantes com tecnologia associada no desenvolvimento inicial da *Zea mays* L.;
- (6) Fracionamento de P após sucessivas adubações com fertilizantes fosfatados com tecnologia associada em lavoura de café.

REFERÊNCIAS

- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- CHIEN, S. H., PROCHNOW, L. I., TU, S., & SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89:229-255, 2011.
- COSTA, J. P. da, BARROS, N. F. D., ALBUQUERQUE, A. W. D., MOURA FILHO, G., & SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10:828-835, 2006.
- FERNANDES, D. M., GROHSKOPF, M. A., GOMES, E. R., FERREIRA, N. R., & BULL, L. T. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. Edição Especial 20 anos Irriga + 50 anos FCA. *Irriga*, 1:14-27, 2015.
- GAZOLA, R.N., BUZZETTI, S., DINALLI, R. P., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., & DE SOUZA CELESTRINO, T. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60:876-884, 2013.
- GERKE, J. Humic (organic matter)-Al (Fe)-phosphate complexes: an underestimated phosphate form in soils and source of plant-available phosphate. *Soil Science*, 175:417-425, 2010.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LIU, Y., ZHU, Z. Q., HE, X. S., YANG, C., DU, Y. Q., HUANG, Y. D., ... & XUE, Y. J. Mechanisms of rice straw biochar effects on phosphorus sorption characteristics of acid upland red soils. *Chemosphere*, 207:267-277, 2018.,
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of The Total Environment*, 709:136028, 2020.
- MCLAUGHLIN, M. J., MCBEATH, T. M., SMERNIK, R., STACEY, S. P., AJIBOYE, B., & GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant and Soil*, 349: 69-87, 2011.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 471-550, 2007.
- TEIXEIRA, R. D. S., RIBEIRO DA SILVA, I., NOGUEIRA DE SOUSA, R., MÁRCIO MATTIELLO, E., & BARROS SOARES, E. M. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16:1097-1112, 2016.

TOMASZEWSKA, M., JARPSOEWICZ, A., & KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*, 146:319-323, 2002.

TROEH, R. F.; THOMPSON, L. M. *Solos e fertilidade do solo*, São Paulo, 2007. 314p.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA

RESUMO

Os solos de regiões tropicais são tipicamente ácidos, com baixa saturação por bases e ricos em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), como resultado do intemperismo. O teor de fósforo (P) nesses solos é frequentemente baixo, devido às interações com as argilas oxídicas, ocasionando em baixa disponibilidade natural deste elemento. Nesse contexto, surgem os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada, que visam alterar a cinética de liberação de P, liberando o nutriente em condições mais propícias de ser absorvido, melhor atendendo às demandas nutricionais das culturas. Essas tecnologias associadas consistem no revestimento de uma fonte solúvel com polímeros ou biochar ou adição de material orgânico, como a torta de filtro. Posto isso, este trabalho teve como objetivo identificar as principais fases cristalinas de ocorrência nos fertilizantes, analisar a variação de massa das fontes fertilizantes em função da temperatura e determinar o teor de C nos fertilizantes organominerais. Foram utilizados como fertilizantes o fosfato monoamônio (MAP), o MAP revestido com polímero (MAPPOL), o MAP revestido com biochar (MAPBIO) e o MAP com adição de torta de filtro (MAPTF). As fontes fosfatadas foram submetidas à análise termogravimétrica, difratometria de raios-x (DRX) e determinação do teor de C e P₂O₅. Como resultado observou-se que o comportamento de perda de massa entre as tecnologias associadas é diferenciado em função da temperatura, e essas diferenças podem ser atribuídas à composição de cada material utilizado, sendo o maior pico de perda de massa observado pelo MAPPOL, com perda de 19 % entre as temperaturas de 176 a 181 °C. Pode-se perceber também que o comportamento de perda de massa em função da temperatura é mais suave para a fonte convencional e o MAPTF em relação aos fertilizantes revestidos, sejam eles, MAPPOL e MAPBIO. As análises por DRX do MAP mostraram 87,7 % de bifosfamita pelos picos principais 5,32; 3,74; 3,07; 2,00; 2,65 nm e 12,3 % de nitratina pelos picos principais 3,03; 2,31 nm. A adição de tecnologia associada ao MAP apresentou influência na intensidade dos picos, fato que ocorre devido à incorporação de componentes não identificáveis pelo DRX e que resultam na diminuição da concentração de bifosfamita e nitratina no fertilizante. Os menores picos de bifosfamita e nitratina foram observados pelo MAPTF devido à menor proporção de MAP em relação às demais tecnologias associadas. Os fertilizantes MAPPOL e MAPBIO apresentam picos semelhantes devido às concentrações de bifosfamita e nitratina serem mais próximas. Conclui-se que a adição de tecnologia associada ao MAP altera o comportamento termogravimétrico dos fertilizantes e a intensidade dos picos do DRX, sobretudo pela adição de compostos não identificáveis por esta técnica.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, caracterização, comportamento, físico.

CHARACTERIZATION OF PHOSPHATE FERTILIZERS WITH ASSOCIATED TECHNOLOGY

ABSTRACT

Soils in tropical regions are typically acidic, with low base saturation and rich in iron (Fe) and aluminum (Al) oxides, as a result of weathering. The phosphorus (P) content in these soils is often low due to interactions with oxidic clays, resulting in low natural availability of this element. In this context, phosphate fertilizers with associated technology appear, which aim to change the kinetics of P release, releasing the nutrient in conditions that are more conducive to being absorbed, better meeting the nutritional demands of crops. These associated technologies consist of coating a soluble source with polymers or biochar or adding organic material such as filter cake. That said, this work aimed to identify the main crystalline phases occurring in fertilizers, analyze the mass variation of fertilizer sources as a function of temperature and determine the C content in organomineral fertilizers. Monoammonium phosphate (MAP), polymer coated MAP (MAPPOL), biochar coated MAP (MAPBIO) and filter cake added MAP (MAPTF) were used as fertilizers. The phosphate sources were submitted to thermogravimetric analysis, x-ray diffraction, molecular absorption spectroscopy in the infrared region with Fourier transform and scanning electron microscopy. As a result, it was observed that the mass loss behavior between the associated technologies is different depending on the temperature, and these differences can be attributed to the composition of each material used, with the highest mass loss peak observed by MAPPOL, with a loss of 19 % between temperatures from 176 to 181 °C. It can also be seen that the mass loss behavior as a function of temperature is smoother for the conventional source and the MAPFT in relation to the coated fertilizers, MAPPOL and MAPBIO. XRD analyzes of MAP showed 87.7% biphosphamite by the main peaks 5.32; 3.74; 3.07; 2.00; 2.65 nm and 12.3% nitratin by the main peaks 3.03; 2.31 nm. The addition of associated technology to the MAP influenced the intensity of the peaks, a fact that occurs due to the incorporation of components that are not identifiable by the XRD and that result in a decrease in the concentration of bisphosphamite and nitrate in the fertilizer. The lowest peaks of bisphosphamite and nitratin were observed by MAPTF due to the lower proportion of MAP compared to other associated technologies. MAPPOL and MAPBIO fertilizers have similar peaks due to the closer concentrations of bisphosphamite and nitratin. It is concluded that the addition of associated technology to the MAP alters the thermogravimetric behavior of fertilizers and the intensity of the XRD peaks, mainly due to the addition of compounds not identifiable by this technique.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, characterization, behavior, physique.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é notadamente citado como o nutriente mais limitante à produção agrícola (Novais e Smyth, 1999), e por essa razão, a comunidade científica tem se interessado cada vez mais em aumentar a eficiência da adubação fosfatada. Esse aumento de eficiência, especialmente em fontes solúveis como o monoamônio fosfato (MAP) pode ser alcançado com a aplicação de tecnologias de revestimento do grânulo, como polímeros (Lubkowski et al., 2015; Figueiredo et al., 2012) ou biochar (Li et al., 2020) ou adição de componentes orgânicos, como a torta de filtro, além de outras fontes (Borges et al., 2019).

As tecnologias associadas a fertilizantes fosfatados solúveis visam agregar a uma fonte solúvel um componente que seja capaz de alterar a cinética de liberação do nutriente, liberando-o em condições mais propícias de ser absorvido, de maneira a melhor atender às demandas nutricionais das plantas. Porém, cada uma das tecnologias associadas pode traduzir um padrão de liberação diferenciado de acordo com as condições do meio em que é aplicado. Isso ocorre, pois, cada material utilizado nas estruturas de revestimento ou a adição de componente orgânico alteram as propriedades físicas do fertilizante.

Atualmente, pouco se conhece sobre as propriedades físicas dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada sob diferentes condições, como alteração de temperatura e variação do conteúdo volumétrico de água no solo. Também pouco se sabe como a interação entre esses fatores pode alterar a cinética de liberação de nutrientes para culturas perenes e de ciclo curto, especialmente pelo fato das tecnologias associadas possuírem mecanismos de funcionamento diferenciados.

Os polímeros utilizados no revestimento de fontes fosfatadas solúveis são responsivos à umidade do solo, dilatando os poros conforme ocorre o aumento do teor de água no solo, liberando o nutriente de forma gradativa (Silva et al., 2012), a depender de seu coeficiente de permeabilidade. O aumento de temperatura também influencia no processo de liberação do nutriente (Gazola et al., 2013; Siman et al., 2020), pois à medida em que a temperatura aumenta, o revestimento começa a se expandir. Quando a expansão ocorre em regime plástico, ao retornar à posição inicial observa-se microfissuras nas estruturas, alterando a eficiência dos polímeros.

O biochar utilizado como revestimento do MAP é um material que vem sendo estudado recentemente (Laird et al., 2010; Lehmann et al., 2011) e sabe-se que confere ao fertilizante uma camada externa com capacidade de armazenamento de P, além de aumentar a densidade de cargas negativas na região de liberação de fosfato (Kiehl, 2008).

Os efeitos da temperatura e umidade nas propriedades desse material ainda é pouco relatado pela literatura.

A adição de torta de filtro também altera o grau de solubilidade da fonte fosfatada e forma compostos fósforo-metal-húmicos com P, reduzindo a intensidade de adsorção nos óxidos de P e Al (Borges et al., 2019) e melhorando a absorção pelas plantas. O processo de fabricação do MAP com adição de torta de filtro resulta em um produto peletizado, o que por si só é capaz de alterar a cinética de liberação de P, devido ao aumento de densidade, o que reduz a solubilidade. Também pouco se sabe sobre as propriedades físicas dos fertilizantes sob diferentes condições de umidade e temperatura do solo e como esses fatores podem alterar a cinética de liberação de P.

Para diminuir as incertezas acerca das propriedades físicas dos fertilizantes, diversas técnicas podem ser utilizadas para se caracterizá-los, as quais destacam-se a difratometria de raios-x (DRX) e análise termogravimétrica (TGA).

A eficiência dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada se relacionam, em grande parte, à capacidade do fertilizante de se solubilizar em condições de solo que permitam o maior aproveitamento pelas plantas, como umidade elevada. As técnicas acima mencionadas podem fornecer informações relevantes acerca do comportamento físico dos fertilizantes fosfatados e preencher lacunas de como a variação de umidade e temperatura podem influenciar na cinética de liberação de nutrientes.

Objetivou-se com este trabalho identificar as principais fases cristalinas de ocorrência nos fertilizantes, analisar a variação de massa das fontes fertilizantes em função da temperatura e determinar o teor de carbono nos fertilizantes organominerais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aquisição e produção dos fertilizantes

Foram utilizados como fertilizantes o fosfato monoamônio (MAP), o MAP revestido com polímero (MAPPOL), o MAP revestido com biochar (MAPBIO) e o MAP com adição de torta de filtro (MAPTF).

Os fertilizantes MAPTF e o MAPPOL são produtos comerciais. A fabricação do MAPTF ocorre através do processo de peletização após a mistura de torta de filtro, MAP e um polímero biodegradável. A torta de filtro foi utilizada após o processo de compostagem. Por sua vez, a produção do MAPPOL consiste no revestimento do grânulo

de MAP com um polímero biodegradável, em geral responsivo à umidade do solo e de material poroso.

O fertilizante organomineral MAPBIO foi produzido de material orgânico de palha de café proveniente das atividades de cafeicultura do Estado do Espírito Santo, que se acumulam nas propriedades ou nas unidades de beneficiamento e possuem potencial poluidor quando descartado em local inadequado. Para sua produção, as amostras de palha de café foram secas ao ar até apresentarem teor de umidade entre 11 e 12 %. O biocarvão foi produzido pelo processo de pirólise lenta na temperatura de 400 °C, por 60 min. A pirólise foi conduzida em reator metálico, modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 6 °C min⁻¹. Após o processo de pirólise, o biocarvão ficou no reator até atingir a temperatura ambiente. Os materiais foram passados em peneiras de malha de 0,250 e 0,105 mm, sendo utilizado o material retido na segunda malha.

Para a produção do MAPBIO, o MAP utilizado foi passado em peneiras de malha de 2,8 e 2,0 mm, sendo utilizado o material retido na segunda peneira. A proporção de biochar utilizada foi 20 % em massa e 35 % em volume. Para a realização da mistura dos materiais (Biochar e MAP), foi realizada a pesagem das quantidades de cada material, sendo posteriormente colocadas em granulador rotativo inclinado (45°). Foi utilizado como aglutinante uma solução de sacarose 2 %, pulverizada sobre a mistura durante a granulação. Os grânulos foram secos em estufa a 105 °C até peso constante.

Nos fertilizantes estudados foram avaliados os teores de P por método de extração de P total (nitro-perclórica, relação 1:4 HClO₄:HNO₃) e os teores de carbono orgânico total (Silva, 2009), apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química dos fertilizantes fosfatados

Fontes	P ₂ O ₅ (%) ¹	C (%) ²
MAP	46	-
MAPPOL	48	-
MAPTF	24	12,76
MAPBIO	37	12,48

Legenda: ¹ P total, ² Carbono orgânico total. MAP - monoamônio fosfato; MAPPOL - MAP revestido com polímero; MAPTF - MAP + torta de filtro; MAPBIO - MAP revestido com biochar.

2.2 Análise Termogravimétrica

Para se avaliar a variação da massa das amostras de fertilizantes em função da temperatura e do tempo em ambiente e atmosfera controlados utilizou-se a análise termogravimétrica. As curvas termogravimétricas foram obtidas na faixa de 30 a 650 °C, sob atmosfera de N₂ com fluxo de 20 mL min⁻¹; taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ e porta amostra de alumina em analisador termogravimétrico modelo PerkinElmer DTA 4000.

2.3 Análise DRX

Para identificar as principais fases cristalinas de ocorrência nos fertilizantes, as amostras de fertilizantes foram analisadas por difratometria de raios-x usando um aparelho Rigaku Miniflex 600C com radiação Cu-K α , operado a 40kV e 15mA em contínuos-scan a 1,2 °2- θ min⁻¹ e varredura de 4 a 90 °2 θ .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 a seguir apresenta a curva de perda de massa (TGA) dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada em função da temperatura. O MAPPOL apresentou o maior pico de perda de massa, ocorrido entre as temperaturas de 176 a 181 °C, com perda de 19 % neste intervalo (Figura 1-b). O primeiro pico de perda de massa observado no MAP ocorreu entre as temperaturas de 173 e 222 °C, reduzindo sua massa em de 2,64 % (Figura 1-a). Por sua vez, o MAPBIO registrou este mesmo fenômeno entre as temperaturas de 178°C e 201 °C, com perda de massa de 2,55 % (Figura 1-d). O MAPTF não apresentou picos de perda de massa pronunciados como os demais fertilizantes (Figura 1-c).

Observa-se com a análise dos gráficos que o comportamento de perda de massa entre as tecnologias associadas é diferenciado em função da temperatura, e essas diferenças podem ser atribuídas à composição de cada material utilizado. O MAPPOL é um polímero biodegradável e possui em sua composição amido, etilcelulose, lignina, quitosana e alginato. O MAPTF é composto basicamente de bagaço moído da cana e lodo da decantação, originado do processo de tratamento de clarificação do caldo da cana-de-açúcar em decantadores. Já o MAPBIO é composto por um revestimento de biochar de palha de café, que já passou por um processo de estabilização a 400 °C.

Cada um desses materiais tem uma faixa térmica de degradabilidade, por essa razão, o MAPPOL obteve perda de 19 % em uma curta faixa de temperatura enquanto as demais tecnologias associadas não obtiveram pico superior a 2,64 % de massa.

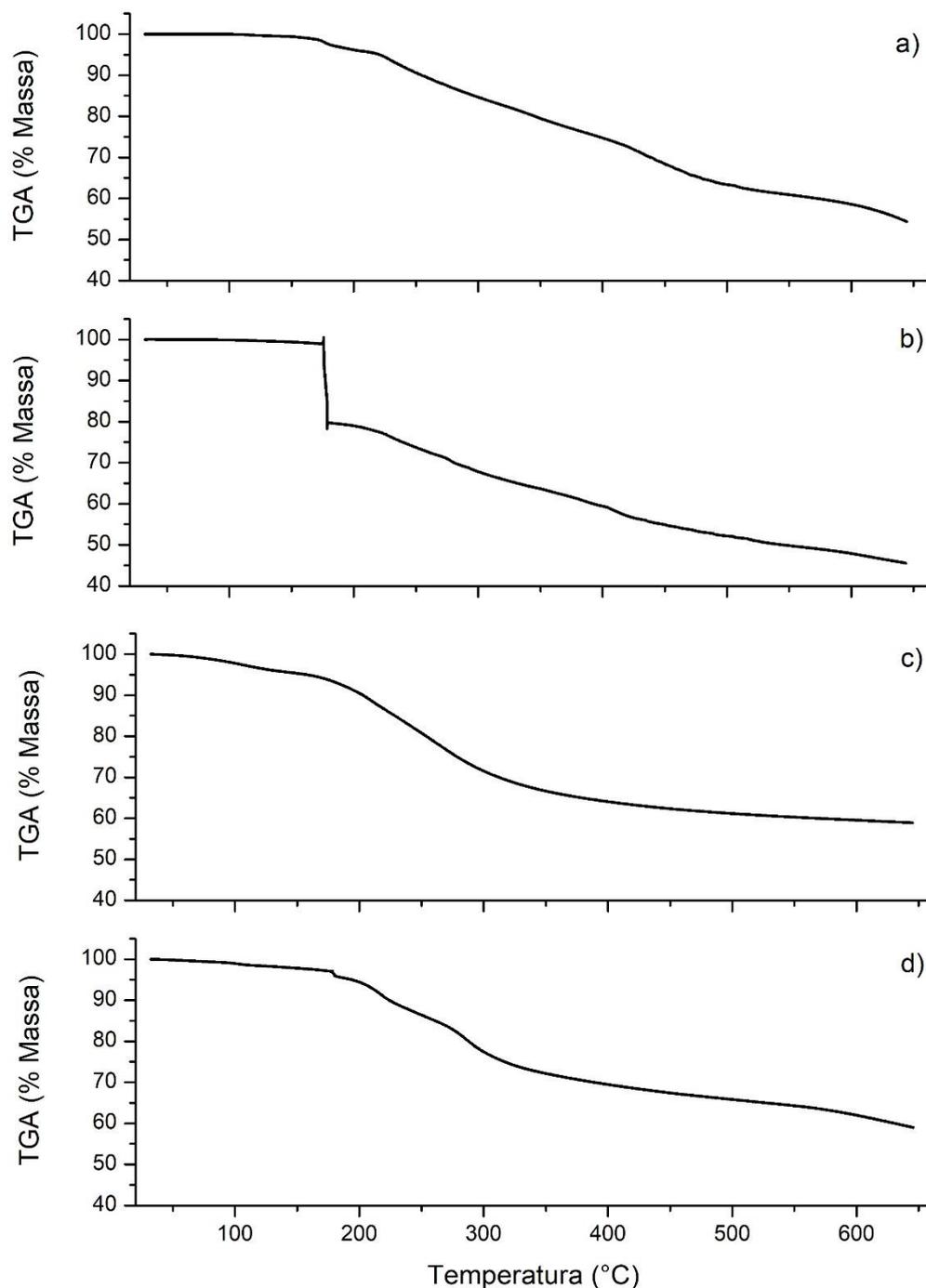


Figura 1 – Curvas TGA (—) de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada. Legenda: a) MAP (monoamônio fosfato), b) MAPPOL (MAP revestido com polímero), c) MAPTF (MAP + torta de filtro), d) MAPBIO (MAP revestido com biochar).

Pode-se perceber também que o comportamento de perda de massa em função da temperatura é mais suave para a fonte convencional (MAP), a tecnologia de adição de material orgânico (MAPTF) e de revestimento com biochar representados pelas figuras 1-a, 1-c e 1-d, respectivamente, em relação ao fertilizante com revestimento polimérico (MAPPOL), representado pela Figura 1-d. Este fato pode estar relacionado à heterogeneidade do revestimento polimérico, que sofreu ação mais acentuada da temperatura em um primeiro momento, fato que não ocorre na fonte convencional (MAP), no fertilizante com aditivo orgânico (MAPTF) e com revestimento polimérico (MAPPOL).

Outro comparativo que se pode fazer é a perda de massa para cada fonte a cada 100 °C, apresentado na tabela 2 a seguir.

Observa-se que a maior perda de massa de 0 – 100 °C ocorre no MAPTF (2,3 %) seguido do MAPBIO (1,03 %) enquanto os demais fertilizantes não apresentaram perda de massa para esta faixa de temperatura. A maior perda de massa registrada até 200 °C ocorre no MAPPOL, seguido do MAPTF, MAPBIO e MAP. Nesta faixa de temperatura os fertilizantes MAPPOL, MAPTF e MAPBIO perderam 611,47; 280 e 167 % a mais, respectivamente, em relação à fonte solúvel (MAP).

Paras as faixas de temperatura de 0-300, 0-400, 0-500 e 0-600 °C o MAPPOL obteve a maior perda de massa, seguido do MAPTF, MAPBIO e MAP. Considerando o intervalo de 0-600 °C observa-se que a perda de massa do MAPPOL foi 125,46 % a mais em relação ao MAP, seguido do MAPTF (97,13 %) e MAPBIO (91,27 %).

Tabela 2 - Perda de massa acumulativa (%) a cada 100 °C dos eventos térmicos de cada fonte fertilizante.

Fontes	Temperatura (° C)					
	0 - 100	0 - 200	0 - 300	0 - 400	0 - 500	0 - 600
MAP	0	3,4	15,56	25,12	36,5	41,51
MAPPOL	0	20,79	32,4	40,58	47,87	52,08
MAPTF	2,3	9,52	28,66	36,15	39,16	40,32
MAPBIO	1,03	5,7	22,95	30,67	34,18	37,89

Legenda: a) MAP (monoamônio fosfato), b) MAPPOL (MAP revestido com polímero), c) MAPTF (MAP + torta de filtro), d) MAPBIO (MAP revestido com biochar).

A partir dos dados da tabela 1 pode-se perceber que no intervalo de 0-200 °C houve a maior diferença na perda de massa das fontes com tecnologia associada em relação à fonte solúvel. Como as tecnologias associadas à fonte solúvel utilizam materiais orgânicos, a temperatura de 200 °C coincide com a degradação de moléculas orgânicas menores como monômeros de lignina, compostos fenólicos e carboidratos (Capana, 2009), o que pode ter influenciado nas perdas e maximizado a diferença entre as fontes. Fato este minimizado no MAPBIO, pois o material utilizado no revestimento sofreu pirólise a 400 °C antes de ser utilizado na produção do fertilizante.

As análises por DRX conduzidas no MAP (Figura 1 d) evidenciaram a presença de 87,7 % de bifosfamita pelos picos principais 5,32; 3,74; 3,07; 2,00; 2,65 nm e 12,3 % de nitratina pelos picos principais 3,03; 2,31 nm.

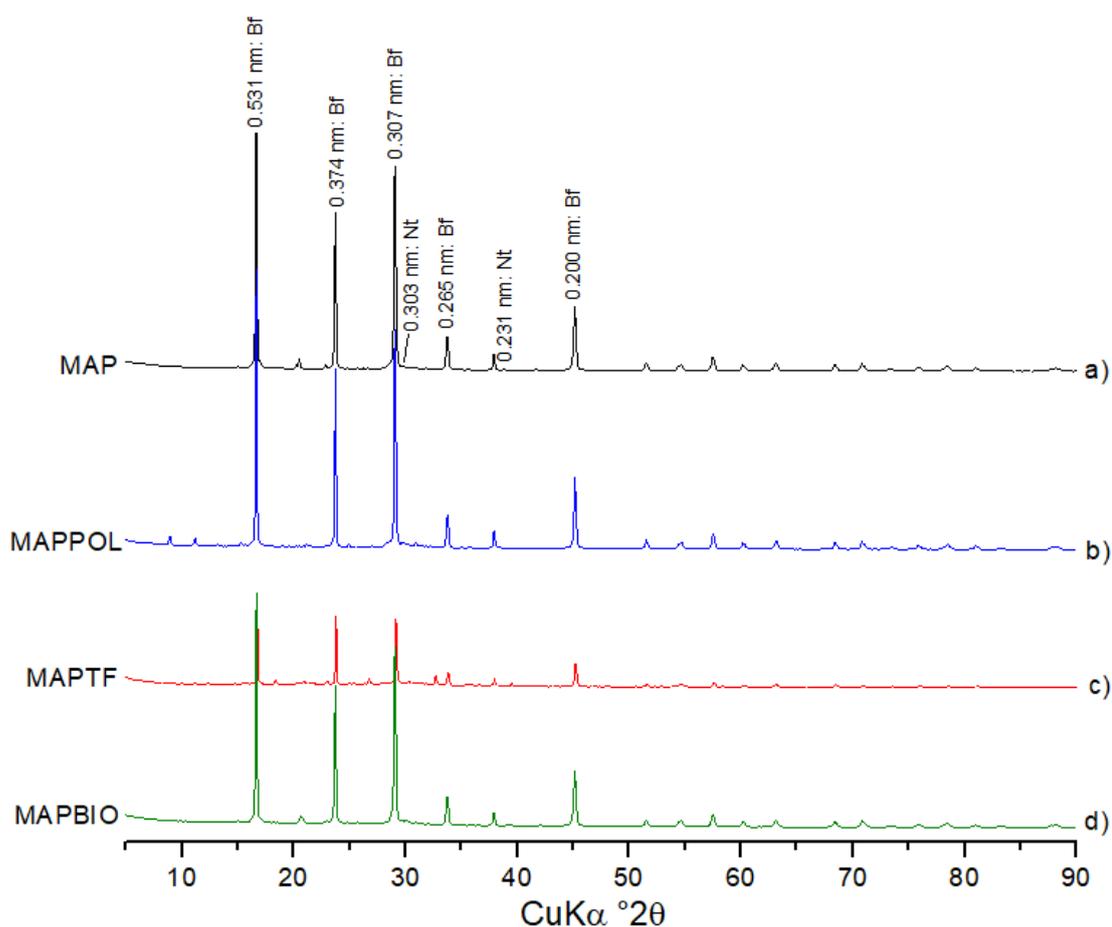


Figura 2 - Espectros de difração de raios X do MAPPOL (a), MAPBIO (b), MAPTF (c) e MAP (d).
Legenda: Bf (biofosfamita), Nt (nitratina), MAP (monoamônio fosfato), MAPPOL (MAP revestido com polímero), MAPTF (MAP + torta de filtro), MAPBIO (MAP revestido com biochar).

O revestimento físico do MAPPOL e MAPBIO e a adição de torta de filtro (MAPTF) apresentaram influência na intensidade dos picos. Isso ocorre, pois, a adição de tecnologia ao MAP incorpora componentes não identificáveis pelo DRX e que resultam na diminuição da concentração de bifosfamita e nitrato no fertilizante.

O MAPTF apresentou menor expressividade dos picos de bifosfamita e nitrato (Figura 1 c), fato que está relacionado à menor proporção de MAP em relação às demais tecnologias associadas, pois se trata de um fertilizante com adição e homogeneização de componente orgânico. Por sua vez, o MAPPOL (Figura 1 a) e MAPBIO (Figura 1 b) apresentam picos semelhantes devido ao fato de serem fertilizantes apenas revestidos, obtendo concentrações de bifosfamita e nitrato mais próximas.

CONCLUSÃO

A adição de tecnologia associada ao MAP altera o comportamento termogravimétrico dos fertilizantes. No intervalo de 0 – 100 °C, o MAPPOL se mantém estável em função da temperatura, e apenas os fertilizantes MAPTF e MAPBIO apresentam perda de massa. A partir desse intervalo, verifica-se o maior pico de perda de massa em curto intervalo de temperatura para o MAPPOL.

A adição de revestimento ou aditivo orgânico ao MAP altera a intensidade dos picos do DRX pela adição de compostos não identificáveis por esta técnica.

REFERÊNCIAS

- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- CAPANA, A. S. Caracterização e estudo do comportamento térmico de resíduo (lodo) proveniente de estações de tratamento de água e de esgotos do município de Araraquara-SP. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009.
- FIGUEIREDO, C. C. de, BARBOSA, D. V., DE OLIVEIRA, S. A., FAGIOLI, M., & SATO, J. H. Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. *Revista Ciência Agronômica*, 43:446, 2012.
- GAZOLA, R. D. N., BUZETTI, S., DINALLI, R. P., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., & CELESTRINO, T. D. S. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60:876-884, 2013.
- KIEHL, E. J. Fertilizantes Organominerais. 2.ed. Piracicaba, Degaspari, 160p, 2008.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LAIRD, D., FLEMING, P., WANG, B., HORTON, R., & KARLEN, D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158:436-442, 2010.
- LEHMANN, J., RILLIG, M. C., THIES, J., MASIELLO, C. A., HOCKADAY, W. C., & CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, 43:1812-1836, 2011.
- LUBKOWSKI, K., SMOROWSKA, A., GRZMIL, B., & KOZŁOWSKA, A. Controlled-release fertilizer prepared using a biodegradable aliphatic copolyester of poly (butylene succinate) and dimerized fatty acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63:2597-2605, 2015.
- NOVAIS, R. F., & SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1ª ed. Viçosa; Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- SILVA, F. C. da. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 2009.
- SILVA, A. D. A., SILVA, T. S., VASCONCELOS, A. C. P. D., & LANA, R. M. Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*, 28:240-250, 2012.
- SIMAN, F. C., ANDRADE, F. V., & PASSOS, R. R. Nitrogen fertilizers and NH₃ volatilization: Effect of temperature and soil moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51:1283-1292, 2020.

CAPÍTULO 2

CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM NA EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA

RESUMO

O elevado grau de intemperismo dos solos brasileiros resulta em características como baixa disponibilidade de nutrientes e alta capacidade de adsorção de fósforo (P), que é decorrente das interações que apresenta com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). A utilização de tecnologia associada a uma fonte solúvel pode alterar a cinética de liberação de P, de forma a liberar o nutriente em condições de solo que facilite o transporte, além de reduzir a interação P-coloide e o tempo de contato do nutriente com a fração mineral, aumentando a eficiência da adubação. Posto isso, este experimento teve como objetivo avaliar os teores de P no solo ao longo do tempo a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada sob variação de temperatura, diferentes conteúdos volumétricos de água no solo e ao longo dos períodos de avaliação. O experimento foi realizado em condições de laboratório, com temperatura controlada, em que a temperatura permaneceu a 25 °C (± 2) por 18 horas diárias e a 35 °C nas 6 horas restantes. A umidade do ar foi mantida em 60 % durante todo o tempo experimental. Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas no tempo, em que a parcela principal foi constituída por um fatorial 4 x 2 x 3, composto por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero – MAPPOL; MAP + torta de filtro – MAPTF e MAP revestido com biochar – MAPBIO), dois conteúdos de água no solo (80 e 60 % da capacidade de campo), e 3 distâncias de coleta (0-1, 1-2 e 2-3 mm). A subparcela foi composta por 8 tempos de avaliação (3, 6, 9, 12, 15, 30, 60 e 90 dias). A liberação de P do fertilizante foi avaliada em extração sequencial por água e Mehlich-1, através do aumento da concentração ao redor do grânulo nos tempos de avaliação. Como resultado verificou-se que os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP para a variável tP_M a 80 % CC, fato é atribuído à alteração na cinética de liberação das fontes revestidas. Os fertilizantes revestidos proporcionaram maiores teores de P no solo em relação ao MAPTF a 80 % CC em ambas as variáveis analisadas e não se diferenciaram a 60 % CC. O MAPPOL e o MAPBIO não se diferenciaram quanto ao tP_A e tP_M em nenhum dos conteúdos volumétricos analisados, o que demonstra que as estruturas de revestimento obtiveram padrão semelhante de liberação de P. Quando se avalia a liberação de P ao longo do tempo, verifica-se que o MAP obteve pico de liberação de P no 6 ° dia (163,94 mg dm⁻³), enquanto o MAPTF obteve o pico no 9 ° dia (140,21 mg dm⁻³) e os fertilizantes revestidos apresentaram o pico máximo de liberação no 12 ° dia, com médias de 271,33 e 234,58 mg dm⁻³ para os fertilizantes MAPPOL e MAPBIO, respectivamente. Portanto, conclui-se que os fertilizantes revestidos proporcionaram maiores teores de P no solo em relação ao MAP e em relação ao MAPTF, e não diferenciaram entre si. As maiores diferenças entre as fontes foram encontradas na distância 0-1 mm a 80 % CC. As fontes fertilizantes aumentaram os teores de P no solo e os fertilizantes com tecnologia associada prolongaram o tempo de liberação, aumentando a disponibilidade ao longo do tempo.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

WETTING AND DRYING CYCLES ON THE EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZERS WITH ASSOCIATED TECHNOLOGY

ABSTRACT

The high degree of weathering of Brazilian soils results in characteristics such as low nutrient availability and high phosphorus (P) adsorption capacity, which is due to its interactions with iron (Fe) and aluminum (Al) oxides. The use of technology associated with a soluble source can change the kinetics of P release, in order to release the nutrient in soil conditions that facilitate transport, in addition to reducing the P-colloid interaction and the contact time of the nutrient with the mineral fraction, increasing the fertilization efficiency. That said, this experiment aims to evaluate the P levels in the soil over time from the application of phosphate fertilizers with associated technology under temperature variation, different volumetric water contents in the soil and over the evaluation periods. The experiment was conducted under laboratory conditions, with controlled temperature, where the temperature remained at 25 °C (± 2) for 18 hours daily and at 35 °C for the remaining 6 hours. Air humidity was maintained at 60 % throughout the experimental period. The treatments were arranged in split plots in time, in which the main plot consisted of a 4 x 2 x 3 factorial, composed of four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - MAP, polymer coated MAP - MAPPOL; MAP + filter cake - MAPTF and MAP coated with biochar - MAPBIO), two soil water contents (80 and 60 % of field capacity), and 3 sampling distances (0-1, 1-2 and 2-3 mm). The subplot consisted of 8 evaluation times (3, 6, 9, 12, 15, 30, 60 and 90 days). The release of P from the fertilizer was evaluated, in sequential extraction in water and Mehlich-1, by increasing the concentration around the granule at 3, 6, 9, 12, 15, 45, 60 and 90 days after adding the phosphate fertilizer granule in petri dishes. As a result, it was verified that the coated fertilizers were more efficient in relation to the MAP for the tP_M variable at 80 % CC, a fact attributed to the release mechanisms of the coated sources, which promote the controlled release of P. Coated fertilizers provided higher levels of P in the soil compared to MAPTF at 80 % CC in both analyzed variables and did not differ at 60 % CC. MAPPOL and MAPBIO did not differ for tP_A and tP_M in any of the analyzed volumetric contents, which demonstrates that the coating structures obtained a similar pattern of P release. When evaluating P release over time, it can be seen that MAP had a peak of P release on the 6th day (163.94 mg dm⁻³), while MAPTF had a peak on the 9th day (140.21 mg dm⁻³) and coated fertilizers showed the maximum release peak on the 12th day, with averages of 271.33 and 234.58 mg dm⁻³ for MAPPOL and MAPBIO fertilizers, respectively. Therefore, it is concluded that the coated fertilizers obtained better results in relation to MAP and in relation to MAPTF for P levels in the soil, and did not differ between them. The greatest differences between the sources were found in the 0-1 mm distance at 80 % CC. The fertilizer sources increased the levels of P in the soil and the fertilizers with associated technology extended the release time, increasing the availability over time.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) não é o nutriente mais absorvido pelas culturas, mas é o nutriente que requer maior atenção à produção agrícola, em grande parte devido à sua baixa disponibilidade em solos tropicais, que é decorrente das fortes interações que apresenta com os constituintes destes solos, como os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Lopes & Guilherme, 2016). Ainda que se observe áreas agrícolas com baixa resposta à adubação fosfatada, devido à construção da fertilidade ao longo dos anos, ainda existem diversas regiões onde a adsorção de P é limitante à produção.

A magnitude da adsorção de P aos óxidos é dependente de vários fatores, como mineralogia, textura do solo, temperatura (Adams et al., 2013), umidade (Gazola et al., 2013), tempo de contato (Teixeira et al., 2016), solubilidade da fonte fertilizante e da tecnologia associada à fabricação, que pode alterar a cinética de liberação do nutriente, aumentando sua disponibilidade.

Com a problemática da dinâmica de P no solo, torna-se necessário aumentar a eficiência da adubação fosfatada a fim de se obter melhor aproveitamento do P pelas culturas e consequente maior produtividade. O aumento de eficiência consiste em se estabelecer mecanismos que alteram a cinética de liberação de P na solução do solo e que reduzam o tempo de contato com os argilominerais, visando minimizar a intensidade de adsorção de fosfato e minorar a competição solo-planta por este nutriente, tornando-o mais disponível (Sharpley et al., 2015; Borges et al., 2019; Li et al., 2020).

Dentre as tecnologias associadas mais frequentemente utilizadas estão o encapsulamento da fonte solúvel com polímeros biodegradáveis ou biochar e a adição de componentes orgânicos, como a torta de filtro (Fertahi et al., 2022; Samoraj et al., 2022)

O encapsulamento com polímeros visa a proteção física do grânulo utilizando material com propriedades mecânicas favoráveis à liberação de P (Figueiredo et al., 2019), promovendo a difusão do nutriente através da expansão da estrutura porosa à medida em que a umidade do solo se eleva (Tomaszewska et al., 2001), alterando a liberação do nutriente e aumentando a eficiência do processo (Naz e Sulaiman, 2016).

Outros materiais de revestimento têm sido atualmente utilizados, como o biochar, que ao passar pelo processo de pirólise gera um material orgânico, poroso, com capacidade de armazenamento de P (físico e químico), alta CTC e com potencial de alterar a cinética de liberação do nutriente ao longo do tempo (Li et al., 2020). A adição de componentes orgânicos tem o potencial de aumentar a eficiência de liberação de P se comparado às

fontes mais solúveis. Isso ocorre devido ao fato da matéria orgânica aumentar a densidade de cargas negativas na região de liberação do fosfato, além de competir pelos sítios de adsorção presentes na matriz sólida (Andrade et al., 2003), podendo tornar esse nutriente mais disponível para as plantas (Singh et al., 1988).

A eficiência da adubação fosfatada e suas tecnologias associadas às fontes solúveis é diversa de acordo com as condições ambientais em que o fertilizante é aplicado. Fatores climáticos atuam conjuntamente para diminuir e/ou influenciar a eficiência das tecnologias associadas, causando em muitos casos, efeito sinérgico. É o caso da variação de temperatura e umidade do solo, que afetam diretamente a cinética de liberação dos fertilizantes e, conseqüentemente, a disponibilidade de P.

A umidade controla a atividade microbiana e demais processos biológicos (Oertel et al., 2016) e tem papel importante na solubilização do fertilizante e na cinética de liberação do nutriente. Para os fertilizantes revestidos com polímeros quanto maior o coeficiente de permeabilidade, maior será a solubilização, enquanto para os organominerais, o aumento da umidade favorecerá o aumento da atividade biológica com degradação da matéria orgânica adicionada e/ou maior solubilidade.

A temperatura também afeta a cinética de liberação de P, pois o aumento de temperatura também favorece maior atividade biológica, degradando mais rapidamente os fertilizantes organominerais e também promove expansão das malhas dos polímeros em temperaturas acima de 25 °C, acarretando em microfissuras no recobrimento e aumentando a liberação de P, reduzindo a eficiência (Siman et al., 2020).

Lustosa Filho et al (2020) verificaram que a utilização de biochar junto a uma fonte solúvel de P é capaz de influenciar a cinética de liberação, reduzindo o tempo de contato com os óxidos de Fe e Al e aumentando a fração lábil de P após o cultivo, principalmente em solos com quantidades substanciais de óxidos de Fe e Al cristalinos, como o solo deste estudo. Li et al (2020) também verificaram que a adição de biochar contribuiu para o aumento de disponibilidade do P advindo da fonte mineral e constitui um reservatório de P a médio e longo prazo para as culturas.

A ideia de se utilizarem fertilizantes que podem proporcionar a liberação de P em um período maior de tempo se baseia na prerrogativa de manter teores adequados deste nutriente ao longo de um ciclo de cultivo, e ter menos P restrito pelos componentes minerais do solo (Li et al., 2020). Contudo, cada material tem suas características químicas e físicas e a velocidade de liberação do fertilizante é dependente da interação entre o material utilizado e características biológicas e ambientais.

Posto isso, este trabalho tem como objetivo avaliar a os teores de P no solo ao longo do tempo a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada sob variação de temperatura, diferentes conteúdos volumétricos de água no solo e ao longo dos períodos de avaliação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em laboratório no campus da UFES – Alegre (ES). Foram coletadas amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa (LVA), na profundidade de 20 a 40 cm, para a caracterização química (Silva et al., 2009), física (Teixeira et al., 2017) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física e química de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa-arenosa (LVA) coletado na profundidade de 20-40 cm em Alegre ES

Característica	LVA
Argila (%) ^{1/}	46,60
Silte (%) ^{1/}	4,10
Areia grossa (%) ^{1/}	30,40
Areia fina (%) ^{1/}	18,90
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,14
pH-H ₂ O ^{3/}	5,72
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,00
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{5/}	4,04
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	1,05
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,59
K ⁺ (mg dm ⁻³) ^{6/}	19,00
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,23
CTC(t) (cmol _c dm ⁻³)	1,70
CTC(T) (cmol _c dm ⁻³)	5,74
V %	29,63
CMAP (mg/cm ³) ^{7/}	0,673

1/ Método da pipeta (Teixeira et al., 2017); 2/ Método da proveta (Teixeira et al., 2017); 3/ Relação solo-água 1:2,5; 4/ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; 5/ Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; 6/ Extrator Mehlich-1; 7/ Olsen e Watanabe (1957).

Após a caracterização química, amostras de solo foram acondicionadas, homogeneizadas e incubadas em sacos plásticos com calcário, a fim de elevar o pH a 6,0, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986).

As amostras foram incubadas durante 30 dias, mantendo-se a umidade do solo a 70 % da capacidade de campo (-10 kPa). Após esse período, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

O experimento foi realizado em condições de laboratório, com temperatura controlada, utilizando uma câmara climática para manutenção da temperatura e umidade do ar, em que a câmara foi ajustada para permanecer a 25 °C (± 2) por 18 horas diárias e a 35 °C nas 6 horas restantes. A umidade do ar foi mantida em 60 % durante todo o período experimental.

Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas no tempo, em que a parcela principal foi constituída por um fatorial 4 x 2 x 3, composto por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero – MAPPOL; MAP + torta de filtro – MAPTF e MAP revestido com biochar – MAPBIO), dois conteúdos de água no solo (80 e 60 % da capacidade de campo), e 3 distâncias de coleta (0-1, 1-2 e 2-3 mm). A subparcela foi composta por 8 tempos de avaliação (3, 6, 9, 12, 15, 30, 60 e 90 dias). Cada ciclo de umedecimento e secagem teve duração de 3 dias. Após decorrido esse tempo, as amostras retornavam ao conteúdo de água referente a cada tratamento.

Como unidade experimental foram utilizadas placas de petri com 8,6 cm de diâmetro e 1,1 cm de altura. Em cada placa de petri foram utilizados 60 g de solo (0,035 dm³) e foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir o conteúdo volumétrico referente a cada tratamento e foram pesadas em balança e a massa anotada. Em seguida, as placas de petri foram incubadas por 24 horas para assegurar a distribuição uniforme da água através do solo contido na placa. Após esse período, um grânulo do fertilizante fosfatado com massa determinada foi colocado no centro da placa de petri para condução do experimento.

Nos tempos de avaliação, as amostras foram coletadas utilizando um jogo de anéis que se sobrepunham, separando o solo conforme as distâncias, sendo 0-1, 1-2 e 2-3 mm do grânulo. O volume de coleta se diferiu em relação às distâncias, sendo em torno de 0,8 g para a primeira distância, 1,5 g para a segunda distância e 2,2 g para a terceira distância.

A dose utilizada foi 45 mg dm⁻³ P, que corresponde a 2,28 mg P adicionado em cada placa de petri. Os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2

a 3 mm a fim de homogeneizar sua granulometria e após esse processo o grânulo fertilizante foi selecionado e pesado.

A liberação de P do fertilizante foi avaliada através do aumento da concentração ao redor do grânulo em 3, 6, 9, 12, 15, 45, 60 e 90 dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado nas placas de petri. Nos dias de avaliação, o fertilizante foi removido, quando possível, e o solo coletado, de acordo com as distâncias. Para cada amostra de solo, determinou-se a concentração de P, sendo feita extração sequencial em H₂O e Mehlich-1 na proporção solo solução 1:10.

Os dados foram submetidos à análise de variância. Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes (Alvarez & Alvarez, 2006), sendo 3 contrastes ortogonais (C1, C2 e C3) e um contraste adicional (C4), e testados pelo teste F nos níveis de 1, 5 e 10 % de probabilidade, e os tempos de contato foram avaliados por regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, os fertilizantes revestidos proporcionaram maiores teores de P no solo em relação ao MAP e em relação ao MAPTF e não diferenciaram entre si (Tabela 2 e C1, C2, C4, Tabela 3). Por sua vez, o MAP apresentou maiores teores de P no solo em relação ao MAPTF durante o período experimental (C3, Tabela 3).

Como esperado, o extrator Mehlich-1 obteve maiores teores de P disponível em relação à extração com água. A extração com água visou buscar diferenças mais sutis de P na solução do solo, podendo sugerir efeitos relevantes e não detectados pelo Mehlich-1.

Os fertilizantes revestidos (MAPPOL + MAPBIO), quando comparados ao MAP, geraram maiores teores de P no solo pelo extrator Mehlich-1 (tP_M) e não se diferenciaram para o extrator água (tP_A) (C1, Tabela 3). Os fertilizantes revestidos proporcionaram médias de 39,21 e 248,90 mg dm⁻³ para o tP_A e tP_M , respectivamente. Nessa mesma ordem de variáveis, o MAP apresentou médias de 38,23 e 216,79 mg dm⁻³ (Tabela 2).

Tabela 2 - Teores médios de P disponível (mg dm^{-3}) extraídos em água e Mehlich-1 após aplicação dos fertilizantes fosfatados (Fert) considerando o conteúdo volumétrico de água no solo, os tempos de contato e as distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado (Dist)

Fert	Umidade	Dist (mm)	Tempos de contato (dias)							
			3	6	9	12	15	30	60	90
Extrator: Água										
MAP	60 % CC	0-1	63,34	131,34	191,26	180,55	97,57	30,12	27,79	18,94
		1-2	0,93	2,79	33,53	29,57	23,36	15,14	9,93	8,22
		2-3	0,39	2,56	2,87	3,73	4,89	4,66	2,25	1,86
	80 % CC	0-1	131,80	163,94	130,41	118,53	107,27	63,88	37,26	32,21
		1-2	4,04	5,59	20,34	37,33	31,83	25,69	8,93	5,43
		2-3	0,62	1,86	5,05	4,42	3,73	3,18	2,33	1,86
MAPPOL	60 % CC	0-1	79,75	120,27	147,32	115,75	84,33	40,96	28,79	27,51
		1-2	3,61	5,37	19,84	35,54	21,72	15,03	10,90	11,57
		2-3	0,83	1,35	7,66	6,61	6,31	5,71	2,56	1,21
	80 % CC	0-1	80,80	172,56	263,06	271,33	112,74	41,34	37,20	31,27
		1-2	10,37	11,87	25,48	42,47	35,55	22,02	10,37	8,57
		2-3	1,05	1,73	9,24	5,04	4,66	1,57	1,43	0,90
MAPTF	60 % CC	0-1	80,98	121,46	132,41	111,72	107,20	33,89	23,70	1,80
		1-2	0,90	7,20	9,45	14,85	15,30	9,75	3,15	2,09
		2-3	0,90	2,09	2,41	4,50	6,30	8,09	4,35	2,84
	80 % CC	0-1	126,42	126,56	140,21	112,90	62,83	48,28	18,14	12,43
		1-2	6,90	8,54	24,74	10,18	9,15	1,80	1,80	1,65
		2-3	6,59	7,34	6,30	4,50	3,59	2,69	2,39	1,65
MAPBIO	60 % CC	0-1	64,85	104,64	147,84	154,75	80,64	53,89	8,06	6,24
		1-2	0,38	4,42	24,29	42,72	12,96	5,95	5,18	4,22
		2-3	2,30	2,50	2,78	4,32	3,65	1,92	1,44	1,15
	80 % CC	0-1	34,85	104,64	147,84	154,75	80,64	33,89	8,06	6,24
		1-2	0,38	4,42	24,29	42,72	12,96	5,95	5,18	4,22
		2-3	2,30	2,50	2,78	4,32	3,65	1,92	1,44	1,15
Extrator: Mehlich-1										
MAP	60 % CC	0-1	384,62	684,63	778,55	808,43	552,28	289,53	267,41	253,44
		1-2	9,70	43,08	147,87	179,70	53,95	39,98	34,93	33,77
		2-3	3,10	4,66	13,97	35,32	24,45	11,26	10,48	8,15
	80 % CC	0-1	568,58	600,80	620,98	830,56	521,91	495,33	454,09	265,86
		1-2	56,28	163,98	208,80	233,55	145,54	132,35	122,25	91,98
		2-3	3,88	9,70	98,97	61,71	23,29	12,42	10,87	8,93
MAPPOL	60 % CC	0-1	320,94	744,85	651,65	535,15	433,68	302,15	275,46	199,18
		1-2	28,56	39,84	166,11	139,05	138,67	129,28	110,49	98,96
		2-3	1,88	7,52	15,03	18,04	25,93	16,91	13,53	6,76
	80 % CC	0-1	385,20	937,63	1343,13	1055,26	703,51	516,36	465,62	400,61
		1-2	30,44	140,55	145,81	338,22	159,72	135,67	158,21	156,33
		2-3	3,01	18,04	28,56	121,38	43,22	28,94	25,55	20,29
MAPTF	60 % CC	0-1	476,86	584,83	707,79	671,95	608,82	262,42	203,19	164,20
		1-2	29,24	86,97	107,97	137,96	108,72	63,73	57,73	14,25
		2-3	9,00	11,25	42,74	68,23	26,24	23,24	12,00	9,75
	80 % CC	0-1	656,06	701,05	715,30	728,79	337,40	200,19	182,95	24,74
		1-2	43,49	101,22	112,47	126,71	148,46	38,24	29,24	20,99
		2-3	9,75	42,74	94,47	84,73	40,49	29,99	24,74	16,50
MAPBIO	60 % CC	0-1	357,6	577,92	603,84	1065,6	537,12	187,2	172,32	102,24
		1-2	12,96	22,08	160,80	290,88	79,20	64,80	23,09	22,08
		2-3	4,8	8,64	34,08	96,48	49,44	28,80	26,40	19,68
	80 % CC	0-1	364,80	733,44	1164,00	1608,96	1290,24	543,84	205,92	148,80
		1-2	16,80	149,76	194,88	298,08	170,40	115,20	101,28	95,52
		2-3	7,2	20,16	114,72	97,44	53,76	26,88	25,44	17,76

MAP = monoamônio fosfato, MAPPOL = MAP revestido com polímero, MAPTF = MAP com adição de torta de filtro, MAPBIO = MAP revestido com biochar.

Tabela 3 - Contrastes médios (Ci) dos teores de P disponível (mg dm⁻³) extraídos por água e Mehlich-1 para os fertilizantes fosfatados independentemente da umidade, dos tempos de contato e das distâncias do grânulo

Variáveis	C1	C2	C3	C4
tP_A	-0,98 ^{ns}	7,92 [*]	8,9 ^{**}	5,04 ^{ns}
tP_M	-32,10 [*]	29,3 ^o	61,40 ^{**}	-6,93 ^{ns}

C1: MAP vs (MAPPOL + MAPBIO); C2: MAP vs MAPTF; C3: (MAPPOL+ MAPBIO) vs MAPTF; C4: MAPPOL vs MAPBIO; MAP = monoamônio fosfato, MAPPOL = MAP revestido com polímero, MAPTF = MAP com adição de torta de filtro, MAPBIO = MAP revestido com biochar; **, * e ° significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente, e ns, não significativo.

Os maiores teores de P no solo verificados pelos fertilizantes revestidos em relação à fonte convencional para o extrator Mehlich-1 podem estar relacionados à alteração da cinética de liberação de P conferida pela adição de revestimento, que ao prolongar o tempo de liberação, mantém P em formas lábeis por um período maior (Li et al., 2020). Por outro lado, fontes fosfatadas solúveis, como o MAP, liberam a maior parte do P imediatamente após a aplicação no solo, e tem sua disponibilidade para as plantas reduzida ao longo do tempo devido ao contato com partículas do solo e conversão para formas menos lábeis (Carneiro et al., 2021; Everaert et al., 2016).

Os ciclos de umedecimento e secagem também podem influenciar no resultado, especialmente para fontes convencionais, aumentando a adsorção. Concomitantemente, um maior controle de liberação de P pelos fertilizantes revestidos pode ter diminuído a liberação em condições de menor conteúdo volumétrico de água no solo, aumentando a recuperação de P pelo Mehlich-1.

Li et al (2020) encontraram que o P armazenado nos biocarvões possui liberação mais lenta, fato atribuído à difusão intra-biocarvão, o que pode aumentar a disponibilidade de P ao longo do tempo. O P adicionado via fertilizante mineral solúvel ficaria disponível mais rapidamente (Hinsinger et al., 2011), podendo ser adsorvido pelos constituintes minerais, o que reduz a disponibilidade de P advindo da fonte mineral sem tecnologia associada.

Sarkar et al (2018) realizaram experimentos em laboratório utilizando fonte solúvel (diamônio fosfato - DAP) e dois polímeros e concluíram que liberação de P das fontes revestidas foi menor durante todo o período de incubação em relação ao DAP comercial não revestido. Enquanto os fertilizantes revestidos liberaram 74,6 e 139,2 mg kg⁻¹ P, o DAP liberou 326 mg kg⁻¹ P ao longo de 120 horas. Os autores atribuíram esses resultados à alteração da taxa de liberação dos fertilizantes revestidos, que provavelmente reduziram

a adsorção de P no solo e mantiveram uma maior quantidade de P disponível na solução. Portanto, fornecem P para as culturas em um período temporal maior, fato também observado neste trabalho.

O MAP proporcionou recuperação de maiores teores de P em relação ao MAPTF para as variáveis tP_A e tP_M (C2, Tabela 3), com médias de 30,31 e 187,49 mg dm⁻³, respectivamente, para o MAPTF. O maior teor de P recuperado pelo MAP está relacionado à cinética de liberação de nutriente. O MAPTF é um fertilizante formado por um pellet de torta de filtro e MAP, e o processo de compressão gera aumento de densidade, que por sua vez altera as propriedades mecânicas do produto, e, conseqüentemente, a taxa de liberação de P, explicando os menores teores de P em água e Mehlich-1.

Os fertilizantes revestidos proporcionaram maiores tP_A e tP_M em relação ao MAPTF (C3, Tabela 3), sendo os resultados observados pelos fertilizantes revestidos 29,36 e 32,75 % superiores em relação ao MAPTF, respectivamente (Tabela 2). Este resultado ocorre devido à cinética de liberação de P, em que os fertilizantes revestidos possuem uma camada externa porosa em que a perfusão de água para o seu interior, solubilização do fertilizante e liberação do nutriente ocorre de maneira mais dinâmica em relação ao MAPTF, explicando os maiores teores de P disponível no solo.

Entre os fertilizantes revestidos, não houve diferenças entre os extratores utilizados durante o período experimental de 90 dias (C4, Tabela 3), evidenciando que as ambas as fontes fosfatadas conseguiram manter padrão semelhante de disponibilização de P no solo.

Quando se considera o conteúdo volumétrico de água no solo, verifica-se que os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP para a variável tP_M a 80 % CC (C5, Tabela 4). Este fato pode ser atribuído aos mecanismos de liberação das fontes revestidas (Pogorzelski et al., 2020), que, conseqüentemente, elevaram o tP_M no solo. Já para o MAP, por ter maior solubilidade em curto período de tempo, as perdas por adsorção também são mais expressivas (Roy et al., 2017), reduzindo a recuperação de P por Mehlich-1.

O MAPTF não se diferenciou do MAP para o tP_A e tP_M quando o solo era mantido a 60 % CC (C6, Tabela 4). Para o conteúdo de 80 % CC, o MAP obteve melhores resultados em relação ao MAPTF (C6, Tabela 4).

Tabela 4 - Contrastes médios (Ci) dos teores de P disponível (mg dm⁻³) extraídos por água e Mehlich-1 para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo

Variáveis	Umidade	C5	C6	C7	C8
<i>tP_A</i>	60 % CC	4,86 ^{ns}	7,51 ^{ns}	2,64 ^{ns}	2,47 ^{ns}
	80 % CC	-6,82 ^{ns}	8,33 ^o	15,16 ^{**}	7,61 ^{ns}
<i>tP_M</i>	60 % CC	7,90 ^{ns}	7,67 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-5,35 ^{ns}
	80 % CC	-72,11 ^{**}	50,93 [*]	123,04 ^{**}	-8,5 ^{ns}

C5: MAP vs (MAPPOL + MAPBIO); C6: MAP vs MAPTF; C7: (MAPPOL+ MAPBIO) vs MAPTF; C8: MAPPOL vs MAPBIO; MAP = monoamônio fosfato, MAPPOL = MAP revestido com polímero, MAPTF = MAP com adição de torta de filtro, MAPBIO = MAP revestido com biochar; **, * e ° significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente e ns, não significativo.

O MAPTF, por ser um fertilizante peletizado, em baixos conteúdos volumétricos de água a liberação de P é mais limitada, por outro lado, tende a aumentar a liberação de P conforme aumenta o conteúdo volumétrico de água no solo. Essa característica é desejada, pois a maior liberação de P em maior umidade favorece o transporte de P no solo e a redução da adsorção de P. Porém, o MAP, por ser uma fonte de alta solubilidade, tende a apresentar maior cinética de liberação de P em altos conteúdos volumétricos de água.

Os fertilizantes revestidos obtiveram melhores resultados em relação ao MAPTF a 80 % CC, utilizando H₂O ou Mehlich-1, e não se diferenciaram a 60 % CC (C7, Tabela 4). Esses resultados demonstram que a cinética de liberação de P observado no MAPTF ocorre mais gradualmente em relação às outras fontes, o que nos sugere que em culturas perenes o MAPTF poderia suprir P por um período maior de tempo, sendo possível a combinação de alguma fonte revestida e o MAPTF.

O MAPPOL e o MAPBIO não se diferenciaram quanto ao *tP_A* e *tP_M* em nenhum dos conteúdos volumétricos analisados (C8, Tabela 4), o que demonstra que as estruturas de revestimento obtiveram padrão semelhante de disponibilização de P.

De maneira geral, as maiores diferenças entre as fontes foram encontradas na distância 0-1 mm, especialmente no conteúdo volumétrico de 80 % CC. Este fato pode ser justificado pela pequena dose de P utilizada neste experimento. Mesmo para a pequena dose utilizada neste experimento, demonstrou-se sensibilidade entre as fontes.

O MAP promoveu incremento de 17,08 % para o *tP_A* a 60 % CC na distância 0-1 mm em relação aos fertilizantes revestidos e gerou resultado 14,21 % inferior nesta mesma distância quando a conteúdo volumétrico de água no meio era 80 % CC (C9,

Tabela 5). Para o iP_M só houve diferenças entre as fontes revestidas e o MAP convencional a 80 % CC na distância 0-1 mm, em que os fertilizantes revestidos obtiveram média de 741,70 mg dm⁻³ P e o MAP obteve média de 544,76 mg dm⁻³ P.

Estes resultados demonstram que em baixos conteúdos volumétricos de água há menor liberação de P dos fertilizantes revestidos em relação ao MAP, o que é desejado, pois neste potencial o fluxo difusivo de P é reduzido, o que ocasiona em maior interação com as partículas de solo, aumentando sua adsorção em óxidos de Fe e Al (Campos et al., 2016).

Em contrapartida, quando se aumenta o conteúdo volumétrico de água no meio, como 80 % CC, há maior difusão de P até a zona de absorção das raízes, o que reduz a restrição de P pelos componentes minerais do solo, mesmo em fontes solúveis, como o MAP.

Tabela 5 - Contrastes médios (Ci) dos teores de P disponível (mg dm⁻³) extraídos por água e Mehlich-1 para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo e as distâncias (mm) do grânulo do fertilizante fosfatado

Variáveis	Umidade	Dist	C9	C10	C11	C12
iP_A	60 % CC	0-1	13,52°	15,97°	2,45 ^{ns}	2,97 ^{ns}
		1-2	1,45 ^{ns}	7,61 ^{ns}	6,16 ^{ns}	2,93 ^{ns}
		2-3	-0,37 ^{ns}	-1,03 ^{ns}	-0,66 ^{ns}	1,52 ^{ns}
	80 % CC	0-1	-16,26*	17,19*	33,40**	23,73**
		1-2	-3,68 ^{ns}	9,30 ^{ns}	12,98°	-0,48 ^{ns}
		2-3	-0,52 ^{ns}	-1,5 ^{ns}	-0,98 ^{ns}	-0,4 ^{ns}
iP_M	60 % CC	0-1	60,68 ^{ns}	42,35 ^{ns}	-18,33 ^{ns}	-17,6 ^{ns}
		1-2	-27,56 ^{ns}	-7,95 ^{ns}	19,61 ^{ns}	21,88 ^{ns}
		2-3	-9,45 ^{ns}	-11,39 ^{ns}	-1,94 ^{ns}	-20,34 ^{ns}
	80 % CC	0-1	-196,94**	12,51*	298,45**	-31,59 ^{ns}
		1-2	-7,34 ^{ns}	65,49 ^{ns}	72,83*	15,38 ^{ns}
		2-3	-12,05 ^{ns}	-14,2 ^{ns}	-2,15 ^{ns}	-9,3 ^{ns}

C9: MAP vs (MAPPOL + MAPBIO); C10: MAP vs MAPTF; C11: (MAPPOL+ MAPBIO) vs MAPTF; C12: MAPPOL vs MAPBIO; MAP = monoamônio fosfato, MAPPOL = MAP revestido com polímero, MAPTF = MAP com adição de torta de filtro, MAPBIO = MAP revestido com biochar; **, * e ° significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente, e ns, não significativo.

Em nenhuma das variáveis analisadas houve diferenças entre a fonte convencional e os fertilizantes revestidos nas distâncias 1-2 e 2-3 mm do grânulo fertilizante (C9, Tabela 5), fato atribuído à baixa difusão de P em solos argilosos e com alta CMAP, que por serem grandes drenos de P (Novais et al., 2007) o nutriente liberado pelo fertilizante tende a mover-se pouco no solo.

O MAP promoveu maior tP_A em relação ao MAPTF nas distâncias de 0-1 mm a 60 e 80 % CC (C10, Tabela 5), com médias de 92,61 e 98,16 mg dm⁻³ P, respectivamente, para o MAP e 76,64 e 80,97 mg dm⁻³ para o MAPTF. Já na variável tP_M o MAP foi mais eficiente em relação ao MAPTF na distância 0-1 mm a 80 % CC (C10, Tabela 5), com média de 544,76 mg dm⁻³ para o MAP e 443,25 mg dm⁻³ para o MAPTF.

A menor disponibilidade de P observada pelo MAPTF na distância de 0-1 mm em relação ao MAP se deve aos mecanismos de liberação de nutriente conferido pela adição de aditivo orgânico (Lustosa Filho et al., 2020), em que o P pode formar compostos fósforo-metal-húmicos com a matéria orgânica, somado a isso, o pellet formado entre o material orgânico e o MAP alteram a cinética de liberação de P.

A menor quantidade de P recuperado nos indica que a tecnologia de revestimento foi eficiente em alterar a cinética de liberação de P, o que pode ser interessante do ponto de vista agrônomo, especialmente para culturas perenes, fornecendo o nutriente ao longo de seu desenvolvimento.

Os fertilizantes revestidos obtiveram maior tP_A e tP_M relação ao MAPTF nas distâncias 0-1 e 1-2 mm a 80 % CC (C11, Tabela 5). Em relação ao MAPTF, os fertilizantes revestidos produziram resultados 41,31 e 160,24 % superiores, para as distâncias 0-1 e 1-2, respectivamente, para a variável tP_A a 80 % CC. Já para a variável tP_M a 80 % CC, os fertilizantes revestidos obtiveram resultados 67,33 e 93,85 % superiores em relação ao MAPTF, para as distâncias de 0-1 e 1-2 mm, respectivamente.

Esses resultados demonstram que a liberação de P advindo das fontes revestidas foi maior em relação ao MAPTF no período avaliado, inclusive para a distância de 1-2 mm, o que indica que a menor quantidade de P liberado produziu menor difusão de P. Os melhores resultados obtidos pelos fertilizantes revestidos não indicam menor eficiência do MAPTF, mas demonstram que este fertilizante possui liberação mais lenta de P, o que pode ser uma vantagem para adubação de manutenção em culturas perenes.

Entre os fertilizantes revestidos, o MAPPOL acarretou maiores teores tP_A em relação ao MAPBIO na distância 0-1 mm a 80 % CC (C12, Tabela 5), obtendo médias de 126,29 mg dm⁻³ para o MAPPOL e 102,56 mg dm⁻³ para o MAPBIO. Estes resultados indicam

que ambas as fontes propiciam valores semelhantes de P disponível ao longo do tempo, resultado este propiciado pela alteração na cinética de liberação, fornecimento do nutriente em condições mais propícias e redução do tempo de contato do P com óxidos de Fe e Al, reduzindo a adsorção (Santos et al., 2011).

De maneira geral, observa-se que as maiores diferenças no tP_A e tP_M observados entre as fontes ocorreram na distância de 0-1 mm e esses resultados podem estar relacionados à difusão de P no solo a curtas distâncias (Castro et al., 2015).

A alteração da cinética de liberação de P bem como sua liberação em condições adequadas é um mecanismo utilizado para se aumentar a disponibilidade de P ao longo do tempo, reduzindo a formação de P não lábil, especialmente solos de regiões tropicais e com altos teores de óxidos de Fe e Al (Guedes et al., 2016).

As fontes fertilizantes, de maneira geral, aumentaram a disponibilidade de P no solo. Contudo, observa-se padrão de liberação diferenciado entre as fontes em função do tempo de contato, para as extrações em água (Figura 1) e Mehlich-1 (Figura 2).

Na primeira distância do grânulo (0-1 mm) observa-se os maiores teores de P e para todas as distâncias analisadas houve depleção nos teores de P extraídos por água e Mehlich-1 com o aumento do tempo de contato, fato relacionado aos fenômenos de adsorção (Li et al., 2020) e difusão de P para as regiões adjacentes.

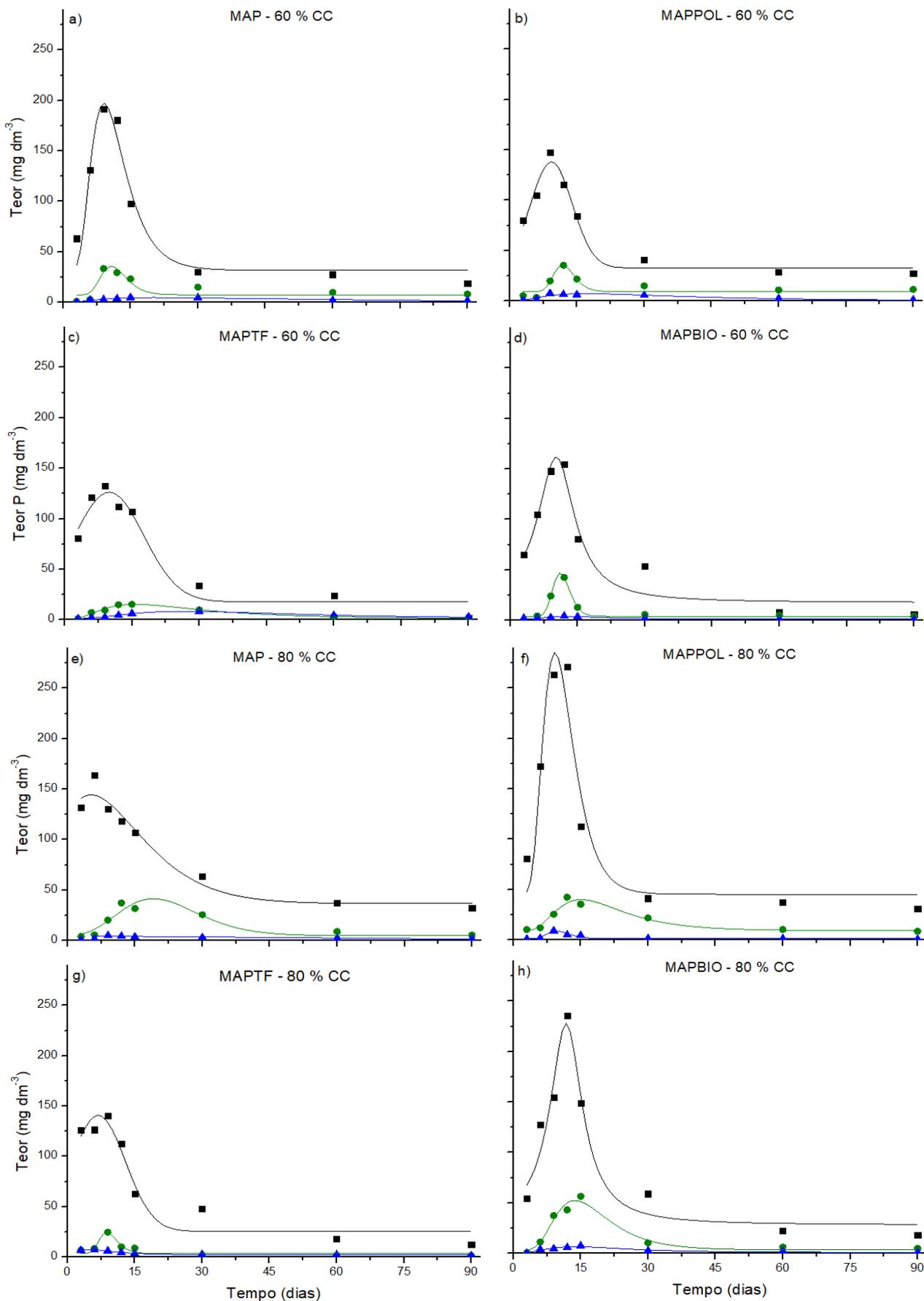


Figura 1 - Regressões dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) extraídos por água para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo e as distâncias (mm) do grânulo

Legenda: ■ Distância 1 (0-1 mm); ● Distância 2 (1-2 mm); ▲ Distância 3 (2-3 mm).

De maneira geral, o pico de maior disponibilidade de P para todas as fontes ocorreu entre o 6 e o 12º dia após a aplicação dos fertilizantes no solo e houve tendência à estabilização a partir do 30º dia. Para o tP_A a 60 % CC, os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram disponibilidade inicial de P menor em relação ao MAP (Figura 1). Este fato ocorreu devido à alteração da cinética de liberação de P, especialmente em baixos conteúdos volumétricos de água. Na primeira distância avaliada e no terceiro tempo avaliado (9º dia), o MAP apresentou média de 191,26 mg dm⁻³ para o tP_A a 60 % CC enquanto as tecnologias associadas apresentaram teor médio de 142,52 mg dm⁻³ (Figura 1).

Porém, quando se eleva o conteúdo volumétrico de água a 80 % CC, considerando a distância de 0-1 mm, o MAP obteve pico de liberação de P no 6º dia (163,94 mg dm⁻³), enquanto o MAPTF obteve o pico no 9º dia (140,21 mg dm⁻³) e os fertilizantes revestidos apresentaram o pico máximo de liberação no 12º dia, com médias de 271,33 e 234,58 mg dm⁻³ para os fertilizantes MAPPOL e MAPBIO, respectivamente (Figura 1).

Os teores de P na segunda distância do grânulo (1-2 mm) apresentaram comportamento semelhante à primeira distância, com pico de disponibilidade aproximadamente nos mesmos tempos de avaliação para ambos os conteúdos volumétricos de água, porém, com valores inferiores à primeira distância.

Essa movimentação ocorre, pois, a liberação de P no solo satura a região de liberação de fosfato, permitindo uma maior difusão de P no solo (Lustosa Filho et al., 2020). Na terceira distância avaliada (2-3 mm) os teores de P de todas as fontes se mantiveram baixos e não houve pico de disponibilidade definido (Figura 1).

Para o tP_M a 60 % CC observa-se que no pico de disponibilidade na distância 0-1 mm o MAPBIO apresentou valor de 1065,60 mg dm⁻³ seguido do MAP (808,43 mg dm⁻³), MAPPOL (744,85 mg dm⁻³) e MAPTF (707,79 mg dm⁻³). Esses resultados demonstram que o MAPPOL e MAPTF alteraram a cinética de liberação em baixo conteúdo volumétrico de água, o que pode ser uma característica interessante, pois o P liberado, especialmente se considerarmos solos argilosos, haveria maiores perdas por adsorção (Figura 2).

Quando se eleva o teor de água a 80 % CC, observa-se que de maneira geral na primeira distância 0-1 mm os fertilizantes revestidos apresentaram maior pico de disponibilidade de P, sendo 1343,13 mg dm⁻³ para o MAPPOL e 1608,96 mg dm⁻³ para o MAPBIO. O MAP e o MAPTF apresentaram valores máximos próximos, de 830,56 mg dm⁻³ para o MAP e 728,79 mg dm⁻³ para o MAPTF (Figura 2).

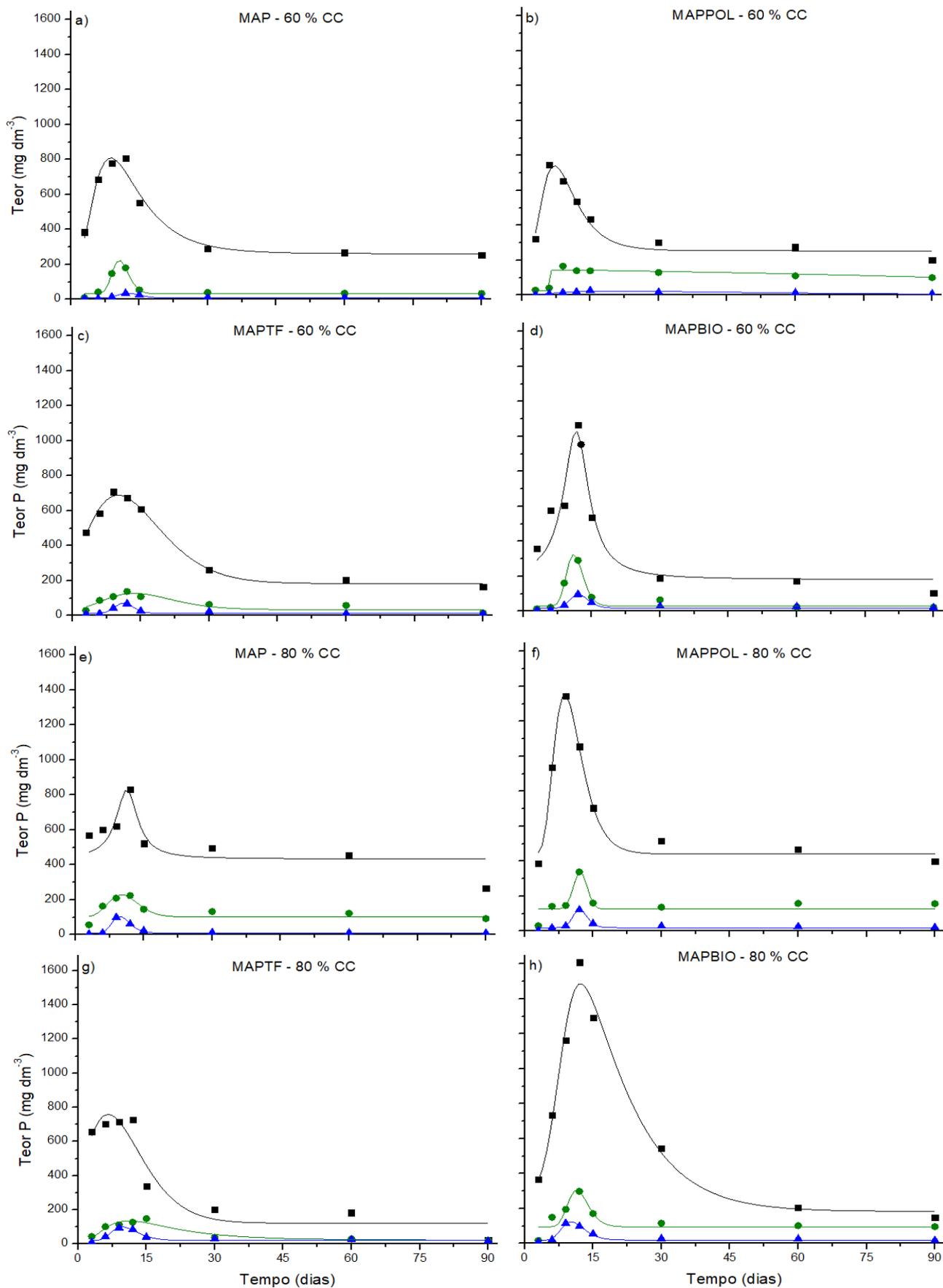


Figura 2 - Regressões dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) extraídos por Mehlich-1 para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo e as distâncias (mm) do grânulo.

Legenda: ■ Distância 1 (0-1 mm); ● Distância 2 (1-2 mm); ▲ Distância 3 (2-3 mm).

A distância 1-2 mm apresentou comportamento similar à distância 0-1 mm para o tP_M a 60 e 80 % CC (Figura 2). Em relação à variável tP_M observa-se que os teores de P na distância 2-3 mm para todas as fontes analisadas, especialmente a 80 % CC, apresentaram valores máximos bem definidos, ainda que inferiores às demais distâncias avaliadas (Figura 2), fato relacionado à maior liberação e difusão de P em conteúdos volumétricos de água mais elevados.

De maneira geral, em comparação com a aplicação de fertilizante mineral fosfatado de alta solubilidade, como o MAP, a utilização de tecnologias associadas à fonte solúvel alteraram a cinética de liberação de P e poderiam manter maiores teores de P disponível ao longo do tempo, disponibilizando-o também para cultivos futuros.

CONCLUSÃO

Os fertilizantes revestidos proporcionaram maiores teores de P no solo em relação ao MAP e em relação ao MAPTF, e não diferenciaram entre si. O MAP apresentou melhores resultados em relação ao MAPTF durante o período experimental.

As maiores diferenças entre as fontes foram encontradas na distância 0-1 mm, especialmente no conteúdo volumétrico de 80 % CC. A difusão de P para regiões adjacentes foi limitada em virtude da dose de P utilizada.

Os fertilizantes com tecnologia associada prolongaram o tempo de liberação de P, aumentando a disponibilidade desse nutriente ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, C., FRANTZ, J., & BUGBEE, B. Macro-and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. *Journal of plant nutrition and soil science*, 176(1): 76-88, 2013.
- ALABI, K. E., SORENSEN, R. C., KNUDSEN, D., & REHM, G. W. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*, 50:937–94, 1986.
- ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 985-1002, 2003.
- ANDRADE, F. V., MENDONÇA, E. S., ALVAREZ, V. H., & NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 27:1003-11, 2003.
- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339: 20-30, 2019.
- CAMPOS, M. DE, ANTONANGELO, J. A., & ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. *Soil and Tillage Research*, v. 156, p. 110-118, 2016.
- CARNEIRO, J. S. DA S., RIBEIRO, I. C. A., NARDIS, B. O., BARBOSA, C. F., LUSTOSA FILHO, J. F., & MELO, L. C. A. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of the Total Environment*, v. 760, p. 143955, 2021.
- CASTRO RC, BENITES VM, TEIXEIRA PC, ANJOS MJ, OLIVEIRA LF. Phosphorus migration analysis using synchrotron radiation in soil treated with Brazilian granular fertilizers. *Applied Radiation and Isotopes*. 2015;105:233–237.
- CHIEN, S. H. et al. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 89, n. 2, p. 229-255, 2011.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cultivo do Milho. Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/27037/1/Plantio.pdf>> Acesso em: 12 ago 2021.
- EVERAERT, M., WARRINNIER, R., BAKEN, S., GUSTAFSSON, J. P., DE VOS, D., & SMOLDERS, E. Phosphate-exchanged Mg–Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 4, n. 8, p. 4280-4287, 2016.
- FERTAHI, S., PISTOCCHI, C., DAUDIN, G., OUKARROUM, A., ZEROUAL, Y., BARAKAT, A., & BERTRAND, I. Experimental dissolution of biopolymer-coated phosphorus fertilizers applied to a soil surface: Impact on soil pH and P dynamics. *Annals of Agricultural Sciences*, 67:189-195, 2022.

- FIGUEIREDO, C. C. de, BARBOSA, D. V., DE OLIVEIRA, S. A., FAGIOLI, M., & SATO, J. H. Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. *Revista Ciência Agronômica*, 43(3): 446, 2012.
- GAZOLA, R. N.; BUZETTI, S.; DINALLI, R. P.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; CELESTRINO, T. S. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60: 876-884, 2013.
- GUEDES RS, MELO LCA, VERGÜTZ L, RODRÍGUEZ-VILA A, COVELO EF, FERNANDES AR. Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. *Soil & Tillage Research*. 2016;162:46–54.
- HINSINGER, P., BRAUMAN, A., DEVAU, N., GÉRARD, F., JOURDAN, C., LACLAU, J. P., ... & PLASSARD, C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail?. *Plant and Soil*, v. 348, n. 1, p. 29-61, 2011.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Tabela 1618 - Área plantada, área colhida e produção, por ano da safra e produto das lavouras. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>. Acesso em: 23-08-2022.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244: 125471, 2020.
- LOPES, A. S., & GUILHERME, L. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. *Advances in Agronomy*, v. 137, p. 1-72, 2016.
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of the Total Environment*, 709: 136028, 2020.
- NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal Of Controlled Release*, 225:109-120, 2016.
- OERTEL, C., MATSCHULLAT, J., ZURBA, K., ZIMMERMANN, F., & ERASMI, S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 76:327-352, 2016.
- POGORZELSKI, D., LUSTOSA FILHO, J. F., MATIAS, P. C., SANTOS, W. O., VERGÜTZ, L., & MELO, L. C. A. Biochar as composite of phosphate fertilizer: Characterization and agronomic effectiveness. *Science of the Total Environment*, v. 743, p. 140604, 2020.
- ROY, E. D., WILLIG, E., RICHARDS, P. D., MARTINELLI, L. A., VAZQUEZ, F. F., PEGORINI, L., ... & PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 206-214, 2017.
- SAMORAJ, M., MIRONIUK, M., WITEK-KROWIAK, A., IZYDORCZYK, G., SKRZYPCZAK, D., MIKULA, K., ... & CHOJNACKA, K. Biochar in environmental friendly fertilizers-Prospects of development products and technologies. *Chemosphere*, 296:133975, 2022.

- SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SALCEDO, I. H.; SOUZA, A. P.; SILVA, V. D. M. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 1301-1310, 2011.
- SARKAR, A., BISWAS, D. R., DATTA, S. C., ROY, T., MOHARANA, P. C., BISWAS, S. S., & GHOSH, A. Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. *Soil and Tillage Research*, v. 180, p. 48-62, 2018.
- SHARPLEY, A. N., BERGSTRÖM, L., ARONSSON, H., BECHMANN, M., BOLSTER, C. H., BÖRLING, K., ... & TONDERSKI, K. S. (2015). Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. *Ambio*, 44(2): 163-179, 2015.
- SIMAN, F. C., ANDRADE, F. V., & PASSOS, R. R. Nitrogen fertilizers and NH₃ volatilization: Effect of temperature and soil moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 51, n. 10, p. 1283-1292, 2020.
- SINGH, Y., SINGH, B., MASKINA, M. S., & MEELU, O. P. Effect of organic manures, crop residues and green manure (*Sesbania aculeata*) on nitrogen and phosphorus transformations in a sandy loam at field capacity and under waterlogged conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 6(2): 183-187, 1988.
- TEIXEIRA, R. S.; SILVA, I. R. SOUSA, R. N.; MATIELLO, E. M.; SOARES, E. M. B. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16:1097-1112, 2016.
- TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H.; BORDINI, R. A.; FOLONI, J. S. S.; ONISHI, R. Y. Produção de matéria seca de milho em função da adubação fosfatada mineral e organomineral. *Colloquium Agrariae*, 6: 1-7, 2010.
- TOMASZEWSKA, M., JARPSOEWICZ, A., & KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*, 146:319-323, 2002.

ANEXOS

Anexo 1 – Equações das regressões dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) extraídos por água para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo e as distâncias (mm) do grânulo do fertilizante fosfatado

Fert	Umid	Dist	Equações (extrator água)
MAP	60 % CC	0-1	$Y = 31,79 + 1710,64 / (2 * \text{Pi}) * 0,42 * 1^{**x} * \exp(\ln(1^{**x} / 10,78))^2 / (2 * 0,42^2)$ $R^2 = 0,93$
		1-2	$Y = 7,47 + 207,49 / 2 * \text{Pi} * 0,26 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 11,48))^2 / (2 * 0,26^2))$ $R^2 = 0,67$
		2-3	$Y = -2,70 + 17,16 * (1 / (1 + \exp(-(1^{**x} - 5,10 + 9,34E-13/2) / 4,46))) * (1 - 1 / (1 + \exp(-(1^{**x} - 5,10 + 9,34E-13/2) / 75,01))))$ $R^2 = 0,71$
	80 % CC	0-1	$Y = 36,73 + (2351/4,22) * (12,55/1^{**x}) * 12 * (12,555 * 1^{**x}) / 4,22 * \exp((-1^{**x} - 12,55) / 4,22)$ $R^2 = 0,93$
		1-2	$Y = 4,97 + (806,44/1,88) * (22/1^{**x}) * 12 * (22 * 1^{**x}) / 1,88 * \exp((-1^{**x} - 22) / 1,88)$ $R^2 = 0,79$
		2-3	$Y = 0,60 + 4,86 * (1 / (1 + \exp(-(1^{**x} - 26,57 + 41,1/2) / 0,03))) * (1 - 1 / (1 + \exp(-(-1^{**x} - 26,57 - 41,09/2) / 31,7))))$ $R^2 = 0,75$
MAPPOL	60 % CC	0-1	$Y = 32,86 + 1219,50 / 10,88 * (\text{Pi} / (4 * \ln(2))) * \exp(-4 * \ln(2) * (1^{**x} - 9,31)^2 / 10,88^2)$ $R^2 = 0,95$
		1-2	$Y = 9,32 + 155,90 / (2 * \text{Pi}) * 0,20 + 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 12,23))^2 / (2 * 0,20^2))$ $R^2 = 0,79$
		2-3	$Y = -0,01 + 362,68 / (2 * \text{Pi}) * 0,82 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 33,74))^2 / (2 * 0,82^2))$ $R^2 = 0,69$
	80 % CC	0-1	$Y = 45,23 + 2174,83 / (2 * \text{Pi}) * 0,36 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 10,57))^2 / (2 * 0,36^2))$ $R^2 = 0,88$
		1-2	$Y = 9,14 + 641,81 / (2 * \text{Pi}) * 0,49 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 19,14))^2 / (2 * 0,49^2))$ $R^2 = 0,90$
		2-3	$Y = 1,32 + 46,38 / (2 * \text{Pi}) * 0,25 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 10,21))^2 / (2 * 0,25^2))$ $R^2 = 0,81$
MAPTF	60 % CC	0-1	$Y = 17,85 + 2085/18,05 * (\text{Pi} / (4 * \ln(2))) * \exp(-4 * \ln(2) * (1^{**x} - 9,94)^2 / 18,05^2)$ $R^2 = 0,92$
		1-2	$Y = 1,16 + 462,72 / (2 * \text{Pi}) * 0,66 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 24,61))^2 / (2 * 0,66^2))$ $R^2 = 0,96$
		2-3	$Y = 1,12 + 397,16 / (2 * \text{Pi}) * 0,66 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 41,70))^2 / (2 * 0,66^2))$ $R^2 = 0,96$
	80 % CC	0-1	$Y = 25,69 + 1742,82 / 14,22 * (\text{Pi} / (4 * \ln(2))) * \exp(-4 * \ln(2) * (1^{**x} - 6,84)^2 / 14,22^2)$ $R^2 = 0,89$
		1-2	$Y = 3,68 + 107,10 / (2 * \text{Pi}) * 0,23 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 9,24))^2 / (2 * 0,23^2))$ $R^2 = 0,82$
		2-3	$Y = 2,11 + 63,79 / (2 * \text{Pi}) * 0,72 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 8,20))^2 / (2 * 0,72^2))$ $R^2 = 0,97$
MAPBIO	60 % CC	0-1	$Y = 17,72 + (2 * 2248 / \text{Pi}) * (9,91 / (4 * (1^{**x} - 10,23)^2 + 9,91^2))$ $R^2 = 0,90$
		1-2	$Y = 4,02 + 206,86 / (2 * \text{Pi}) * 0,17 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 11,42))^2 / (2 * 0,17^2))$ $R^2 = 0,98$
		2-3	$Y = 1,68 + 32,98 / (2 * \text{Pi}) * 0,41 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 15,27))^2 / (2 * 0,41^2))$ $R^2 = 0,72$
	80 % CC	0-1	$Y = 28,20 + (2 * 2726,20 / \text{Pi}) * (8,68 / (4 * (1^{**x} - 11,75)^2 + 8,68^2))$ $R^2 = 0,92$
		1-2	$Y = 3,52 + 798,80 / (2 * \text{Pi}) * 0,43 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 16,55))^2 / (2 * 0,43^2))$ $R^2 = 0,94$
		2-3	$Y = 1,14 + 132,10 / (2 * \text{Pi}) * 0,58 * 1^{**x} * \exp(-(\ln(1^{**x} / 19,44))^2 / (2 * 0,58^2))$ $R^2 = 0,7$

Anexo 2 – Equações das regressões dos teores de P disponível (mg dm⁻³) extraídos por Mehlich-1 para os fertilizantes fosfatados considerando a umidade do solo e as distâncias (mm) do grânulo do fertilizante fosfatado

Fert	Umid	Dist	Equações (extrator Mehlich-1)
MAP	60 % CC	0-1	$Y = 260,82 + 7836,38 / (2 * \pi) * 0,56 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 11,92))^2 / (2 * 0,56^2))$ R ² = 0,94
		1-2	$Y = 32,08 + 862,12 / (2 * \pi) * 0,17 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 10,93))^2 / (2 * 0,17^2))$ R ² = 0,95
		2-3	$Y = 7,53 + 167,11 / (2 * \pi) * 0,19 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 12,85))^2 / (2 * 0,19^2))$ R ² = 0,89
MAP	80 % CC	0-1	$Y = 432,86 + (2 * 3498,87 / \pi) * (5,58 / (4 * (1^{**}x - 11,30)^2 + 5,58^2))$ R ² = 0,48
		1-2	$Y = 101,91 + (1043,83 / 0,51) * (10,91 / 1^{**}x) * 12 * (10,91 * 1^{**}x) / 0,51 * \exp((-1^{**}x - 10,91) / 0,51)$ R ² = 0,65
		2-3	$Y = 9,10 + 471,38 / (2 * \pi) * 0,20 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 10,12))^2 / (2 * 0,20^2))$ R ² = 0,98
MAPPOL	60 % CC	0-1	$Y = 253,25 + 4826,35 / (2 * \pi) * 0,49 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 9,08))^2 / (2 * 0,49^2))$ R ² = 0,94
		1-2	$Y = 25,06 + 136,58 * (1 / (1 + \exp(-(1^{**}x - 54,06 + 96 / 2) / 0,03))) * (1 - 1 / (1 + \exp(-(1^{**}x - 54,06 - 96 / 2) / 49,49)))$ R ² = 0,85
		2-3	$Y = -0,95 + 1824,34 / (2 * \pi) * 0,95 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 50,83))^2 / (2 * 0,95^2))$ R ² = 0,81
MAPPOL	80 % CC	0-1	$Y = 439,89 + 7328,57 / (2 * \pi) * 0,34 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 9,89))^2 / (2 * 0,34^2))$ R ² = 0,98
		1-2	$Y = 124,21 + 802,12 / 3,50 * (\pi / (4 * \ln(2))) * \exp(-4 * \ln(2) * (1^{**}x - 12,18)^2 / 3,50^2)$ R ² = 0,60
		2-3	$Y = 19,17 + 407,49 / (2 * \pi) * 0,13 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 12,20))^2 / (2 * 0,13^2))$ R ² = 0,92
MAPTF	60 % CC	0-1	$Y = 183,30 + (9973,29 / 2,57) * (14,10 / 1^{**}x) * 12 * (14,10 * 1^{**}x) / 2,57 * \exp((-1^{**}x - 14,10) / 2,57)$ R ² = 0,99
		1-2	$Y = 34,19 + (1712,77 / 1,82) * (16,39 / 1^{**}x) * 12 * (16,39 * 1^{**}x) / 1,82 * \exp((-1^{**}x - 16,39) / 1,82)$ R ² = 0,72
		2-3	$Y = 12,97 + (298,37 / 0,18) * (11,51 / 1^{**}x) * 12 * (11,51 * 1^{**}x) / 0,18 * \exp((-1^{**}x - 11,51) / 0,18)$ R ² = 0,92
MAPTF	80 % CC	0-1	$Y = 121,35 + (9725,98 / 2,21) * (10,16 / 1^{**}x) * 12 * (10,16 * 1^{**}x) / 2,21 * \exp((-1^{**}x - 10,16) / 2,21)$ R ² = 0,84
		1-2	$Y = 22,90 + 2419,18 / (2 * \pi) * 0,63 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 16,59))^2 / (2 * 0,63^2))$ R ² = 0,86
		2-3	$Y = 20,12 + 579,88 / (2 * \pi) * 0,29 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 10,51))^2 / (2 * 0,29^2))$ R ² = 0,92
MAPBIO	60 % CC	0-1	$Y = 180,90 + (2 * 8936,71 / \pi) * (6,68 / (4 * (1^{**}x - 11,59)^2 + 6,68^2))$ R ² = 0,85
		1-2	$Y = 28,98 + 1349,62 / (2 * \pi) * 0,16 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 11,35))^2 / (2 * 0,16^2))$ R ² = 0,96
		2-3	$Y = 17,67 + 394,34 / (2 * \pi) * 0,16 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 12,36))^2 / (2 * 0,16^2))$ R ² = 0,87
MAPBIO	80 % CC	0-1	$Y = 182,36 + 3797,22 * (1 / (1 + \exp(-(1^{**}x - 8,36 + 2,10E-13 / 2) / 2,08))) * (1 - 1 / (1 + \exp(-(1^{**}x - 8,36 - 2,10E-13 / 2) / 9,28)))$ R ² = 0,95
		1-2	$Y = 95,02 + 1189,84 / (2 * \pi) * 0,20 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 11,82))^2 / (2 * 0,20^2))$ R ² = 0,66
		2-3	$Y = 18,52 + 669,63 / (2 * \pi) * 0,24 * 1^{**}x * \exp(-(\ln(1^{**}x / 10,79))^2 / (2 * 0,24^2))$ R ² = 0,96

CAPÍTULO 3

CAPACIDADES DE FORNECIMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS PREVIAMENTE ADUBADOS UTILIZANDO FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA

RESUMO

A maioria dos solos brasileiros apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P) e elevada capacidade de adsorção, sendo baixo o aproveitamento do P aplicado via adubação. Além da mineralogia, o tempo de contato, a fonte fertilizante e a tecnologia empregada também influenciam na disponibilidade de P no solo. Nesse sentido, o desenvolvimento de fertilizantes com tecnologia associada tem sido proposto para aumentar a eficiência da adubação fosfatada, a partir do encapsulamento do monoamônio fosfato (MAP) com polímero ou biochar ou adição de componentes orgânicos, como a torta de filtro. Este trabalho teve como objetivo avaliar o teor de P no solo extraído por água (tP_A) e Mehlich-1 (tP_M), massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}) e área foliar (AF1) na cultura do milho após incubação do solo com as fontes fosfatadas com tecnologia associada ao longo de 150 dias. Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas no espaço, com quatro repetições, sendo a parcela principal composta por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero - MAPPOL; MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar – MAPBIO) e a subparcela pelos tempos de incubação (15, 30, 60, 90, 120 e 150 dias). Foram realizados dois ciclos de cultivo sucessivos com duração de 30 dias. Devido às características de liberação, os fertilizantes com tecnologia associada produziram maiores tP_A em relação ao MAP, registrando médias de 31,48 e 26,10 mg dm⁻³, respectivamente. As tecnologias associadas também obtiveram maior tP_M em relação ao MAP, com médias de 273,04 e 194,44 mg dm⁻³, respectivamente. Os fertilizantes revestidos (MAPPOL e MAPBIO), em geral, promoveram maiores tP_A e tP_M em relação ao fertilizante com aditivo orgânico (MAPTF) ao longo dos 150 dias de incubação. O MAPBIO apresentou maiores tP_A e tP_M em relação ao MAPPOL durante o período avaliado. No primeiro ciclo de cultivo, o MAP obteve melhor resultado em relação às tecnologias associadas para as variáveis mMS_{PA1} e AF1, com médias de 14,59 g e 4061,28 cm² para o MAP e 14,2 g e 3513,63 cm² para as tecnologias associadas, respectivamente. Já no segundo ciclo de cultivo, de 30 dias, as tecnologias associadas obtiveram melhores resultados em relação ao MAP, com médias de 13,17 g e 3590,29 cm² para as tecnologias associadas e 11,83 g e 3822,22 cm² para o MAP, respectivamente. Para ambas as variáveis, os fertilizantes MAPPOL e MAPBIO obtiveram melhores resultados em relação ao MAPTF e por sua vez, o MAPBIO obteve melhores resultados em relação ao MAPPOL.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

PHOSPHORUS SUPPLY CAPACITIES IN PREVIOUSLY FERTILIZED SOILS USING PHOSPHATE FERTILIZERS WITH TECHNOLOGY

ABSTRACT

Most Brazilian soils have low availability of phosphorus (P) and high adsorption capacity, with low utilization of P applied via fertilization. In addition to mineralogy, contact time, fertilizer source and the technology used also influence the availability of P in the soil. In this sense, the development of fertilizers with associated technology has been proposed to improve the efficiency of phosphorus fertilization, from the encapsulation of monoammonium phosphate (MAP) with polymer or biochar or addition of organic components, such as filter cake. This work aimed to evaluate the soil P content extracted by water (tP_A) and Mehlich-1 (tP_M), shoot dry matter mass (mMS_{PA}) and leaf area (AF1), in corn cultivation, after soil incubation with phosphate sources with associated technology during 150 days. The treatments were arranged in subdivided plots in space, with four replications, the main plot consisting of four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - MAP, polymer coated MAP - MAPPOL; MAP + filter cake - MAPTF; MAP coated with biochar - MAPBIO) and the subplot by the incubation times (15, 30, 60, 90, 120 and 150 days). Two successive cultivation cycles lasting 30 days were conducted. Due to release characteristics, fertilizers with associated technology produced higher tP_A compared to MAP, recording averages of 31.48 and 26.10 mg dm⁻³, respectively. Associated technologies also obtained higher tP_M compared to MAP, with means of 273.04 and 194.44 mg dm⁻³, respectively. Coated fertilizers (MAPPOL and MAPBIO), in general, promoted higher tP_A and tP_M compared to fertilizer with organic additive (MAPTF) over the 150 days of incubation. MAPBIO showed higher tP_A and tP_M compared to MAPPOL during the evaluated period. In the first cultivation cycle, the MAP obtained better results in relation to the associated technologies for the variables mMS_{PA1} and AF1, with averages of 14.59 g and 4061.28 cm² for the MAP and 14.2 g and 3513.63 cm² for the associated technologies, respectively. In the second cultivation cycle, of 30 days, the associated technologies obtained better results in relation to the MAP, with averages of 13.17 g and 3590.29 cm² for the technologies and 11.83 g and 3822.22 cm² for the MAP, respectively. For both variables, MAPPOL and MAPBIO fertilizers obtained better results in relation to MAPTF and, in turn, MAPBIO obtained better results in relation to MAPPOL.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus

1. INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros apresentam acentuado grau de intemperismo e elevada capacidade de adsorção de fósforo (P), que ocorrem majoritariamente nos óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Santos et al., 2011; Fink et al., 2014). Além da mineralogia, a disponibilidade de P no solo é influenciada por outros fatores, tais como: tempo de contato (Broggi et al., 2014), fonte fertilizante (Lombi et al., 2005) e a tecnologia empregada, que confere ao produto final graus de solubilidade distintos.

O fenômeno de adsorção ocorre em menor intensidade em solos de fertilidade construída, em que a adubação localizada ao longo dos anos satura os sítios de adsorção de P, tornando-o P adicionado mais disponível às plantas. Contudo, grandes áreas de cultivo em regiões tropicais não se encontram nessas condições, o que abre espaço para discussão do fenômeno de adsorção de P e seus impactos na produtividade.

O grau de solubilidade da fonte fosfatada está diretamente relacionado à cinética de liberação de P, em que fontes solúveis, como o monoamônio fosfato (MAP), liberam rapidamente o P contido no grânulo fertilizante, que entram em contato com as argilas e majoram os fenômenos de adsorção, responsáveis por grandes perdas de P, que podem chegar a 90 % do que foi aplicado na primeira hora de contato com o solo (Gonçalves et al., 1985).

A retenção de P em suas formas lábeis no solo é favorável à utilização das plantas. Porém, o que se pretende com a adição de tecnologia é alterar cinética de liberação de uma fonte solúvel, promovendo a liberação do nutriente em condições mais propícias de ser difundido à zona radicular, como por exemplo maior conteúdo volumétrico de água no solo, o que aumenta disponibilidade de P, em especial pela redução da interação P-colóide no solo. Por esse mecanismo, diminui-se o tempo de contato do P com os argilominerais, aumentando a absorção das plantas e reduzindo as formas menos disponíveis pelo processo de adsorção (Wadt & Silva, 2011).

Dentre os mecanismos que alteram a cinética de liberação de P, de forma a propiciar sua liberação em um período maior de tempo, podemos citar o encapsulamento do MAP com polímero ou biochar ou adição de componentes orgânicos, como a torta de filtro peletizada.

O encapsulamento das fontes solúveis baseia-se no revestimento do grânulo a fim de se obter alteração da cinética de liberação da fonte solúvel, apresentando aumento de eficiência da adubação (Naz e Sulaiman, 2016). Por sua vez, a adição de material

orgânico às fontes fosfatadas solúveis também altera cinética de liberação de nutriente e os ácidos orgânicos provenientes do composto adicionado competem pelos sítios de adsorção de P na matriz do solo (Fernandes et al., 2015), além de aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) na região de liberação do nutriente.

Existe uma lacuna no conhecimento acerca da utilização de fertilizantes com tecnologia associada e sua eficiência. No caso dos fertilizantes revestidos com polímero, autores como Figueiredo et al (2012) encontraram incremento de produtividade de grãos de milho, em média, de 3,4 t ha⁻¹ em relação ao MAP convencional. Já em outros trabalhos não foram encontradas diferenças entre a fonte convencional e a revestida com polímero para o teor foliar de P e altura de plantas de milho (Gazola et al., 2013). Na cultura da cebola, Chagas et al (2016) não encontraram diferenças na massa de bulbos, teor de P e eficiência agrônômica quando se utilizam fontes convencionais e revestidas em solo argiloso, contudo, em solo arenoso o teor de P no bulbo e acúmulo de P foram influenciados pela presença de revestimento polimerizado.

A adição de torta de filtro às fontes convencionais tem mostrado resultados promissores, como aumento de produtividade de massa de matéria seca, de 30 %, na cultura da cana-de-açúcar (Borges et al., 2019). Outros autores vêm relatando que a associação de fontes inorgânicas de P a componentes orgânicos aumenta a disponibilidade de P no solo, o que leva a um aumento na produção das culturas (Caione et al., 2015).

Por sua vez, o bichar tem sido citado como material potencial para produção de fertilizantes com incremento no processo de liberação (Sharpley et al., 2015) e autores relatam aumentos de produtividade de até 39 % a partir da aplicação de 100 t ha⁻¹ de biocarvões (Jeffery et al., 2011). Porém, a quantidade de biochar utilizada por hectare é expressiva e por vezes, inviável aos produtores.

Como alternativa, pode-se produzir fertilizantes à base de biochar, o que já vem sendo testado, e verificou-se incremento de 40 % na biomassa do capim Marandu ao se utilizar biochar associado às fontes solúveis (Lustosa Filho et al., 2020). Porém, pouco se conhece sobre como o revestimento de uma fonte solúvel de P com biochar influencia a disponibilidade de P no solo e o rendimento das culturas.

Informações também são escassas acerca da disponibilização de P ao longo do tempo a partir da utilização de fontes fosfatadas com tecnologia associada e como essa disponibilização afeta o desenvolvimento das culturas. Posto isso, este trabalho teve como objetivo avaliar o teor de P no solo, produção de massa de matéria seca da parte aérea e

área foliar na cultura do milho após incubação do solo com as fontes fosfatadas com tecnologia associada ao longo de 150 dias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da UFES – Alegre (ES). Para a realização deste experimento foi coletada amostra subsuperficial (20 - 40 cm) de um Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa. A amostra do solo foi seca ao ar e passada em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar. Posteriormente foi realizada a caracterização química (Silva et al., 2009), física (Teixeira et al., 2017) e capacidade máxima de adsorção de P, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física e química de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (LVA) coletado na profundidade de 0-20 cm em Alegre ES

Característica	LVA
Argila (%) ^{1/}	54,64
Silte (%) ^{1/}	6,60
Areia grossa (%) ^{1/}	28,54
Areia fina (%) ^{1/}	10,22
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,20
pH-H ₂ O ^{3/}	5,22
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,10
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{5/}	1,82
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,07
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,17
K ⁺ (mg dm ⁻³) ^{6/}	60,00
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	3,10
CTC(t) (cmol _c dm ⁻³)	2,25
CTC(T) (cmol _c dm ⁻³)	5,30
V %	19,31
CMAp (mg/cm ³) ^{7/}	1,004

1/ Método da pipeta (Teixeira et al., 2017); 2/ Método da proveta (Teixeira et al., 2017); 3/ Relação solo-água 1:2,5; 4/ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; 5/ Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; 6/ Extrator Mehlich-1; 7/ Olsen e Watanabe (1957).

Após a caracterização, a amostra de solo foi separada em subamostras de 2,25 dm³, sendo estas acondicionadas, homogeneizadas e incubadas em sacos plásticos com calcário, a fim de elevar o pH a 6,0, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras foram incubadas durante 30 dias, mantendo-se a umidade do solo a 70 % da capacidade de campo. Após esse período, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas no espaço, com quatro repetições, sendo a parcela principal composta por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero - MAPPOL; MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar – MAPBIO) e a subparcela pelos tempos de incubação (15, 30, 60, 90, 120 e 150 dias). Como recipiente de plantio foram utilizados vasos de plástico com capacidade de 4,5 dm³. A dose de P utilizada nos tempos de incubação foi de 20 % da CMAP (200,8 mg dm⁻³ P). Os fertilizantes foram posicionados em linha, no centro do vaso, e a 5 cm de profundidade.

Foi utilizado como planta teste o milho, em que as sementes previamente embebidas em água por 24 horas foram plantadas no tempo 0, nos solos previamente incubados com as fontes fosfatadas. Em cada unidade experimental foram adicionadas 5 sementes de milho. No plantio foram coletadas as amostras do solo para se determinar a disponibilidade de P, que foi obtida realizando extração sequencial em água (*tP_A*) e Mehlich-1 (*tP_M*), respectivamente, na proporção solo-água 1:10.

Após a emergência das plântulas, as unidades experimentais receberam solução nutritiva contendo nitrogênio (na forma de NH₄NO₃), potássio (KCl), enxofre (CaSO₄), zinco (ZnCl₂), boro (H₃BO₃), manganês (MnCl₂), cobre (CuSO₄), molibdênio, (H₂MoO₄) e ferro (FeCl₃). As doses de nutrientes utilizadas foram: 100 mg dm³ N, 150 mg dm³ K, 50 mg dm³ S, 4 mg dm³ Zn, 0,81 mg dm³ B, 3,66 mg dm³ Mn, 1,33 mg dm³ Cu, 0,15 mg dm³ Mo e 1,53 mg dm³ Fe. As adubações foram divididas em 3 aplicações, que ocorreram nas três primeiras semanas de cada ciclo.

Foram realizados dois cultivos sucessivos de milho, com duração de 30 dias cada e teve como objetivo obter uma curva de resposta de produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA1* e *mMS_PA2*) e área foliar (AF1 e AF2) (Area meter, modelo 3100, LiCor) nas plantas coletadas, referindo-se, respectivamente, ao primeiro e segundo ciclos de cultivo.

Os dados foram submetidos à análise de variância. As fontes de fertilizantes foram avaliadas por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez & Alvarez, 2006), testados pelo teste F nos níveis de 1 e 5 % de probabilidade e os tempos de incubação foram analisados por regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fertilizantes com tecnologia associada obtiveram maior tP_A em relação ao MAP, registrando médias de 31,48 e 26,10 mg dm⁻³, respectivamente (Tabela 2 e C1, Tabela 3). As fontes com tecnologia associada também obtiveram maior tP_M (C1, Tabela 3), com médias de 273,04 e 194,44 mg dm⁻³, respectivamente.

Os melhores resultados das tecnologias associadas em relação ao MAP se devem, em grande parte, ao desempenho dos fertilizantes MAPPOL e MAPBIO, que registraram maiores médias em relação à fonte convencional (MAP) (Tabela 2).

A maior disponibilidade de P no solo observada pelas tecnologias associadas em relação à fonte convencional (C1, Tabela 3) se devem aos mecanismos de liberação, em especial a alteração da cinética de liberação de P. O nutriente liberado em condições mais propícias (p.e maior umidade do solo) permite sua maior disponibilidade e transporte, além de diminuir o tempo de contato com os óxidos de Fe e Al, reduzindo a intensidade de adsorção (Silva et al., 2012). Consequentemente, elevam-se os teores disponíveis de P no solo, conforme verificado pelas extrações sequenciais em água e Mehlich-1 (Tabela 2), podendo resultar em maior eficiência desses fertilizantes.

Essa alteração da cinética de liberação de P (Borges et al., 2019; Lustosa Filho et al., 2020) advinda das fontes com tecnologia associada é dependente dos mecanismos de controle de solubilização do fertilizante, que difere entre as fontes. O MAPBIO possui um revestimento externo, que por si só atua como uma barreira que altera a velocidade de liberação do nutriente, e o biochar é uma estrutura porosa e com capacidade de armazenamento de P (Schneider & Haderlein, 2016; Marcińczyk & Oleszczuk, 2022), o que contribui para uma liberação em um período maior de tempo (Li et al., 2020).

Tabela 2 - Valores médios de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF) em dois ciclos de cultivo (1 e 2) a partir da aplicação de quatro fontes fosfatadas sob diferentes conteúdos volumétricos de água

Variável	Tempo (dias)	Fertilizantes			
		MAP	MAPPOL	MAPTF	MAPBIO
<i>tP_A</i> (mg dm ⁻³)	15	123,36	134,11	59,14	133,34
	30	20,54	15,07	34,56	40,03
	60	5,18	12,38	29,28	39,74
	90	4,32	12,29	6,05	10,66
	120	1,73	11,71	6,91	3,65
	150	1,44	11,62	2,50	3,55
	Média		26,10	32,86	23,07
<i>tP_M</i> (mg dm ⁻³)	15	669,63	930,67	353,33	1001,33
	30	277,33	297,33	326,67	340,00
	60	94,00	284,00	217,33	333,33
	90	83,33	232,00	34,67	325,33
	120	20,00	58,67	24,00	65,33
	150	22,67	49,33	20,00	21,33
	Média		194,44	308,67	162,67
<i>mMS_PA1</i> (g)	15	15,06	14,48	14,70	15,66
	30	14,81	14,47	13,57	14,92
	60	14,70	14,40	13,29	14,49
	90	14,58	14,23	13,26	14,32
	120	14,29	13,94	13,13	14,25
	150	14,13	13,77	13,08	14,14
	Média		14,59	14,21	13,51
AF1 (cm ²)	15	4300,00	4000,00	3585,00	4685,00
	30	4283,33	3950,00	3153,33	4116,67
	60	4226,67	3826,67	3129,67	3342,33
	90	4125,33	3778,67	2946,67	3340,00
	120	3802,33	3666,67	2913,33	3230,00
	150	3630,00	3540,67	2884,00	3156,67
	Média		4061,28	3793,78	3102,00
<i>mMS_PA2</i> (g)	15	12,83	15,58	13,82	14,39
	30	12,26	15,56	13,67	13,49
	60	11,83	14,81	13,63	13,18
	90	11,63	12,30	12,06	12,29
	120	11,35	12,22	12,04	12,03
	150	11,10	12,11	12,02	11,92
	Média		11,83	13,76	12,87
AF2 (cm ²)	15	4233,33	5300,00	4030,00	4605,00
	30	4200,00	4910,33	3302,33	3767,67
	60	3540,00	3600,33	3166,33	3650,00
	90	2653,33	3553,33	3105,33	3476,00
	120	2583,33	2931,00	3080,33	3303,33
	150	2483,33	2723,33	2888,33	3232,67
	Média		3282,22	3836,39	3262,06

MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar.

Tabela 3 - Contrastes médios (Ci) da influência das fontes de fertilizantes na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF) em dois ciclos de cultivo (1 e 2)

Variáveis	C1	C2	C3
<i>tP_A</i> (mg dm ⁻³)	5,38**	12,61**	-5,64**
<i>tP_M</i> (mg dm ⁻³)	78,60**	165,55**	-39,11**
<i>mMS_PA1</i> (g)	-0,47*	0,91**	-0,42 ^{ns}
AF1 (cm ²)	-574,65**	617,45**	148,67 ^{ns}
<i>mMS_PA2</i> (g)	1,34**	0,45**	0,88**
AF2 (cm ²)	308,07**	492,35**	163,95 ^{ns}

C1: (MAPPOL + MAPTF + MAPBIO) vs MAP; C2: (MAPPOL + MAPBIO) vs MAPTF; C3: MAPPOL vs MAPBIO; MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar; ** e * significativos a 1 e 5 %, respectivamente e ns, não significativo.

O revestimento polimérico no MAPPOL, além de ser uma barreira física contra a perda de P, é responsivo à umidade do solo, alterando a sua taxa de solubilização de acordo com o conteúdo volumétrico do meio (Mikula et al., 2020). Por sua vez, a torta de filtro é um material orgânico, com alta CTC e os componentes da matéria orgânica são capazes de influenciar na disponibilização de P (Singh et al., 1988). Somado a isso, o processo de produção do MAPTF gera um produto peletizado, o que também influencia no processo de solubilização e liberação do nutriente.

Machado et al. (2011) verificaram resultado semelhante a este trabalho, em que o uso de MAP revestido com polímero aumentou a disponibilidade de P ao longo do tempo. Lustosa Filho et al (2020) concluíram que a incorporação de biochar a uma fonte solúvel é capaz de influenciar a cinética de liberação de P, reduzindo o tempo de contato com os óxidos de Fe e Al. Dessa forma, aumenta-se a fração lábil de P após o cultivo, principalmente em solos com quantidades substanciais de óxidos de Fe e Al cristalinos, como o solo utilizado neste estudo.

Além disso, a adição de matéria orgânica a uma fonte solúvel, como a torta de filtro utilizada neste trabalho, libera ácidos orgânicos no meio, que, ao ocuparem os sítios de adsorção de P, diminuem a adsorção e, conseqüentemente, a formação de compostos não lábeis com os óxidos de Fe e Al, aumentando assim a disponibilidade de P para as plantas (Andrade et al., 2003).

No primeiro ciclo de cultivo, o MAP proporcionou melhores resultados em relação às tecnologias associadas para as variáveis *mMS_PA1* e AF1 (C1, Tabela 3), com médias

de 14,59 g 4061,28 cm² para o MAP e 14,2 g e 3513,63 cm² para as tecnologias associadas, respectivamente (Tabela 2). Já no segundo ciclo de cultivo, de 30 dias, os resultados obtidos pelas tecnologias associadas foram melhores em relação ao MAP, com médias de 13,17 g e 3590,29 cm² para as tecnologias associadas e 11,83 g 3822,22 cm² para o MAP, respectivamente.

Observa-se que, de maneira geral, os melhores resultados foram registrados pelas tecnologias associadas no segundo ciclo de cultivo, o que demonstra a função da tecnologia associada em alterar a cinética de liberação de P, prolongando o tempo de liberação, permitindo assim que as plantas produzissem maior *mMS_PA* e AF.

Essa alteração na cinética de liberação de P e aumento de produtividade foi proporcionado pela utilização do revestimento (Borsari, 2013) ou adição de componente orgânico (Borges et al., 2019) serem capazes de reduzir a intensidade dos fenômenos de adsorção (Almeida et al., 2012), alterando a disponibilidade do nutriente às plantas e otimizando o uso eficiente dos fertilizantes por um maior período de tempo. Cabe destacar que cada cultivo teve duração de 30 dias, e não o ciclo produtivo da cultura do milho.

Outros autores já vêm relatando aumento de produtividade a partir da utilização de fertilizantes com tecnologia associada. Lustosa Filho et al (2019), avaliando a eficiência de fertilizantes organominerais à base superfosfato triplo e biochar com incubação de 100 dias, concluíram que apenas no segundo e terceiro ciclos de cultivo todos os fertilizantes organominerais promoveram maior rendimento de biomassa e acúmulo de P pelo capim marandu em relação à fonte solúvel. Os autores atribuem esses resultados às características de liberação de P, fenômeno este observado neste trabalho pelas demais tecnologias associadas utilizadas.

Souza et al. (2014) verificaram aumento de produtividade da soja, de 448 kg ha⁻¹ (incremento de 25,7 %), a partir da utilização de MAP revestido com polímero. Já Borges et al (2019) encontraram que a adição de torta de filtro à fonte fosfatada solúvel aumentou a produtividade de massa de matéria seca da cana-de-açúcar em aproximadamente 30 %.

Os fertilizantes revestidos, MAPPOL e MAPBIO, geraram melhores resultados em relação ao MAPTF para as variáveis *tP_A* e *tP_M* (C2, Tabela 3), registrando médias de 35,68 e 23,07 mg dm⁻³ para *tP_A*, respectivamente (Tabela 2), sendo este resultado 54,66 % superior. Para o *tP_M*, os fertilizantes revestidos apresentaram média de 328,22 mg dm⁻³ e o MAPTF, 162,67 mg dm⁻³, resultado 101,77 % superior. Nota-se, a partir desses resultados, cinéticas de liberação de nutriente distintas entre os fertilizantes revestidos e com aditivo orgânico.

No primeiro ciclo de cultivo, o MAPPOL e MAPBIO obtiveram melhores resultados em relação ao MAPTF para as variáveis *mMS_PA1* e *AF1* (C2, Tabela 3), com médias de 14,42 g e 3719,44 cm² para os fertilizantes revestidos e 13,51 g e 3102,00 cm² para o MAPTF, respectivamente (Tabela 2). No segundo ciclo de cultivo, o MAPPOL e o MAPBIO também obtiveram melhores resultados em relação ao MAPTF (C2, Tabela 3), com médias de 13,32 g e 3754,42 cm² para MAPPOL e MAPBIO e 12,87 g e 3262,06 cm² para o MAPTF, respectivamente, para as variáveis *mMS_PA2* e *AF2*.

No caso dos fertilizantes com tecnologia associada, apesar de promoverem a alteração da cinética de liberação do nutriente, a taxa de liberação é bem diversa entre as fontes, o que nos ajuda a compreender sua melhor utilização para cultura de ciclo curto ou perene e até mesmo a associação entre fontes com tecnologia associada.

No caso dos fertilizantes revestidos, as estruturas de revestimento agem naturalmente como uma barreira que impede a rápida solubilização do grânulo, como no caso do MAPBIO, e até podem ser responsivas à umidade, como no caso do MAPPOL (Fernández-Pérez, et al., 2008). Assim sendo, o nutriente é liberado quando o conteúdo volumétrico de água aumenta (Borges et al., 2019), reduzindo a interação P-coloide e aumentando a disponibilidade de P (Silva et al., 2012).

Os valores de liberação de P mais baixos observados pelo MAPTF em relação aos fertilizantes revestidos podem estar relacionados ao fato do processo de produção gerar um produto peletizado, e, conseqüentemente, mais denso e com menor solubilidade. Além disso, por se tratar de um aditivo orgânico e não um revestimento, pode haver maior área de contato do P com a torta de filtro, o que altera a dinâmica de P.

Como era de se esperar, uma menor disponibilidade de P para as plantas registrado pelo MAPTF em relação aos fertilizantes revestidos (MAPPOL e MAPBIO) promoveu menor produção de *mMS_PA* e menor expansão da *AF* em ambos os ciclos de cultivo, fato este relacionado à uma provável menor absorção de P pela cultura do milho. Outros autores observaram que o aumento do teor de P disponível no solo até certo ponto aumenta a produtividade das culturas (Chagas et al., 2016).

O fertilizante MAPBIO promoveu melhores resultados em relação ao MAPPOL para as variáveis *tP_A* e *tP_M* (C3, Tabela 3), registrando médias de 38,50 e 32,86 mg dm⁻³ para *tP_A*, respectivamente, sendo este resultado 17,16 % superior e 347,78 e 308,67 mg dm⁻³ para *tP_M*, respectivamente, resultado 12,67 % superior.

Apesar dos melhores resultados obtidos pelo MAPBIO para as variáveis *tP_A* e *tP_M*, os fertilizantes não se diferenciaram para produção de massa de matéria seca e área foliar

nos dois ciclos de cultivo, exceto para a variável *mMS_PA2* (C3, Tabela 3), em que o MAPPOL obteve melhor resultado em relação ao MAPBIO.

Esse resultado demonstra que ambas as tecnologias associadas foram eficientes em disponibilizar P para a cultura do milho durante o período experimental, contudo, existem diferenças entre os funcionamentos de cada um dos revestimentos que podem ter resultado em maior valor de *mMS_PA2* para o MAPPOL. O revestimento do MAPPOL possui maior sensibilidade ao conteúdo volumétrico de água, permitindo a liberação de P em condições mais propícias à sua difusão (Borsari, 2013), o que pode ter levado a uma maior absorção no segundo ciclo de cultivo.

A variação do *tP_A*, *tP_M*, *mMS_PA1*, AF1, *mMS_PA2* e AF2 em função dos tempos de incubação do solo com as quatro fontes fosfatadas é apresentado na figura 1 a seguir. Observa-se resposta diversificada das regressões obtidas, tendo ajustes exponenciais e sigmoidais, o que pode estar relacionado à cinética de liberação de P e o desenvolvimento inicial das plantas de milho.

Para todos os fertilizantes, os maiores valores de *tP_A* foram observados no 15° dia de incubação (Figura 1-a) e a maior depleção ocorreu do 15° ao 30° dia de incubação. No 30° dia de incubação, o MAPPOL registrou valores 88,8 % menores em relação ao 15° dia, seguido do MAP (83,1 %), MAPBIO (69,5 %) e MAPTF (47,7 %). A partir do 30° dia, os valores de *tP_A* tenderam a uma estabilização, sendo as médias registradas pelo MAP inferior às tecnologias associadas.

De forma análoga, os maiores valores de *tP_M* também foram registrados no 15° dia de incubação (Figura 1-b), com médias de 1001,33; 930,67; 669,63 e 3653,33 mg dm⁻³ para MAPBIO, MAPPOL, MAP e MAPTF (Tabela 2). Do 30° ao 150° dia de incubação, os resultados de *tP_M* tendem a se estabilizar a valores muito próximos, porém, durante todo este intervalo as maiores médias foram registradas pelo MAPBIO, seguido do MAPPOL, MAPTF e MAP.

Os resultados obtidos nas variáveis *tP_A* e *tP_M* são condizentes, em que solos com predomínio de óxidos de Fe e Al possuem elevada capacidade de adsorção de P (Novais et al., 2007; Abdala et al., 2015), ocorrendo interação do nutriente com sítios específicos de adsorção dos óxidos. A adsorção em um primeiro momento é caracterizada pela formação de complexos monodentados e com o passar do tempo, formam-se complexos bidentados que resultam na formação de P não-lábil (Parfitt, 1989; Novais et al., 2007), ou seja, de baixa reversibilidade do ponto de vista agrônômico.

A partir das análises dos modelos matemáticos (Figura 1-a e 1-b) observa-se que os menores valores de tP_A e tP_M são observados no MAP, fenômeno esse atribuído à maior solubilidade do fertilizante, que eleva inicialmente os teores de P no solo, favorecendo o fenômeno de adsorção. Já as tecnologias associadas, em especial os fertilizantes revestidos, por alterarem a taxa de liberação de P, proporcionaram teores de P recuperados por água e Mehlich-1 mais elevados em relação à fonte solúvel em todos os tempos avaliados, o que demonstra a capacidade da tecnologia associada em melhor compatibilizar a demanda da planta com o fornecimento do nutriente.

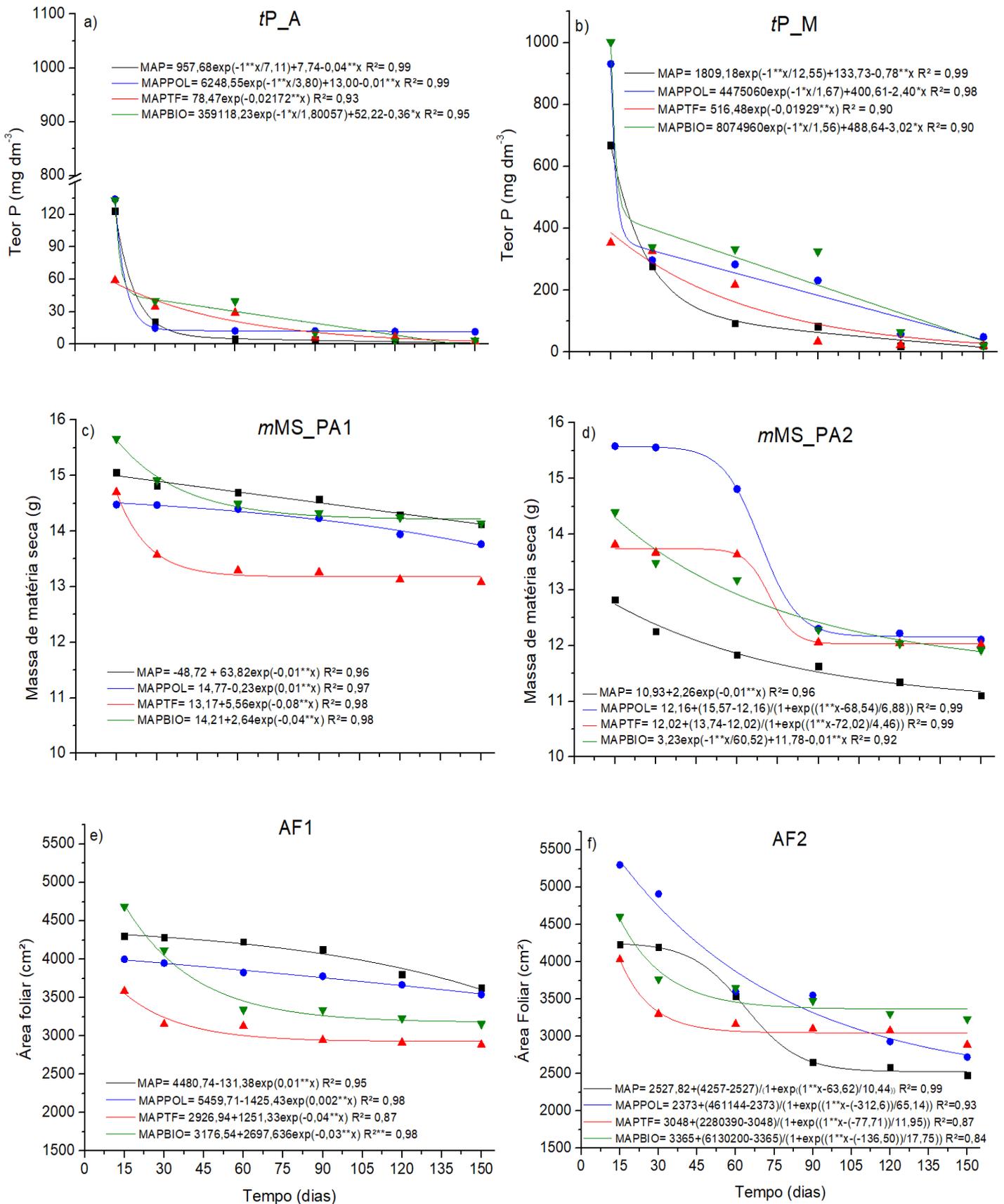


Figura 1 - Efeito do tempo de contato em função das quatro fontes de fertilizantes fosfatados nas variáveis tP_A , tP_M , mMS_PA1 , AF1, mMS_PA2 e AF2.

Legenda: ■ MAP, ● MAPPOL, ▲ MAPTF e ▼ MAPBIO

No primeiro ciclo de cultivo de 30 dias, o MAP, em geral, apresentou os melhores resultados de *mMS_PA1* (Figura 1-c) e AF1 (Figura 1-d), seguido dos fertilizantes revestidos (MAPPOL e MAPBIO) e MAPTF. Já no segundo ciclo, o MAPPOL proporcionou os melhores resultados para a variável *mMS_PA2* (Figura 1-e), e os fertilizantes MAPBIO e MAPTF oscilaram entre os tempos de incubação. Os resultados de AF2 (Figura 1-f), especialmente após o 75° dia de incubação, são inferiores para o MAP em relação às tecnologias associadas.

Os resultados obtidos pelas fontes com tecnologia associada no segundo ciclo de cultivo sugerem que o padrão de liberação de P tenha contribuído para o aumento de formas mais lábeis (Lombi et al., 2006) resultando em maior absorção do nutriente pelas plantas e incrementos nas variáveis morfológicas.

CONCLUSÃO

Os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram maiores teores de P em água e Mehlich-1 em relação à fonte convencional.

Os fertilizantes revestidos aumentaram os teores de P no solo, extraídos em água e Mehlich-1, em relação ao fertilizante com aditivo orgânico (MAPTF) ao longo dos 150 dias de incubação. Pode-se sugerir uso combinado de fontes revestidas e com aditivo orgânico para suprimento imediato e a longo prazo de P.

O MAPBIO apresentou maiores teores de P no solo por ambos os extratores em relação ao MAPPOL durante o período avaliado.

Os fertilizantes com tecnologia associada promoveram maior *mMS_PA* e AF no segundo ciclo de cultivo, o que indica maior absorção pelas plantas após 30 dias de cultivo. Em ambos os ciclos de cultivo os fertilizantes revestidos produziram maior *mMS_PA* e AF em relação ao MAPTF.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, D. B., NORTHRUP, P. A., ARAI, Y., & SPARKS, D. L. Surface loading effects on orthophosphate surface complexation at the goethite/water interface as examined by extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) spectroscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 437:297–303, 2015.
- ALABI, K. E., SORENSEN, R. C., KNUDSEN, D., & REHM, G. W. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*, 50:937–94, 1986.
- ALVAREZ, V. V. H., & ALVAREZ, G. A. M. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 3:24-33, 2006.
- ALMEIDA, B. G., DONAGEMMA, G. K., RUIZ, H. A., BRAIDA, J. A., VIANA, J. H. M., REICHERT, J. M. M., OLIVEIRA, L. B., CEDDIA, M. B., WADT, P. S., FERNANDES, R. B. A., PASSOS, R. R., DECHEN, S. C. F., KLEIN, V. A., TEIXEIRA, W. G. *Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.
- ANDRADE, F. V., MENDONÇA, E. S., ALVAREZ, V. H., & NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 27:1003-11, 2003.
- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes: As novas tecnologias permitem o consumo dos nutrientes pelas plantas de forma gradativa, lenta e controlada. *Agro DBO*, 54-7, 2013.
- BROGGI, F., DE OLIVEIRA, A. C., FREIRE, F. J., DE OLIVEIRA, E. C. A., DA ROCHA, A. T., & DOS SANTOS FREIRE, M. B. G. (2014). Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *Revista Caatinga*, 27:164-170, 2014.
- CAIONE, G., PRADO, R. D. M., CAMPOS, C. N. S., ROSATTO MODA, L., DE LIMA VASCONCELOS, R., & PIZAURO JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a Red Ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. *The Scientific World Journal*, 2015.
- CHAGAS, W. F. T., GUELFY, D. R., EMRICH, E. B., SILVA, A. L., & FAQUIN, V. Agronomic efficiency of polymer-coated triple superphosphate in onion cultivated in contrasting texture soils. *Revista Ciência Agronômica*, 47:439-446, 2016.
- FERNANDES, D. M., GROHSKOPF, M. A., GOMES, E. R., FERREIRA, N. R., & BÜLL, L. T. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. *Irriga*, 1:14-27, 2015.
- FERNÁNDEZ-PÉREZ, M., VILLAFRANCA-SÁNCHEZ, M., FLORES-CÉSPEDES, F., & DAZA-FERNÁNDEZ, I. Ethylcellulose and lignin as bearer polymers in

- controlled release formulations of choridazon. *Carbohydrate Polymers*, 83:1672-1679, 2011.
- FIGUEIREDO, C. C. D., BARBOSA, D. V., OLIVEIRA, S. A. D., FAGIOLI, M., & SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*, 43:446-452, 2012.
- FINK, J. R., INDA, A. V., BAYER, C., TORRENT, J., & BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 36:379-387, 2014.
- GAZOLA, R.N., BUZETTI, S., DINALLI, R. P., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., & DE SOUZA CELESTRINO, T. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60:876-884, 2013.
- GONÇALVES, J. M., FIRME, D. J., NOVAIS, R. F., & RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 9:107-111, 1985.
- JEFFERY, S., VERHEIJEN, F. G., VAN DER VELDE, M., & BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144:175-187, 2011.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LOMBI, E., MCLAUGHLIN, M. J., JOHNSTON, C., ARMSTRONG, R. D., & HOLLOWAY, R. E. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil*, 269:25-34, 2005.
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of The Total Environment*, 709:136028, 2020.
- MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Availability curves of phosphorus in soils with diferente textures after application of increasing doses of monoammonium phosphate. *Bioscience Journal*, 27: 70-76, 2011.
- MARCIŃCZYK, M., & OLESZCZUK, P. Biochar and engineered biochar as slow-and controlled-release fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 130685, 2022.
- MIKULA, K., IZYDORCZYK, G., SKRZYPCZAK, D., MIRONIUK, M., MOUSTAKAS, K., WITEK-KROWIAK, A., & CHOJNACKA, K. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. *Science of The Total Environment*, 712: 136365, 2020.
- NAZ, Y. M., & SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: A review. *Journal of Controlled Release*, 225:109-120, 2016.

- NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., & NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OLSEN, S. R., & WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society of America Journal*, 21:144-149, 1957.
- PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of the Soil Science*, 40:359-369, 1989.
- SANTOS, H. C., OLIVEIRA, F. H. T., SALCEDO, I. H., SOUZA, A. P., & SILVA, V. D. M. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1301-1310, 2011.
- SCHNEIDER, F., & HADERLEIN, S. B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus-mechanistic insights. *Geoderma*, 277:83-90, 2016.
- SHARPLEY, A. N., BERGSTRÖM, L., ARONSSON, H., BECHMANN, M., BOLSTER, C. H., BÖRLING, K., ... & TONDERSKI, K. S. (2015). Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. *Ambio*, 44:163-179, 2015.
- SILVA, C. S., SILVA-FILHO, F. C., SANTOS, A. D., COSCIONE, A., VITTI, A., BOARETTO, A., ... & CARMO, C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2009.
- SILVA, A. D. A., SILVA, T. S., VASCONCELOS, A. C. P. D., & LANA, R. M. Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*, 28:240-250, 2012.
- SOUZA, J. R. DE, RIBEIRO, B. N., RAPOSO, T. P., FIORIN, J. E., CASTRO, G. S. A., & MAGALHÃES, R. S. Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja. *Acta Iguazu*, 9:3-1, 2014.
- SINGH, Y., SINGH, B., MASKINA, M. S., & MEELU, O. P. Effect of organic manures, crop residues and green manure (*Sesbania aculeata*) on nitrogen and phosphorus transformations in a sandy loam at field capacity and under waterlogged conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 6:183-187, 1988.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 4, 2017.
- WADT, P. Q. S., & SILVA, L. M. Determinação do Fósforo Remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 5p. (Embrapa Acre. Comunicado técnico, 178, 2011.

CAPÍTULO 4

UMIDADE NA DISPONIBILIZAÇÃO DE P EM FERTILIZANTES COM TECNOLOGIA ASSOCIADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE *Coffea canephora*

RESUMO

Os solos de regiões tropicais são, em geral, muito intemperizados e apresentam predominância de óxidos de ferro e alumínio na fração argila, majorando os fenômenos de adsorção e ocasionando em baixa disponibilidade de fósforo (P). A eficiência da adubação fosfatada pode ser melhorada empregando-se tecnologias associadas às fontes solúveis, como o revestimento com polímeros ou biochar, ou uso de aditivos, como a torta de filtro. Objetivou-se com esse trabalho avaliar a massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}), teor de P nas folhas (tP_F), conteúdo de P na parte aérea (cP_{PA}) e área foliar (AF) do cafeeiro a partir da utilização de fontes fosfatas com tecnologia associada aplicadas em solo de textura argilosa, em 3 conteúdos volumétricos de água. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo o esquema fatorial 4 x 3, em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar – MAPBIO; MAP revestido com polímero – MAPPOL) e três conteúdos de água no solo (60, 70 e 80 % da capacidade de campo - CC). De maneira geral, os fertilizantes com tecnologia associada foram mais eficientes em relação ao MAP a 60 e 70 % CC, resultado atribuído aos mecanismos de liberação das fontes com tecnologia associada. O MAPPOL obteve melhores resultados em relação aos fertilizantes organominerais para todas as variáveis analisadas, mas quando se leva em consideração o conteúdo volumétrico de água no solo observa-se que de maneira geral o MAPPOL foi mais eficiente em relação aos organominerais a 60 e 70 % CC. O fertilizante MAPTF obteve as maiores médias em relação ao MAPBIO para todas as variáveis quando o solo era mantido a 60 % CC, a 70 % CC foi mais eficiente para o cP_{PA} e AF e a 80 % CC para as variáveis mMS_{PA} , cP_{PA} e AF. O MAPPOL foi mais eficiente em relação ao MAP a 60 e 70 % CC.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

**HUMIDITY IN THE AVAILABILITY OF P IN FERTILIZERS WITH
ASSOCIATED TECHNOLOGY IN THE INITIAL DEVELOPMENT OF *Coffea
canephora***

ABSTRACT

Soils in tropical regions are, in general, very weathered and have a predominance of iron and aluminum oxides in the clay fraction, increasing adsorption phenomena and causing low phosphorus (P) availability. The efficiency of phosphate fertilization can be improved using associated technologies in soluble sources, such as coating with polymers or biochar, or the use of additives, such as filter cake. The objective of this work was to evaluate the dry matter mass of the aerial part (mMS_{PA}), P content in the leaves (tP_F), P content in the aerial part (cP_{PA}) and Leaf Area (AF) of the coffee from the use of phosphate sources with associated technology applied in clayey soil in 3 volumetric water contents. The experimental design used was in randomized blocks, with four replications, following a 4 x 3 factorial scheme in which the factors under study were: four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate – MAP, MAP + filter cake – MAPTF; MAP coated with biochar – MAPBIO; polymer coated MAP – MAPPOL) and three soil water contents (60, 70 and 80 % of field capacity - CC). In general, fertilizers with associated technology were more efficient in relation to MAP at 60 and 70% CC, a result attributed to the release mechanisms of sources with associated technology. When analyzing the results of phosphate sources, MAPPOL obtained better results in relation to organomineral fertilizers for all analyzed variables, but when taking into account the volumetric content of water in the soil, it is observed that in general MAPPOL was more efficient in relation to organominerals at 60 and 70 % CC. The MAPTF fertilizer obtained the highest averages in relation to MAPBIO for all variables when the soil was maintained at 60 % CC, at 70 % CC it was more efficient for cP_{PA} and AF and at 80 % CC for the variables mMS_{PA} , cP_{PA} and AF. MAPPOL was more efficient than MAP at 60 and 70 % CC.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 55 % dos fertilizantes fosfatados utilizados em lavouras brasileiras são produto de importação e a fonte fosfatada mais utilizada é o monoamônio fosfato (MAP), que representou importação de 4,8 Mt em 2020, volume 25 % acima do total de 2019 (GlobalFert, 2020). Esse aumento no consumo de fertilizantes ocorre devido à expansão do agronegócio, em que apenas a indústria cafeeira apresentou consumo médio de 540 kt de fertilizantes apenas em 2017 (Anda, 2021).

As fontes de fertilizantes fosfatados comumente aplicadas, como o MAP, possuem alta solubilidade em um curto período de tempo, o que pode potencializar as perdas de P por adsorção. Essas perdas podem chegar a 90 % do que foi aplicado nas primeiras horas de contato com o solo (Gonçalves et al., 1985), sendo baixo o aproveitamento do P via adubação química, o que aumentam os custos e geram impactos sobre a produtividade (Amaral et al., 2011). Cabe destacar que grande parte dos solos brasileiros não possuem fertilidade construída ao longo de cultivos sucessivos, o que torna relevante as discussões sobre adsorção.

Para melhorar a eficiência da adubação fosfatada tem-se utilizado fertilizantes com tecnologia associada (Niemi et al., 2015), que consistem em criar mecanismos que alteram a cinética de liberação de P de uma fonte solúvel, de forma a melhor compatibilizar a demanda da planta, o fornecimento do nutriente e condições de solo (p.e. umidade do solo), evitando sua solubilização em curto período de tempo e minorando os fenômenos de adsorção (Fertahi et al., 2021).

Dentre as principais tecnologias associadas para aumentar a eficiência do uso de P pelas culturas e reduzir as perdas no sistema solo-planta podemos citar a adição de componente orgânico à fonte fertilizante, como torta de filtro (Borges et al., 2019) ou biochar (Li et al., 2020); ou revestimento dos grânulos dos fertilizantes por polímeros sintéticos (Figueiredo et al., 2012).

A utilização de polímeros baseia-se na proteção física do fertilizante, promovendo a liberação por um período maior de tempo e em condições que favorecem seu transporte no solo (Gazola et al., 2013). Através desse mecanismo também se pode obter uma cinética de liberação de nutriente mais compatível com a demanda da planta (Cahill et al. 2010) em relação aos fertilizantes fosfatados convencionais.

O revestimento do MAP com biochar ou a adição de torta de filtro também são capazes de alterar os mecanismos de liberação de P do fertilizante (Borges et al., 2019), pois o

aumento de cargas negativas proporcionado pelo acréscimo de matéria orgânica tem fundamental importância na dinâmica de P, pois reduz a intensidade de adsorção deste elemento no solo e permite sua maior disponibilidade para as plantas.

Autores têm relatado aumento de eficiência da adubação a partir da aplicação de tecnologia associada a uma fonte solúvel, como o aumento de produção de massa da matéria seca total, altura de planta e produtividade de grãos a partir da aplicação de MAP revestido com polímero (Figueiredo et al., 2012).

Borges et al. (2019) verificaram que a utilização de uma fonte fosfatada sem adição de torta de filtro teve produção de massa de matéria seca da cana de açúcar de 67 g por vaso, enquanto a adição de torta de filtro às fontes fosfatadas promoveu produtividade de 98 g por vaso. Os autores concluíram que a utilização da torta de filtro teve efeito benéfico na redução da intensidade de adsorção de P, impedindo a formação de fases mais termodinamicamente estáveis, aumentando a disponibilidade de P e o suprimento às plantas.

Lustosa Filho et al (2020) verificaram que a aplicação de biochar a uma fonte solúvel aumentou em 40 % o rendimento de biomassa de *Brachiaria brizantha* no segundo ciclo de cultivo.

Porém, o fornecimento do nutriente por cada uma dessas tecnologias associadas é dependente, em grande parte, do conteúdo volumétrico de água no solo e dos mecanismos de solubilidade de cada uma dessas fontes com tecnologia associada, podendo apresentar cinética de liberação de nutriente diversa entre elas. Os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada já são comercializados no Brasil com a promessa de serem mais eficientes e aumentarem a produtividade das culturas. Porém, são escassas informações sobre a eficiência de cada uma dessas tecnologias associadas em diferentes condições de umidade no solo.

Objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados no cultivo de café em vaso com solo de textura argilosa em três conteúdos volumétricos de água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da UFES - Alegre (ES). Foi coletada amostra de um Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa (LVA), na profundidade de 20 a 40 cm, para a caracterização química (Silva et al., 2009), física

(Teixeira et al., 2017) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (Olsen e Watanabe, 1957) (Tabela 1).

Após a caracterização química, a amostra de solo foi dividida em subamostras de 4 dm³ e acondicionadas em sacos plásticos, homogeneizadas e incubadas com calcário, a fim de elevar o pH a 6,0, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras foram incubadas durante 30 dias, mantendo-se a umidade do solo a 70 % da capacidade de campo. Após esse período, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo o esquema fatorial 4 x 3 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar de palha de café pirolisado a 400 °C – MAPBIO; MAP revestido com polímero – MAPPOL) e três conteúdos de água no solo (60, 70 e 80 % da capacidade de campo - CC). A dose de P aplicada correspondeu a 20 % da CMAP (134,6 mg dm⁻³ P). As fontes de P foram padronizadas por meio de passagem em peneira de 4 mm e retenção na peneira de 2 mm.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos plásticos geminados (Ruiz et al., 1988), segundo a figura 1 a seguir, constituídos de duas unidades (A e B), de 12 dm³ cada. A unidade A continha solução nutritiva (Hoagland & Arnon, 1950) para fornecer à planta o suprimento efetivo de macronutrientes (exceto P), micronutrientes e água, necessários ao seu crescimento. A solução nutritiva foi adaptada à cultura do cafeeiro, sendo utilizado inicialmente 25 % da concentração no primeiro mês, 50 % no segundo mês e 100 % no tempo restante. A unidade A foi arejada continuamente e coberta por uma tampa para evitar a perda de água por evaporação.

A unidade B recebeu o solo com os tratamentos e um sensor de umidade (modelo 5TE da Decagon Devices), para monitoramento do conteúdo volumétrico de água. O conteúdo volumétrico de água de cada unidade experimental foi monitorado diariamente e então, adicionava-se a quantidade de água referente a cada tratamento.

Os fertilizantes foram posicionados a 10 cm de profundidade e espalhados em toda a área do vaso referente a essa profundidade. Os sensores, por sua vez, também foram posicionados a 10 cm de profundidade e ao centro do vaso, com o intuito de melhor controlar a umidade na profundidade em que os fertilizantes se encontravam, ou seja, na região de liberação de P.

Tabela 1 - Caracterização física e química de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura argilo-arenosa coletado na profundidade de 0-40 cm em Alegre ES

Característica	LVA
Argila (%) ^{1/}	46,60
Silte (%) ^{1/}	4,10
Areia grossa (%) ^{1/}	30,40
Areia fina (%) ^{1/}	18,90
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,14
pH-H ₂ O ^{3/}	5,72
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,00
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{5/}	4,04
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	1,05
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,59
K ⁺ (mg dm ⁻³) ^{6/}	19,00
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,23
CTC(t) (cmol _c dm ⁻³)	1,70
CTC(T) (cmol _c dm ⁻³)	5,74
V %	29,63
CMAP (mg/cm ³) ^{7/}	0,673

1/ Método da pipeta (Teixeira et al., 2017); 2/ Método da proveta (Teixeira et al., 2017); 3/ Relação solo-água 1:2,5; 4/ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; 5/ Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; 6/ Extrator Mehlich-1; 7/ Olsen e Watanabe (1957)



Figura 1: Esquema da montagem do experimento em vaso geminado (Unidade A com solução nutritiva, sem P e Unidade B com solo).

A planta teste utilizada foi o café Conilon clone A1. Foram utilizadas mudas com aproximadamente 4 meses de cultivo, transplantadas em cada unidade experimental, com distribuição das raízes entre as unidades A e B. Para reduzir o estresse dessa operação, a porção do solo com as raízes das plantas foi regada com frequência nos primeiros cinco dias do experimento, mantendo-se a umidade correspondente ao potencial de -10 kPa (capacidade de campo), determinado pelo extrator de placa porosa (Reichardt, 1988). Após esse período, deixou-se de aplicar água até atingir o conteúdo volumétrico referente a cada tratamento.

O experimento foi conduzido durante 123 dias. Após esse período, as plantas foram seccionadas a cerca de 1 cm do coleto separando-as em colmo e folhas, sendo realizada a determinação da área foliar (AF) (Area meter, modelo 3100, LiCor). Posteriormente, o material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, e então, determinada a massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P nas folhas (*tP_F*) e conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*).

Os dados foram submetidos à análise de variância. Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes (Alvarez e Alvarez, 2006), sendo três contrastes ortogonais (C1, C2 e C3) e um contraste adicional (C4), e testados pelo teste F nos níveis de 1, 5 e 10 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, a aplicação de MAP proporcionou melhores resultados em relação às tecnologias associadas ao fertilizante para as variáveis *mMS_PA*, *cP_PA* e AF (Tabela 2 e C1, Tabela 3), mas gerou obteve média inferior para o *tP_F*. Este fato pode estar relacionado ao maior desempenho do MAP no conteúdo volumétrico de água mais elevado (80 % CC), mascarando o comportamento geral em relação aos demais fertilizantes.

Os fertilizantes fosfatados solúveis, que não receberam qualquer tecnologia associada, possuem maior velocidade de liberação de P para a solução do solo quando comparados àqueles que foram elaborados com essas tecnologias associadas, especialmente as que se configuram como revestimento do grânulo. Quanto maior o conteúdo volumétrico de água do meio, a difusão de P até as raízes será maior e, conseqüentemente, a absorção pelas plantas (Costa et al., 2006). Em condições ótimas de umidade associado ao tempo

relativamente curto de experimento os adubos convencionais tendem a apresentar melhores resultados.

Porém, se considerarmos menores conteúdos volumétricos de água (60 % CC) as tecnologias associadas tendem a ser mais eficientes, devido à redução da taxa de liberação de P propiciado pelas tecnologias associadas, o que é desejado, pois neste potencial o fluxo difusivo de P é reduzido, o que ocasiona em maior interação com as partículas de solo, aumentando a intensidade de adsorção em óxidos de Fe e Al (Campos et al., 2016).

O MAPPOL acarretou em maior eficiência em relação aos fertilizantes organominerais para todas as variáveis analisadas (C2, Tabela 3). Este resultado se deve ao fato das estruturas poliméricas serem responsivas à umidade do solo, aumentando o coeficiente de permeabilidade à medida em que o conteúdo volumétrico de água aumenta, liberando o nutriente em condição mais propícia de ser absorvido pelas plantas (Tomaszewska et al., 2002). Além disso, a cinética de liberação de P, promovida por fertilizantes polimerizados pode aumentar a absorção de P ao longo da cultura, obtendo melhores resultados nos componentes de produtividade (Figueiredo et al., 2012).

O revestimento do MAP com biochar ou adição de torta de filtro também tem potencial de alterar a cinética de liberação de P, reduzir a intensidade de adsorção deste elemento no solo e permitir maior disponibilidade para as plantas (Borges et al., 2019; Li et al., 2020), em condições de menor disponibilidade de água no solo (Tabelas 2 e 3), quando comparados à fonte prontamente disponível. Porém, as características de liberação de P conferida pelo revestimento com polímero (MAPPOL) permitiu maior absorção de P e, conseqüentemente, resultou em maiores médias (Tabelas 2 e 3).

O MAPTF proporcionou melhores resultados em relação ao MAPBIO para as variáveis *mMS_PA*, *cP_PA* e *AF* (C3, Tabela 3). Os diferentes resultados obtidos pelos fertilizantes se devem, sobretudo, ao modo de fabricação e à recalcitrância da matéria orgânica, em que o MAPTF é um fertilizante peletizado composto por MAP e torta de filtro e o MAPBIO revestido com material orgânico pirolisado a 400 °C.

Tabela 1 - Valores médios da produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF) a partir da aplicação de quatro fontes fosfatadas sob diferentes conteúdos volumétricos de água

Variável	Potencial	Fertilizantes			
		MAP	MAPPOL	MAPTF	MAPBIO
<i>mMS_PA</i> (g/vaso)	60 % CC	7,01	11,10	13,47	9,84
	70 % CC	15,43	20,04	14,03	12,30
	80 % CC	34,46	27,54	27,32	22,34
	Média	18,96	19,56	18,27	14,83
<i>tP_F</i> (g/kg)	60 % CC	1,18	1,79	1,94	1,19
	70 % CC	1,28	2,34	2,55	2,42
	80 % CC	3,58	4,07	2,83	3,37
	Média	2,01	2,75	2,44	2,32
<i>cP_PA</i> (mg/vaso)	60 % CC	8,26	18,80	24,24	12,02
	70 % CC	22,89	44,96	32,91	26,38
	80 % CC	112,14	101,81	77,84	70,83
	Média	47,46	55,19	44,99	36,41
AF (cm ²)	60 % CC	887	1053	1252	907
	70 % CC	1435	1962	1567	1274
	80 % CC	3021	2453	2460	2059
	Média	1781	1822	1760	1413

MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar.

Tabela 3 - Contrastes médios (Ci) da produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF) das quatro fontes de fertilizantes fosfatados independentemente dos conteúdos volumétricos de água

Variáveis	C1	C2	C3	C4
<i>mMS_PA</i> (g)	-1,40*	3,01**	3,44**	0,6 ^{ns}
<i>tP_F</i> (g/kg)	0,49**	0,37**	0,12 ^{ns}	0,74**
<i>cP_PA</i> (mg)	-1,93 ^{ns}	14,49**	8,58**	7,73*
AF (cm ²)	-116,00 ^o	235,50**	347,00**	41,00 ^{ns}

C1: (MAPPOL + MAPTF + MAPBIO) vs MAP; C2: MAPPOL vs (MAPTF + MAPBIO); C3: MAPTF vs MAPBIO; C4: MAPPOL vs MAP; MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar; **, *, e ^o significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente e ns, não significativo

O maior contato do P com a matéria orgânica no MAPTF pode facilitar a formação de complexos fósforo-metal-húmicos, que possuem menor energia de ligação e maior reversibilidade frente ao fenômeno de adsorção, além de formar uma camada protetora ao redor do P, o que diminui a capacidade do solo em adsorver fosfato, aumentando a disponibilidade para as plantas (Tisdale & Nelson, 1993). A utilização de biochar como revestimento de fontes solúveis possui características favoráveis a promover aumento de

disponibilidade de P (Sharpley et al., 2015), porém, neste trabalho para a cultura do cafeeiro, o MAPTF melhor atendeu à demanda da cultura.

O MAPPOL gerou melhores resultados em relação ao MAP para as variáveis tP_F e cP_{PA} (C4, Tabela 3). Uma maior absorção de P pelas plantas pode estar relacionada à cinética de liberação de P, bem como à sua maior difusão, proporcionado pela liberação de P em condições ótimas pela tecnologia de revestimento. Os menores valores obtidos pelo MAP podem estar associados ao contato direto do adubo com a matriz do solo, aumentando a intensidade de adsorção, ocasionando assim no menor aproveitamento do nutriente pelas plantas de milho (Gomes et al., 2005).

Para todas as variáveis analisadas, os conteúdos volumétricos de água a 70 e 80 % CC promoveram melhores resultados em relação a 60 % CC (C5, Tabela 4). Por sua vez, os resultados obtidos a 80 % CC foram superiores a 70 % CC (C6, Tabela 4).

O conteúdo volumétrico de água no solo interfere na dinâmica do fertilizante no solo e tem papel importante na solubilização e cinética de liberação do nutriente (Wei et al., 2017) assim como seu transporte até a zona radicular. Isso ocorre, pois, a velocidade de liberação do nutriente é dependente das características de solubilidade da fonte fertilizante utilizada, que pode ser alterada pela adição de revestimentos ou aditivos.

Os mecanismos de controle de solubilização dos fertilizantes são responsáveis, em grande parte, por sua maior eficiência (Lustosa Filho et al., 2019), especialmente em conteúdos volumétricos de água mais baixos. Em baixo potencial hídrico a interação P-coloide é mais elevada e a adição de tecnologia associada permite a liberação do nutriente em condições mais propícias, como por exemplo por ocasião da irrigação. Este fato permite que o fertilizante solubilizado seja mais facilmente transportado até a zona de absorção das raízes, reduzindo as perdas no sistema solo-planta e aumentando a eficiência das fontes fertilizantes com tecnologia associada, além de reduzir os impactos ambientais da fertilização fosfatada (Fertahi et al., 2020).

Em conteúdos volumétricos de água mais elevados, a eficiência das tecnologias associadas ao fertilizante solúvel tende a ser menos pronunciada, pois há uma redução na interação P-coloide pelo espessamento do filme de água próximo às partículas de solo, diminuindo a tortuosidade e facilitando a difusão de P até as raízes das plantas (Remer e Schilling, 1981; Ruiz, 1986; Novais e Smyth, 1999), aumentando absorção de P e melhorando a eficiência da adubação fosfatada, principalmente das fontes solúveis sem tecnologia associada.

Tabela 4 - Contrastes médios (Ci) da influência dos conteúdos volumétricos de água na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF)

Variáveis	C5	C6
<i>mMS_PA</i> (g)	-11,33**	-12,46**
<i>tP_F</i> (g/kg)	-1,28**	-1,31**
<i>cP_PA</i> (mg)	-45,38**	-58,87**
AF (cm ²)	-1004,12**	-938,75**

C5: 60 vs (70 + 80 % CC); C6: 70 % CC vs 80 % CC; ** significativo a 1 %

Em condições de estresse hídrico, frequentemente observado em campo, a eficiência das tecnologias associadas tende a sobressair em relação à fonte solúvel, pois reduz a liberação de P em baixos conteúdos volumétricos, minimizando a intensidade de adsorção.

Os fertilizantes com tecnologia associada foram mais eficientes em relação ao MAP a 60 e 70 % CC (C7, Tabela 5) para todas as variáveis analisadas, exceto *mMS_PA* a 70 % CC, em que não houve diferenças entre as fontes fosfatadas. A 60 % da CC, os fertilizantes com tecnologia associada obtiveram, em relação ao MAP, resultados 63,2 % superiores para *mMS_PA*, 38,98 % para *tP_F*, 122,19 % para *cP_PA* e 20,70 % para AF.

Tabela 5 - Contrastes médios (Ci) do desdobramento das quatro fontes de fertilizantes fosfatado em função do conteúdo volumétrico de água na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*), conteúdo de P na parte aérea (*cP_PA*) e área foliar (AF)

Variável	60 %				70 %				80 %			
	C7	C8	C9	C10	C7	C8	C9	C10	C7	C8	C9	C10
<i>mMS_PA</i> (g)	4,46**	-0,55 ^{ns}	3,63**	4,09**	0,03 ^{ns}	6,88**	1,73 ^{ns}	4,61**	-8,73**	2,71 ^{ns}	4,98**	-6,92**
<i>tP_F</i> (g/kg)	0,46**	0,23 ^o	0,75**	0,61**	1,16**	-0,15 ^{ns}	0,13 ^{ns}	1,06**	-0,16 ^{ns}	0,97**	-0,54**	0,49**
<i>cP_PA</i>	10,1*	0,67 ^{ns}	12,22*	10,54*	11,86*	15,32**	6,53 ^o	22,07**	28,65**	27,48**	7,01 ^o	-10,33*
AF (cm ²)	184,0 ^o	-26,5 ^{ns}	345**	166 ^o	166 ^o	541**	293*	527**	-697**	193 ^o	347**	-568**

C7: (MAPPOL + MAPTF + MAPBIO) vs MAP; C8: MAPPOL vs (MAPTF + MAPBIO); C9: MAPTF vs MAPBIO; C10: MAPPOL vs MAP; MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar; **, * e ^o significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente e ns, não significativo

A 70 % da CC, os fertilizantes com tecnologia associada proporcionaram maior tP_F , cP_{PA} e AF em relação ao MAP, com valores de 90,62; 51,81 e 11,56 %, respectivamente (C7, Tabela 5). A maior eficiência das tecnologias associadas em relação ao MAP a 60 % CC e 70 % CC (C7, Tabela 5) pode estar relacionada à cinética de liberação de P (Sharpley et al., 2015; Borges et al., 2019; Li et al., 2020), em especial sua liberação em condições favoráveis à difusão, que reduz o tempo de contato do fertilizante com a matriz do solo, minimizando os fenômenos de adsorção e aumentando sua disponibilidade.

O resultado inferior obtido pelo MAP nestes conteúdos volumétricos de água é devido à ausência de mecanismos de controle de solubilidade, em que o grânulo fertilizante, ao entrar em contato com a umidade do solo, ocorre a solubilização e liberação nutriente na solução do solo em um curto período de tempo. Em baixos conteúdos volumétricos de água o fluxo difusivo de P até as raízes é reduzido, o que maximiza a adsorção específica de P (Johnston et al., 2014), reduzindo a capacidade das plantas em absorver o nutriente.

Borges et al. (2019) obtiveram aumento de eficiência da adubação a partir da utilização de fontes fosfatadas com tecnologia associada. Os autores encontraram aumento de produtividade de massa de matéria seca da cana-de-açúcar de 67 a 98 g por vaso a partir da utilização de fontes fosfatadas que foram acrescidas com torta de filtro e aplicadas ao solo, sendo este mantido diariamente a 70 % CC. Este resultado foi atribuído a uma maior disponibilidade de P, pois a matéria orgânica adicionada compete pelos sítios de adsorção presentes na matriz sólida, aumentando a disponibilidade do nutriente (Singh et al., 1988; Andrade et al., 2003).

Guelfi et al. (2021) verificaram que a aplicação de fonte fosfatada solúvel revestida com polímero promoveu maior massa de matéria seca de folhas e acúmulo de P em cultura do cafeeiro em relação à fonte convencional quando a umidade do solo era mantida a 70 % CC.

As características de liberação de P e a obtenção de uma cinética de liberação mais favorável à absorção pelas plantas também promoveram maior rendimento de biomassa e acúmulo de P no capim Marandu quando comparados à fonte solúvel, quando se utilizou fertilizante fosfatado organomineral a base de biochar em ciclos de umedecimento e secagem, em que a umidade máxima era de 80 % CC (Lustosa Filho et al., 2020).

Figueiredo et al. (2012) encontraram maiores produtividades de grãos de milho quando se utilizou o MAP revestido com polímero em relação ao MAP convencional, em experimento de campo, que evidencia que a cinética de liberação de P propiciada pela tecnologia associada potencializa a absorção do nutriente pelas plantas.

Para o conteúdo volumétrico de 80 % CC, durante o período experimental de 123 dias, o MAP obteve as maiores médias de *mMS_PA*, *cP_PA* e AF em relação às tecnologias associadas (C7, Tabela 5). No maior conteúdo volumétrico de água avaliado (80 %), a maior eficiência do MAP em relação às tecnologias associadas pode ser atribuída à elevada umidade, que influencia na solubilização do fertilizante e o P, uma vez solubilizado, é beneficiado por um maior conteúdo volumétrico de água, que diminui a interação do P com a matriz do solo e reduzem os fenômenos de adsorção (Remer e Schilling, 1981; Ruiz, 1988; Novais e Smyth, 1999), além de serem difundidos até as raízes das plantas, aumentando a absorção.

É importante destacar que em condições de cultivo em campo, mesmo utilizando irrigação, é improvável manter o conteúdo volumétrico de água do solo elevado (80 % CC ou acima) e por essa razão, é importante considerar a eficiência dos fertilizantes em condições de menor umidade.

De maneira geral, os fertilizantes organominerais (MAPTF e MAPBIO) não diferiram em relação ao fertilizante com revestimento físico (MAPPOL) a 60 % CC (C8, Tabela 5). Porém, a 70 % CC, o MAPPOL foi mais eficiente em relação aos fertilizantes organominerais (C8, Tabela 5), obtendo valores 52,27; 51,69 e 38,12 % superiores para as variáveis *mMS_PA*, *cP_PA* e AF, respectivamente.

A 80 % CC, o MAPPOL também obteve melhores em resultados em relação aos organominerais para as variáveis *tP_PA*, *cP_PA* e AF (C8, Tabela 5), com valores 31,29; 36,05 e 8,56 % superiores, respectivamente.

Os resultados semelhantes, obtidos quando se utilizou os fertilizantes organominerais (MAPTF e MAPBIO) e o MAPPOL a 60 % CC podem ser atribuídos aos mecanismos de liberação de nutriente, conferido pelo revestimento polimérico (Naz e Sulaiman, 2016), e na minimização das reações entre o nutriente e os componentes do solo que circundam os grânulos, conferido pela adição de componentes orgânicos (Rossetto et al., 2008). Porém, existem diferenças entre a cinética de liberação dos nutrientes a 70 e 80 % CC.

A maior eficiência do MAPPOL em relação aos organominerais quando o solo foi mantido a 70 ou 80 % CC pode ser atribuída a um maior controle de solubilização do fertilizante conferido pelo revestimento polimérico (Silva et al., 2012), em que o polímero é mais responsivo à umidade, e os microporos se dilatam com o aumento da umidade do solo (Tomaszewska et al., 2002), liberando o nutriente em condição mais propícia a ser difundido até as raízes, e se contraem quando o conteúdo volumétrico de água no solo é reduzido.

A menor eficiência do MAPTF e MAPBIO em relação ao MAPPOL quando o solo estava mantido a 80 % CC pode estar relacionado à ausência de uma camada de revestimento responsiva à umidade do solo, como no caso dos polímeros, fazendo com que elevadas quantidades de P sejam disponibilizadas após rápida solubilização do fertilizante, o que, conseqüentemente, aumentaria a adsorção do nutriente.

O fertilizante MAPTF obteve maiores médias em relação ao MAPBIO quando o solo era mantido a 60 % CC (C9, Tabela 5), sendo os resultados do MAPTF melhores em relação ao MAPBIO em 36,89; 63,02; 101,66 e 38,03 % para as variáveis *mMS_PA*, *tP_F*, *cP_PA* e *AF*, respectivamente. A 70 % da CC, o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAPBIO para o *cP_PA* e *AF* (C9, Tabela 5) e a 80 % CC o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAPBIO para as variáveis *mMS_PA*, *cP_PA* e *AF* (C9, Tabela 5).

As diferenças entre os fertilizantes organominerais podem estar relacionadas ao modo de fabricação do fertilizante, em que o MAPTF é produto de um processo de peletização da torta de filtro com o MAP, que gera, dentre outras características, um produto mais denso, que dificulta sua solubilização. Posto isso, sugere-se que o fertilizante possua um período maior de liberação de P, o que pode ser vantajoso, especialmente para culturas perenes.

O MAPBIO, por sua vez, possui uma camada de revestimento do MAP com biochar, e a utilização de uma barreira física altera a cinética de liberação de P, gerando menor adsorção nos componentes do solo (Cruz et al., 2017). Porém, essa taxa de liberação é dependente do coeficiente de permeabilidade do biochar utilizado, e por não ser um produto peletizado, a perfusão de água para o seu interior, solubilização do fertilizante e liberação do nutriente ocorre de maneira mais dinâmica.

Para que uma fonte fertilizante seja considerada mais eficiente em relação à outra, o padrão de liberação de P precisa ser o mais compatível possível com as necessidades metabólicas das plantas e no caso do cafeeiro, por ser uma cultura perene, sugere-se que um maior controle de solubilidade do fertilizante MAPTF tenha propiciado maior absorção de P durante o período experimental, o que resultou em sua maior eficiência.

O MAPPOL obteve melhores resultados em relação ao MAP a 60 e 70 % CC para a todas as variáveis analisadas (C10, Tabela 5). A 60 % CC, o MAPPOL registrou valores 63,62; 38,98; 122,19 e 20,70 % superiores em relação ao MAP para as variáveis *mMS_PA*, *tP_F*, *cP_PA* e *AF*, respectivamente. Para as mesmas variáveis, a 70 % CC, MAPPOL produziu resultados 29,87; 82,81; 96,41 e 36,72 % superiores em relação ao

MAP e a 80 % CC o MAPPOL só foi mais eficiente em relação ao MAP para a variável tP_F (C10, Tabela 5).

O MAPPOL se destaca em relação ao MAP em conteúdos volumétricos de água mais baixos, que ao alterar a cinética de liberação do nutriente, permite que seja liberado em condições mais propícias de ser absorvido, como por exemplo, maior conteúdo volumétrico do solo em ocasião de irrigação ou chuvas, que possibilitam a difusão do nutriente até a zona de absorção das raízes.

Para que o nutriente seja absorvido mais eficientemente pelas plantas e obter maiores concentrações de P na folha, o padrão de liberação de P precisa ser o mais compatível possível com as necessidades metabólicas das plantas e as perdas no sistema solo-planta devem ser as menores possíveis. Por essa razão, as tecnologias associadas que são adicionadas à fonte solúvel visam a liberação do nutriente por um período maior de tempo e/ou em condições que favorecem a absorção pelas plantas, como por exemplo, maior conteúdo volumétrico de água, que facilita a difusão do nutriente até a zona de absorção das raízes.

CONCLUSÃO

Os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram melhores resultados em relação à fonte convencional em conteúdos volumétricos de água mais baixos.

Os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada proporcionaram maior massa de matéria seca de folhas, área foliar, teor e conteúdo de fósforo na parte aérea a 60 e 70 % CC, evidenciando sua eficiência para condições de estresse hídrico ou baixo conteúdo de água no solo.

A tecnologia de revestimento (MAPPOL) teve maior eficiência em relação aos organominerais (MAPTF e MAPBIO) e ao MAP em conteúdos volumétricos de água mais baixos, sendo a tecnologia associada mais indicada dentre as estudadas para situações de baixo potencial hídrico ou épocas de verão.

O MAPTF foi mais eficiente em relação ao MAPBIO nos três conteúdos volumétricos de água analisados.

REFERÊNCIAS

- ALABI, K. E., SORENSEN, R. C., KNUDSEN, D., & REHM, G. W. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*, 50:937–94, 1986.
- ALVAREZ V., V. H.; ALVAREZ, G. A. M. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 3:24-33, 2006.
- AMARAL, J. F. T. D., MARTINEZ, H. E. P., LAVIOLA, B. G., TOMAZ, M. A., FERNANDES FILHO, E. I., & CRUZ, C. D. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. *Coffee Science*, 6:65-74, 2011.
- ANDA. Associação Nacional Para Difusão de Adubos. Principais indicadores do setor de fertilizantes. Disponível em http://anda.org.br/pesquisa_setorial/> Acesso em: 15 ago 2021.
- ANDRADE, F. V., MENDONÇA, E. S., ALVAREZ, V. H., & NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:1003-1011, 2003.
- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- CAHILL, S., OSMOND, D., WEISZ, R., & HEINIGER, R. Evaluation of alternative nitrogen fertilizers for corn and winter wheat production. *Agronomy Journal*, Madison, 102:1226-1236, 2010.
- CAMPOS, M. de, ANTONANGELO, J. A., & ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 156:110-118, 2016.
- COSTA, J. P. da, BARROS, N. F. D., ALBUQUERQUE, A. W. D., MOURA FILHO, G., & SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10:828-835, 2006.
- CRUZ, D. F. da, BORTOLETTO-SANTOS, R., GUIMARÃES, G. G. F., POLITO, W. L., & RIBEIRO, C. 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*, 65:5890-5895, 2017.
- FERTAHI, S., BERTRAND, I., ILSOUK, M., OUKARROUM, A., ZEROUAL, Y., & BARAKAT, A. New generation of controlled release phosphorus fertilizers based on biological macromolecules: Effect of formulation properties on phosphorus release. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143:153-162, 2020.
- FERTAHI, S., ILSOUK, M., ZEROUAL, Y., OUKARROUM, A., & BARAKAT, A. Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers. *Journal of Controlled Release*, 330:341-361, 2021.
- FIGUEIREDO, C. C. D., BARBOSA, D. V., OLIVEIRA, S. A. D., FAGIOLI, M., & SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e

- parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*, 43:446-452, 2012.
- FINK, J. R., INDA, A. V., BAYER, C., TORRENT, J., & BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 36:379-387, 2014.
- GAZOLA, R. D. N., BUZETTI, S., DINALLI, R. P., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., & CELESTRINO, T. D. S. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60:876-884, 2013.
- GLOBALFERT. Importação de fertilizantes bate recorde em 2020. Disponível em <https://www.globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/>. Acesso em: 27 set 2021.
- GOMES, J. A., SCAPIM, C. A., DE LUCCA, A., VIDIGAL FILHO, P. S., SAGRILO, E., & MORA, F. Adubações orgânica e mineral, produtividade do milho e características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 27:521-529, 2005.
- GONÇALVES, J. M., FIRME, D. J., NOVAIS, R. F., & RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 9:107-111, 1985.
- GUELFY, D. R., JR, R. D. A. R., & CHAGAS, W. F. Enhanced efficiency phosphorous fertilizers on the coffee crop in sandy soil. *International journal of Horticulture, Agriculture and Food Science*, 5:19-26, 2021.
- JOHNSTON, A. E., POULTON, P. R., FIXEN, P. E., & CURTIN, D. Phosphorus: its efficient use in agriculture. *Advances in agronomy*, 123:177-228, 2014.
- HOAGLAND, D. R., & ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California agricultural experiment station*, 347, 1950.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LUSTOSA FILHO, J. F., BARBOSA, C. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., & MELO, L. C. A. (2019). Diffusion and phosphorus solubility of biochar-based fertilizer: Visualization, chemical assessment and availability to plants. *Soil and Tillage Research*, 194, 104298.
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of the Total Environment*, 709:136028, 2020.
- NAZ, M. Y., & SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of Controlled Release*, 225:109-120, 2016.
- NIEMIEC, M., SZELĄG-SIKORA, A., & CUPIAŁ, M. Evaluation of the Efficiency of Celeriac Fertilization with the Use of Slow-acting Fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7:177-183, 2015.
- NOVAIS, R. F., & SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1ª ed. Viçosa; Universidade Federal de Viçosa, 1999.

- OLSEN, S. R., & WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society of America Journal*, 21:144-149, 1957.
- RANSOM, C. J., JOLLEY, V. D., BLAIR, T. A., SUTTON, L. E., & HOPKINS, B. G. Nitrogen release rates from slow-and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature. *PLoS One*, 15:e0234544, 2020.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12: 211-216, 1988.
- REMER, W., & SCHILLING, G. Effect of the soil water regime on the diffusion coefficient of phosphate ions. *Soviet Soil Science, London*, 13:110-114, 1981.
- ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H., & QUAGGIO, J.A. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com doses de potássio. *Revista Bragantia, Campinas*, 63:105-119, 2004.
- RUIZ, H. A., FERNANDES, B., NOVAIS, R. F., & FERREIRA, P.A. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12:43-48, 1988.
- SILVA, C. S.; SILVA-FILHO, F. C.; SANTOS, A. D.; COSCIONE, A.; VITTI, A.; BOARETTO, A.; ... & CARMO, C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2009.
- SILVA, A. D. A., SILVA, T. S., VASCONCELOS, A. C. P. D., & LANA, R. M. Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*, 28:240-250, 2012.
- SINGH, Y., SINGH, B., MASKINA, M. S., & MEELU, O. P. Effect of organic manures, crop residues and green manure (*Sesbania aculeata*) on nitrogen and phosphorus transformations in a sandy loam at field capacity and under waterlogged conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 6:183-187, 1988.
- SHARPLEY, A. N., BERGSTRÖM, L., ARONSSON, H., BECHMANN, M., BOLSTER, C. H., BÖRLING, K., ... & TONDERSKI, K. S. (2015). Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. *Ambio*, 44:163-179, 2015.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 4, 2017.
- TEIXEIRA, W. G., SOUSA, R. T. X. D., & KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. *Bioscience Journal*, 30, 2014.
- TOMASZEWSKA, M., JARPSOEWICZ, A., & KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*, 146:319-323, 2002.
- TRENKEL, M. E. Improving fertilizer use efficiency. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association, Paris, 1997.
- WEI, Y., LI, J., LI, Y., ZHAO, B., ZHANG, L., YANG, X., & CHANG, J. Research on permeability coefficient of a polyethylene controlled-release film coating for urea and relevant nutrient release pathways. *Polymer Testing*, 59:90-98, 2017.

CAPÍTULO 5

UMIDADE DO SOLO NA DISPONIBILIZAÇÃO DE P EM FERTILIZANTES COM TECNOLOGIA ASSOCIADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA

Zea Mays L.

RESUMO

A alta capacidade de adsorção de fósforo (P) em solos altamente intemperizados resultam no baixo aproveitamento de P fornecido por meio de fertilizantes convencionais na agricultura tropical. Nesse contexto, a liberação de P advinda dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada pode exercer importante papel na disponibilidade do nutriente nesses solos, tornando-o mais disponível para as plantas. Objetivou-se com esse trabalho avaliar a massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}), área foliar (AF) e teor de P na folha (tP_F) da cultura do milho sob aplicação de fosfato monoamônio (MAP) associado ao uso de tecnologias submetido a três conteúdos volumétricos de água em três cultivos sucessivos. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo o esquema fatorial 4 x 3 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (MAP, MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar – MAPBIO; MAP revestido com polímero – MAPPOL) e três conteúdos de água no solo (60, 70 e 80 % da capacidade de campo - CC). A dose de P aplicada correspondeu a 20 % da capacidade máxima de adsorção de P. De maneira geral observou-se que os fertilizantes revestidos (MAPPOL e MAPBIO) foram mais eficientes em relação ao MAP para todas as variáveis analisadas e nos três ciclos de cultivo. O MAP foi mais eficiente em relação ao MAPTF no primeiro e segundo ciclos de cultivo. No terceiro ciclo de cultivo o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAP. Entre os fertilizantes revestidos, o MAPBIO foi mais eficiente em relação ao MAPPOL para as variáveis mMS_{PA} e AF no primeiro e segundo ciclos de cultivo e não se diferenciaram quanto ao tP_F em nenhum dos ciclos. Quando se considera o conteúdo volumétrico de água no solo, observa-se que as tecnologias associadas foram eficientes, liberando menor quantidade de P em relação ao MAP em baixos conteúdos volumétricos de água (60 % CC) e à medida em que se aumentava o conteúdo volumétrico (70 e 80 % CC), a alteração da cinética de liberação de P propiciou melhores resultados na cultura do milho.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

SOIL MOISTURE IN THE AVAILABILITY OF P IN FERTILIZERS WITH TECHNOLOGY IN THE INITIAL DEVELOPMENT OF *Zea Mays* L.

ABSTRACT

The high phosphorus (P) adsorption capacity in highly weathered soils results in low utilization of the nutrient provided by conventional fertilizers in tropical agriculture. In this context, the controlled release of P from phosphate fertilizers with associated technology can play an important role in the availability of P in these soils in order to reduce the intensity of the phenomenon of P adsorption, making it more available to plants. The objective of this work was to evaluate the dry matter mass of the aerial part (*mMS_PA*), leaf area (*AF*) and P content in the leaf (*tP_F*) of the maize crop under application of monoammonium phosphate (MAP) associated with the use of technologies subjected to three volumetric water contents in three successive cultivations. The experimental design was in randomized blocks, with four replications, following a 4 x 3 factorial scheme in which the factors under study were: four phosphate fertilizers (MAP, MAP + filter cake – MAPTF; MAP coated with biochar – MAPBIO; MAP coated with polymer – MAPPOL) and three soil water contents (60, 70 and 80 % of field capacity - CC). The dose of P applied corresponded to 20% of the maximum P adsorption capacity. In general, it was observed that the coated fertilizers (MAPPOL and MAPBIO) were more efficient in relation to MAP for all analyzed variables and in the three crop cycles. MAP was more efficient in relation to MAPTF in the first and second cycles of cultivation, however, in the third cycle of cultivation, MAPTF obtained better results in relation to MAP. Among the coated fertilizers, MAPBIO was more efficient than MAPPOL for the *mMS_PA* and *AF* variables in the first and second cultivation cycles, but did not differ in terms of *tP_F* in any of the cycles. When the volumetric content of water in the soil is considered, it is observed that the associated technologies were efficient, releasing smaller amounts of P in relation to the MAP at low volumetric water contents (60 % CC) and as the volumetric content increases (70 and 80 % CC), the controlled release of P provided better results in the corn crop.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus

1. INTRODUÇÃO

A adsorção de P no solo ocorre de maneira mais significativa nos óxidos de Fe e de Al (Almeida et al., 2003), sendo necessária aplicação de maiores quantidades de fertilizantes em relação à demanda da planta para se obter altos índices de produtividade. Isso ocorre, pois, a maior parte do P adicionado via adubação química se converte em formas não-lábeis, resultando em baixa eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais (Chien et al., 2011), especialmente solos que não possuem fertilidade construída.

Nesse contexto surge a necessidade de se reduzirem as perdas de P no sistema solo-planta a partir da utilização de tecnologias associadas a uma fonte solúvel, que alteram a cinética de liberação do nutriente. Dentre essas estratégias, têm ganhado visibilidade o revestimento do monoamônio fosfato (MAP) com polímeros biodegradáveis, biochar ou adição de torta de filtro à fonte solúvel (Borges et al., 2019; Li et al., 2020; Lustosa Filho et al., 2020).

O recobrimento do MAP com polímero ou biochar visa reduzir as perdas de nutrientes, melhorar as propriedades mecânicas e promover a alteração da taxa de liberação do nutriente, permitindo um melhor aproveitamento no solo (Al-Zahrani, 2000). A adição de componentes orgânicos, como torta de filtro ou revestimento com biochar, aumenta a densidade de cargas negativas na região de liberação de P e possibilita a formação de compostos fósforo-metal-húmicos. Também promove liberação de ácidos orgânicos que competem pelos sítios de adsorção de P e/ou revestem os óxidos de Fe e Al, diminuindo a intensidade de adsorção (Andrade et al 2003).

Além disso, fornece P no decorrer do período de desenvolvimento da cultura, sugerindo um melhor aproveitamento do fertilizante pelas culturas (Li et al., 2020; Lustosa Filho et al., 2020).

Contudo, cada uma das tecnologias associadas possui um mecanismo de liberação de nutrientes em uma determinada condição de umidade do solo. Cada estrutura de revestimento possui um coeficiente de permeabilidade que é altamente dependente de características mecânicas do produto utilizado (Férrandez-Pérez et al., 2008), seja o polímero, biochar ou outro qualquer. Já a adição de torta de filtro à fonte solúvel gera um produto peletizado, que por si só é capaz de alterar as propriedades mecânicas do fertilizante, e, conseqüentemente, a taxa de liberação de P, a depender do conteúdo volumétrico de água do meio.

Portanto, pouco se sabe sobre a eficiência dessas tecnologias associadas no fornecimento de P, especialmente em diferentes condições de umidade do solo. Por isso, objetivou-se com esse trabalho avaliar a massa de matéria seca da parte aérea, área foliar e teor de P na folha da cultura do milho sob a aplicação de MAP convencional e com três tecnologias associadas submetidos a três conteúdos volumétricos de água e em três cultivos sucessivos de *Zea mays* L.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da UFES – Alegre (ES). Foi coletada amostra de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) textura argilosa, na profundidade de 20 a 40 cm. A caracterização química (Silva et al., 2009) e física (Teixeira et al., 2017) são apresentadas na tabela 1.

Após a caracterização química, a amostra de solo foi dividida em subamostras de 4 dm³ e foram acondicionadas, homogeneizadas e incubadas em sacos plásticos com calcário, a fim de elevar o pH a 6,0, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras foram incubadas durante 30 dias, mantendo-se a umidade do solo a 70 % da capacidade de campo. Após esse período, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo o esquema fatorial 4 x 3 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP + torta de filtro – MAPTF; MAP revestido com biochar de palha de café pirolisado a 400 °C – MAPBIO; MAP revestido com polímero – MAPPOL) e três conteúdos de água no solo (60, 70 e 80 % da capacidade de campo - CC). A dose de P aplicada foi de 134,6 mg dm⁻³, que corresponde a 20 % da CMAP. As fontes de P foram padronizadas por meio de passagem em peneira de 4 mm e retenção na peneira de 2 mm.

Como recipiente de plantio, foram utilizados vasos geminados (Ruiz et al., 1988), constituídos de duas unidades (A e B), de 4 dm³ cada. A unidade A continha solução nutritiva (Hoagland & Arnon, 1950) para fornecimento de macronutrientes (exceto P), micronutrientes e água, necessários ao crescimento das plantas. A solução nutritiva foi arejada continuamente e coberta por uma tampa para evitar a perda de água por evaporação. O volume de água foi monitorado diariamente.

Tabela 1 - Caracterização física e química de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (LVA) coletado na profundidade de 20-40 cm em Alegre ES

Característica	LVA
Argila (%) ^{1/}	46,60
Silte (%) ^{1/}	4,10
Areia grossa (%) ^{1/}	30,40
Areia fina (%) ^{1/}	18,90
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,14
pH-H ₂ O ^{3/}	5,72
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,00
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{5/}	4,04
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	1,05
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	0,59
K ⁺ (mg dm ⁻³) ^{6/}	19,00
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,23
CTC(t) (cmol _c dm ⁻³)	1,70
CTC(T) (cmol _c dm ⁻³)	5,74
V %	29,63
CMAP (mg/cm ³) ^{7/}	0,673

1/ Método da pipeta (Teixeira et al., 2017); 2/ Método da proveta (Teixeira et al., 2017); 3/ Relação solo-água 1:2,5; 4/ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; 5/ Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; 6/ Extrator Mehlich-1; 7/ Olsen e Watanabe (1957)

A unidade B recebeu o solo com os tratamentos e um sensor de umidade (modelo 5TE da Decagon Devices) para monitoramento do conteúdo volumétrico de água. Os fertilizantes foram posicionados a 5 cm de profundidade, aplicados em linha, a 4 cm da borda do vaso. Os sensores, por sua vez, foram posicionados a 5 cm de profundidade e a 5 cm da borda do vaso, com o intuito de melhor controlar a umidade na profundidade em que os fertilizantes se encontravam, ou seja, na região de liberação de P. A montagem do experimento é apresentada na Figura 1 (a e b) a seguir.

A planta teste utilizada foi o milho. Foram utilizadas três mudas com aproximadamente 10 dias de germinação, transplantadas em cada unidade experimental, com distribuição das raízes entre as unidades A e B. Para reduzir o estresse dessa operação, a porção do solo com as raízes das plântulas foi molhada com frequência nos primeiros três dias do experimento, mantendo-se a umidade correspondente ao potencial de -10 kPa (capacidade de campo), determinado pelo extrator de placa porosa (Reichardt, 1988).

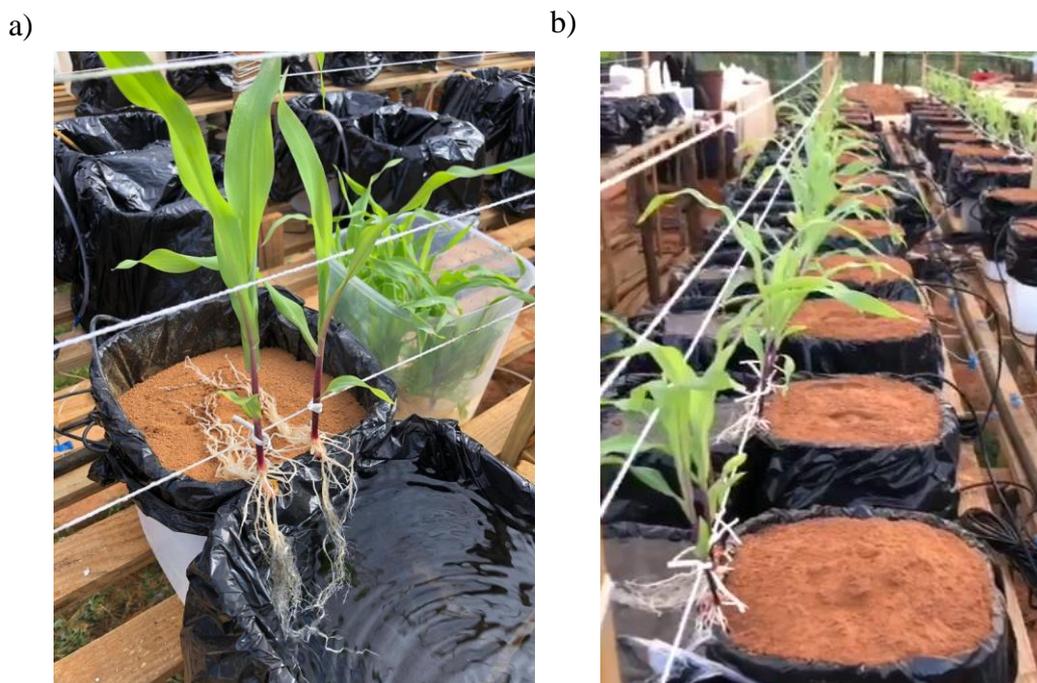


Figura 1: a) Montagem do experimento; b) experimento montado

Após esse período, foi deixado de aplicar água até atingir o conteúdo volumétrico referente a cada tratamento. Os potenciais matriciais das unidades B foram monitorados diariamente, e então, retornava-se à umidade referente a cada tratamento.

O experimento foi conduzido por 3 ciclos de cultivos, com duração de 30 dias cada. Após esse período, as plantas foram seccionadas a cerca de 1 cm do coleto e, posteriormente, colmo e folhas foram separados, sendo realizada a determinação da área foliar (AF) no integrador de área foliar (Area meter, modelo 3100, LiCor). O material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, e então, determinada a massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}), teor de P nas folhas (tP_F) e conteúdo de P na parte aérea (cP_{PA}) no primeiro, segundo e terceiro ciclos de cultivo.

Foi determinado o índice de eficiência agrônômica (IEA) quanto à produção de massa de matéria seca, em cada ciclo, de acordo com a fórmula: $IEA (\%) = (Pr - Po / Ps - Po) \times 100$, usando-se como adubo-referência o MAP, em que Pr é produção de matéria seca obtida com o adubo em teste, Po é produção de matéria seca obtida com o tratamento controle (sem P), Ps é produção de massa de matéria seca sob MAP.

Os dados foram submetidos à análise de variância. Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez e Alvarez, 2006), sendo três contrastes ortogonais (C1, C2 e C3) e um contraste adicional (C4) e testados pelo teste F nos níveis de 1, 5, 10 e 20 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fertilizantes revestidos (MAPPOL + MAPBIO) foram mais eficientes em relação ao MAP para todas as variáveis analisadas e nos três ciclos de cultivo, mas não apresentaram diferenças entre as tecnologias associadas e a fonte solúvel para a variável tP_{F1} (C1, Tabela 3). Em média, os fertilizantes revestidos produziram incremento de 68,9 % para mMS_{PA1} , 53,2 % para o tP_{F2} e 15,41 % para AF2. As maiores médias obtidas pelos fertilizantes revestidos (Tabela 2) podem estar associadas a uma maior eficiência proporcionada pela adição de tecnologia associada.

Os fertilizantes revestidos obtiveram maior eficiência agrônômica na produção de mMS_{PA} em relação ao MAP. O MAPBIO obteve valores de 128,18; 193,38 e 125,28 % para o primeiro, segundo e terceiro ciclos de cultivo enquanto o MAPPOL registrou valores de 91,98; 131,74 e 242,86 %, respectivamente (Tabela 4), o que pode estar relacionado a uma maior absorção de P proporcionado pelo aumento de disponibilidade ao longo dos ciclos de cultivo.

A eficiência das tecnologias de revestimento se baseia na alteração da cinética de liberação de nutrientes e, conseqüentemente, na minimização das reações entre o nutriente e os componentes do solo (Silva et al., 2012; Naz e Sulaiman, 2016), que aumenta a disponibilidade de P por um maior período de tempo, o que justifica os resultados obtidos neste trabalho.

Esse controle de cinética de liberação é obtido por diversos mecanismos, como a utilização de uma barreira física com material orgânico, poroso e com capacidade de armazenamento de P, que ao alterar as características do ambiente ao redor dos grânulos, evitam as perdas por adsorção, como no caso do MAPBIO (Everaert et al., 2016). Pode-se também utilizar revestimentos que são capazes de controlar a passagem de água para o interior do grânulo (Tomaszewska et al., 2001), promover a liberação controlada de nutrientes e aumentar sua disponibilidade ao longo do tempo (Zahrani, 2000), como o caso do MAPPOL. Esse aumento de disponibilidade para as plantas sugere melhorias na absorção do nutriente (Silva et al., 2012) e aumento de eficiência agrônômica em relação ao MAP.

Tabela 2 - Valores médios da produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*) e área foliar (AF) a partir da aplicação de quatro fontes fosfatadas sob diferentes conteúdos volumétricos de água

Variável	Potencial	Fertilizantes			
		MAP	MAPPOL	MAPTF	MAPBIO
-----1° CICLO-----					
<i>mMS_PA1</i> (g/vaso)	60 % CC	17,56	7,73	4,21	19,85
	70 % CC	23,54	39,90	18,78	39,62
	80 % CC	50,75	37,68	33,26	55,36
	Média	30,61	28,43	18,75	38,27
<i>tP_F1</i> (g/kg)	60 % CC	1,55	1,81	0,79	1,79
	70 % CC	2,29	2,23	1,74	2,13
	80 % CC	2,58	2,24	2,53	2,16
	Média	2,14	2,09	1,69	2,02
AF1 (cm ²)	60 % CC	4123,25	1544,75	706,75	2866,00
	70 % CC	4645,50	6179,00	1708,50	6829,50
	80 % CC	6998,25	7219,75	5184,75	9513,25
	Média	5255,67	4981,16	2533,33	6402,91
-----2° CICLO-----					
<i>mMS_PA2</i> (g/vaso)	60 % CC	4,12	4,69	2,34	7,46
	70 % CC	7,84	9,57	8,19	11,45
	80 % CC	9,89	11,75	9,61	15,20
	Média	7,28	8,67	6,71	11,37
<i>tP_F2</i> (g/kg)	60 % CC	1,41	2,04	0,95	1,90
	70 % CC	1,71	2,61	2,64	2,63
	80 % CC	1,80	2,49	2,68	2,62
	Média	1,64	2,38	2,09	2,38
AF2 (cm ²)	60 % CC	1446,25	1593,75	719,00	1885,00
	70 % CC	2639,75	3081,25	2506,50	3164,00
	80 % CC	3320,00	3320,00	2970,75	4052,00
	Média	2468,67	2665,00	2100,41	3033,67
-----3° CICLO-----					
<i>mMS_PA3</i> (g/vaso)	60 % CC	1,76	2,05	1,49	1,68
	70 % CC	3,07	4,60	7,32	5,16
	80 % CC	5,77	6,66	4,54	6,77
	Média	3,53	4,43	4,55	4,53
<i>tP_F3</i> (g/kg)	60 % CC	1,43	1,64	1,40	1,50
	70 % CC	1,50	1,70	2,10	1,73
	80 % CC	1,83	1,85	2,31	1,89
	Média	1,58	1,73	1,94	1,71
AF3 (cm ²)	60 % CC	519,00	565,25	417,25	475,25
	70 % CC	792,25	1000,50	1715,00	1235,25
	80 % CC	1393,75	1480,00	1135,50	1662,00
	Média	911,67	1015,25	1089,08	1124,16

MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar.

Tabela 3 - Contrastes médios (Ci) da influência das fontes de fertilizantes fosfatados na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*) e área foliar (AF)

Variáveis	C1	C2	C3	C4
1° Ciclo				
<i>mMS_PA1</i> (g/vaso)	2,74*	11,86**	4,92**	-9,84**
<i>tP_F1</i> (g/kg)	-0,08 ^{ns}	0,45**	0,36**	0,07 ^{ns}
AF1 (cm ²)	436,36°	2722,34**	3158,70**	-1421,75**
2° Ciclo				
<i>mMS_PA2</i> (g/vaso)	2,74**	0,57°	3,31**	-2,7**
<i>tP_F2</i> (g/kg)	0,74**	-0,45**	0,29**	0,00 ^{ns}
AF2 (cm ²)	380,66**	368,26**	748,92**	-368,67**
3° Ciclo				
<i>mMS_PA3</i> (g/vaso)	1,40**	-1,02**	-0,07 ^{ns}	0,10 ^{ns}
<i>tP_F3</i> (g/kg)	0,14°°	-0,36**	-0,22*	0,02 ^{ns}
AF3 (cm ²)	158,04**	-177,41**	-19,38 ^{ns}	-108,91*

C1: (MAPPOL + MAPBIO) vs MAP; C2: MAP vs MAPTF; C3: (MAPPOL + MAPBIO) vs MAPTF; C4: MAPPOL vs MAPBIO; MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar; **, *, ° e °° significativos a 1, 5, 10 e 20 %, respectivamente e ns, não significativo.

Tabela 4 – Eficiência agrônômica (EA %) na produção de massa de matéria seca (*mMS_PA*) de fontes fosfatadas com tecnologia associada nos três ciclos de cultivo

FONTE	Primeiro ciclo	Segundo ciclo	Terceiro ciclo
MAPPOL	91,98	131,74	242,86
MAPTF	56,36	86,99	151,77
MAPBIO	128,18	193,38	152,28

MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar.

Ainda é pouco conhecida a utilização de biochar como material de revestimento para fontes fosfatadas solúveis, mas já é relatado na literatura que os biocarvões podem ser utilizados para produzir fertilizantes de liberação de P por um período de tempo maior. Os biocarvões, em geral, possuem alta porosidade, área superficial específica elevada e presença de vários grupos funcionais que são capazes de armazenar P (Glaser & Lehr, 2019; Marcińczyk & Oleszczuk, 2022).

Em 2013, o custo por tonelada de biocarvão já era da ordem de U\$ 300-700 por tonelada (Joseph et al., 2013), o que pode inviabilizar a sua utilização extensiva em

grandes áreas. Como solução, o biochar pode ser utilizado como material de revestimento, alterando a disponibilidade do nutriente e utilizando menores quantidades do produto.

A utilização de fertilizantes revestidos com polímeros já tem sido relatada na literatura, mas com resultados controversos. No presente trabalho, as tecnologias de revestimento obtiveram melhores resultados em relação ao MAP e a eficiência agrônômica do MAPPOL foi superior ao MAP no segundo e terceiro ciclo de cultivo. Porém, Chagas et al. (2016) realizaram experimento com superfosfato triplo convencional e revestido com polímero, utilizando como planta teste a cebola, e verificaram que a massa de bulbos, o teor de P e a eficiência agrônômica para P em plantas de cebola foram influenciados significativamente ($p \leq 0,05$) apenas pelas doses de fósforo, mas não pelas fontes utilizadas.

Figueiredo et al. (2012) não encontraram diferenças entre a fonte revestida com polímero e a fonte solúvel, utilizando como fonte solúvel o MAP e o superfosfato triplo, no cultivo de milho em solo argiloso, o que leva às incertezas quanto à utilização de fontes revestidas com polímeros. De forma análoga, Valderrama et al. (2011) verificaram que os fertilizantes revestidos por polímeros (ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio) não foram eficientes, pois proporcionaram resultados semelhantes aos mesmos fertilizantes convencionais, para os teores foliares de N, P e K, componentes de produção e produtividade de grãos de milho irrigado.

O MAP foi mais eficiente em relação ao MAPTF para todas as variáveis analisadas no primeiro e segundo ciclos de cultivo, exceto para o tP_{F2} (C2, Tabela 3). A eficiência agrônômica do MAPTF também foi inferior ao MAP no primeiro e segundo ciclos de cultivo, com valores de 56,36 e 86,99 %, respectivamente (Tabela 4). Porém, no terceiro ciclo de cultivo o MAPTF foi mais eficiente em relação ao MAP para todas as variáveis analisadas. A eficiência agrônômica também foi maior, com valor de 151,77 %.

Os melhores resultados obtidos pelo MAP em relação ao MAPTF nos dois primeiros ciclos de cultivo se devem, sobretudo, à cinética de liberação de P e à demanda inicial das plantas de milho. O MAPTF é formado por uma mistura de MAP e torta de filtro, o que aumenta o contato do fosfato com a matéria orgânica e, conseqüentemente, possibilita a formação de compostos com maior reversibilidade em relação aos óxidos de Fe e Al (Tisdale & Nelson, 1993). Além disso, o processo de fabricação do fertilizante gera um produto peletizado e com densidade mais elevada em relação ao MAP. A junção desses fatores altera o padrão de liberação de P da fonte fertilizante, o que pode não ter suprido a demanda inicial de P das plantas de milho.

O MAP, por ter alta solubilidade, supriu mais prontamente P às plantas (Rivaie et al., 2008), produzindo melhores resultados. Já no terceiro ciclo de cultivo, a redução da intensidade das perdas de P por adsorção associado à cinética de liberação de nutriente pelo fertilizante permitiram maior absorção quando se utilizou o MAPTF, obtendo melhores resultados em relação ao MAP.

A utilização de torta filtro associada às fontes solúveis tem sido relatada na literatura. Borges et al. (2019) verificaram que a adição de torta de filtro ao superfosfato triplo teve efeito positivo no acúmulo de P na planta, principalmente em solo argiloso, onde os aumentos foram de aproximadamente 100 mg P vaso⁻¹, correspondendo a 50 % de aumento em relação à fonte sem adição de torta de filtro.

Singh et al. (1988) verificaram que a aplicação de torta de filtro apresentou interação positiva com fontes minerais de P, o que pode ser atribuído a uma maior disponibilidade de P como consequência da menor adsorção no solo e pela liberação de ácidos orgânicos no meio, que competem pelos sítios de adsorção de P.

Os fertilizantes revestidos (MAPPOL + MAPBIO) foram mais eficientes em relação ao MAPTF para todas as variáveis analisadas no primeiro e segundo ciclos de cultivo, contudo, o MAPTF foi mais eficiente em relação aos fertilizantes revestidos no terceiro ciclo de cultivo para o *tP_F3* (C3, Tabela 3). Em média, os fertilizantes revestidos produziram resultados 77,86 e 49,32 % superiores em relação ao MAPTF para a *mMS_PA*, 21,60 e 13,86 % para o *tP_F* e 222,90 e 35,65 % para AF no primeiro e segundo ciclos de cultivo, respectivamente.

Essas diferenças entre os fertilizantes podem estar relacionadas ao modo de fabricação do MAPTF, que consiste na adição de torta de filtro ao MAP pelo processo de peletização, gerando um produto mais denso e com maior contato do MAP com o material orgânico, o que altera a cinética de liberação de P. Já os fertilizantes revestidos possuem uma camada externa que é capaz de alterar a cinética de liberação de P, a depender do coeficiente de permeabilidade do material de revestimento. Por não serem produtos peletizados, a perfusão de água para o seu interior, solubilização do fertilizante e liberação do nutriente ocorrem de maneira mais dinâmica, o que pode ter explicado os melhores resultados obtidos pelos fertilizantes revestidos frente ao MAPTF.

Entre os fertilizantes revestidos, o MAPBIO foi mais eficiente em relação ao MAPPOL para as variáveis *mMS_PA* e AF no primeiro e segundo ciclos de cultivo. O MAPBIO apresentou incremento em relação ao MAPPOL de 34,61 % para *mMS_PA1*,

30,91 % (AF1), 31,14 % (*mMS_PA2*) e 13,83 % (AF2). No terceiro ciclo de cultivo o MAPBIO foi mais eficiente em relação ao MAPPOL para a AF.

As diferenças encontradas entre os fertilizantes revestidos devem estar associadas às características de cada revestimento. O revestimento polimérico no MAPPOL atua como uma barreira física que impede a rápida solubilização do grânulo e é responsivo à umidade do solo, alterando sua solubilidade de acordo com o conteúdo volumétrico de água no solo (Tomaszewska et al., 2001; Mikula et al., 2020).

O MAPBIO possui revestimento com biochar, que é uma superfície com potencial de armazenamento de P (Schneider & Haderlein, 2016; Marcińczyk & Oleszczuk, 2022). Cada uma das estruturas de revestimento possui uma cinética de liberação distinta em função do conteúdo volumétrico de água do meio e ao longo dos ciclos de cultivo. De maneira geral, nas condições experimentais deste trabalho, o padrão de liberação de P observado pelo MAPBIO produziu melhorias no desenvolvimento inicial da cultura do milho.

O conteúdo volumétrico de água no solo também influenciou os resultados de *mMS_PA*, *tP_F* e AF nos três ciclos de cultivo, sendo os menores valores registrados a 60 % CC em relação a 70 e 80 % CC (C5, Tabela 5). De maneira geral, os resultados obtidos para todas as variáveis analisadas foram superiores a 80 % CC em relação a 70 % CC (C6, Tabela 5). O conteúdo volumétrico de água atua na solubilização do fertilizante fosfatado e, conseqüentemente, em sua disponibilização e transporte para as plantas (Wei et al., 2017), a depender da tecnologia associada utilizada e das características de liberação de cada uma delas.

A eficiência das tecnologias associadas à fonte solúvel consiste em alterar a cinética de liberação da fonte solúvel (Lustosa Filho et al., 2019), especialmente quando o conteúdo volumétrico de água no solo se reduz e, conseqüentemente, o fluxo difusivo de P também é baixo, aumentando o tempo de contato do P com a matriz do solo e potencializando os fenômenos de adsorção.

Por outro lado, em conteúdos volumétricos de água mais elevados, como 80 % CC, há redução na interação P-coloide e aumenta-se a difusão de P até a zona radicular (Novais e Smyth, 1999), melhorando a absorção e aumentando a eficiência da adubação, mesmo em fontes solúveis, como o MAP. Por essa razão, em situações de veranico, frequentemente observadas em campo, a eficiência das tecnologias associadas tende a ser maior em relação à fonte solúvel, pois reduz a liberação de P em baixos conteúdos volumétricos, minimizando a adsorção.

Tabela 5 - Contrastes médios (Ci) da influência dos conteúdos volumétricos de água na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*) e área foliar (AF)

Variáveis	C5	C6
1° Ciclo		
<i>mMS_PA1</i> (g/vaso)	-25,02**	-13,8**
<i>tP_F1</i> (g/kg)	-0,76**	-0,28**
AF1 (cm ²)	--3724,62**	-2388,38**
2° Ciclo		
<i>mMS_PA2</i> (g/vaso)	-5,75**	-2,27**
<i>tP_F2</i> (g/kg)	-0,82**	0,00 ^{ns}
AF2 (cm ²)	-1720,78**	-567,81**
3° Ciclo		
<i>mMS_PA3</i> (g/vaso)	-3,74**	-0,9**
<i>tP_F3</i> (g/kg)	-0,38**	-0,21*
AF3 (cm ²)	-800,10**	-232,06**

C5: 60 vs (70 + 80 % CC); C6: 70 % CC vs 80 % CC; ** significativo a 1 %

No primeiro ciclo de cultivo, a 60 % CC, O MAP foi mais eficiente em relação aos fertilizantes revestidos para as variáveis *mMS_PA* e AF e não se diferiram para o *tP_F1* (C7, Tabela 6). Porém, no segundo ciclo de cultivo, para todas as variáveis analisadas os fertilizantes com revestimento foram mais eficientes em relação ao MAP. No terceiro ciclo não houve diferenças entre as fontes.

Os resultados inferiores de *mMS_PA* e AF no primeiro ciclo de cultivo a 60 % CC obtidos pelas tecnologias associadas se devem, sobretudo, à atuação do MAPPOL, que obteve média inferior em relação ao MAP. Isso ocorre, pois, o revestimento polimérico atua como uma camada protetora, impedindo a rápida solubilização do grânulo, especialmente em baixos conteúdos volumétricos de água, em que os poros se contraem e reduzem a liberação do nutriente para o meio (Mikula et al., 2020). O experimento manteve a umidade do solo em 60 % CC, o que contribuiu para uma menor liberação de P e, conseqüentemente, menor desenvolvimento inicial da cultura do milho.

Tabela 6 - Contrastes médios (Ci) do desdobramento das quatro fontes de fertilizantes fosfatado em função do conteúdo volumétrico de água na produção de massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de P na folha (*tP_F*) e área foliar (AF)

Variáveis	60 % CC				70 % CC				80 % CC			
	C7	C8	C9	C10	C7	C8	C9	C10	C7	C8	C9	C10
<i>mMS_PA1</i> (g/vaso)	-3,77*	13,35**	9,58**	-12,12**	16,22**	4,76*	20,98**	0,28 ^{ns}	8,84*	17,49**	13,26**	-17,68**
<i>tP_F1</i> (g/kg)	0,25 ^{ns}	0,76**	1,01**	0,02 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,09**	0,44*	0,10 ^{ns}	-0,38*	-0,05 ^{ns}	-0,33 ^o	0,08 ^{ns}
AF1 (cm ²)	-1917**	3416**	1499**	-1321**	1858**	2936**	4795**	-650 ^{ns}	1368**	1813**	3182**	-2294**
<i>mMS_PA2</i> (g/vaso)	1,96**	1,78*	3,73**	-2,77**	2,67**	-0,35 ^{ns}	2,32**	-1,88**	3,58**	0,28 ^{ns}	3,86**	-3,45**
<i>tP_F2</i> (g/kg)	0,56**	0,46**	1,02**	0,14 ^{ns}	0,91**	-0,93**	-0,02 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,76**	-0,88**	-0,12 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
AF2 (cm ²)	293 ^o	727**	1020**	-291 ^{oo}	482**	133 ^{ns}	616**	-83 ^{ns}	366*	349 ^o	715**	-732**
<i>mMS_PA3</i> (g/vaso)	0,10 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,81**	-4,25**	-2,44 ^{ns}	-0,56 ^{ns}	0,94**	1,23**	2,18 ^o	-0,11 ^{ns}
<i>tP_F3</i> (g/kg)	0,14 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,60**	-0,38*	-0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,48*	-0,44*	-0,04 ^{ns}
AF3 (cm ²)	1 ^{ns}	101 ^{ns}	103 ^{ns}	90 ^{ns}	325**	-922**	-597**	-235*	177*	258**	436**	-182 ^o

C7: (MAPPOL + MAPBIO) vs MAP; C8: MAP vs MAPTF; C9: (MAPPOL + MAPBIO) vs MAPTF; C10: MAPPOL vs MAPBIO; MAP: Monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; MAPBIO: MAP revestido com biochar; **, *, ^o e ^{oo} significativos a 1, 5, 10 e 20 %, respectivamente e ns, não significativo

Este comportamento é desejado, pois em situação real de campo, por ocasião de irrigação ou chuva, ocorre liberação do nutriente em maiores conteúdos volumétricos de água, o que facilita o transporte e absorção pelas plantas. Já no segundo ciclo de cultivo, mesmo mantendo o conteúdo volumétrico, os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP, fato atribuído à cinética de liberação do nutriente, que reduz a adsorção e permite uma maior absorção pelas plantas (Lustosa Filho et al., 2020).

Quando se aumenta o conteúdo volumétrico de água a 70 % CC os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP para a *mMS_PA1* e AF1 no primeiro ciclo de cultivo (C7, Tabela 6). Já no segundo e terceiro ciclos, os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP para todas as variáveis, apenas não se diferiram para o *tP_F3* (C7, Tabela 6). A 80 % CC, os fertilizantes revestidos obtiveram melhores resultados em relação ao MAP para todas as variáveis, exceto *tP_F1* e *tP_F3* (C7, Tabela 6).

Conforme ocorre o aumento do conteúdo volumétrico de água no solo, há uma maior solubilização dos fertilizantes e, conseqüentemente, maior liberação de P para as plantas

(Wei et al., 2017). Essa liberação proveniente dos fertilizantes revestidos tende a ocorrer em condições mais propícias, favorecendo uma maior disponibilidade às plantas, o que permitiu maior absorção de P ao longo dos ciclos de cultivo (Everaert et al., 2016), explicando os melhores resultados em relação ao MAP.

A utilização de biochar associado a uma fonte solúvel já vem sendo relatado e os autores verificaram aumento de disponibilidade do P no solo, alegando que o P armazenado no biochar constitui um reservatório a médio e longo prazo para as culturas, além de ser necessária uma menor dose de P para se manter teores adequados de P no solo (Li et al., 2020).

Carneiro et al (2021) verificaram que a associação de P a uma fonte fosfatada solúvel (superfosfato triplo) alterou o padrão de liberação de P e foram observadas produtividades semelhantes ou superiores em relação à fonte solúvel convencional, tanto a curto quanto a longo prazo, para os cultivos de diferentes culturas (capim, milho e feijão).

A 60 % CC, o MAP obteve melhores resultados em relação ao MAPTF para todas as variáveis analisadas no primeiro e segundo ciclos de cultivo, porém, não houve diferenças entre as fontes no terceiro ciclo (C8, Tabela 6). Os melhores resultados obtidos pelo MAP nesse conteúdo volumétrico de água estão relacionados à solubilização do fertilizante, que permitiu maior absorção pelas plantas de milho. A solubilização do MAPTF e consequente disponibilização de P às plantas tende a ser inferior devido ao pellet ser mais denso em relação aos demais fertilizantes, dificultando a perfusão de água e solubilização.

A 70 % CC, o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAP para todas as variáveis no primeiro ciclo de cultivo. No segundo ciclo o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAP para o tP_{F2} . No terceiro ciclo, o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAP para todas as variáveis analisadas (C8, Tabela 6). A 80 % CC, nos três ciclos de cultivo, o MAPTF obteve melhores resultados em relação ao MAP para as variáveis mMS_{PA} e AF, porém, não se diferenciaram para o tP_{F1} e o MAPTF foi inferior ao MAP para o tP_{F2} e tP_{F3} (C8, Tabela 6).

O aumento do conteúdo volumétrico de água sugere uma maior solubilização dos fertilizantes, especialmente os de baixa solubilidade (Carneiro et al., 2021; Everaert et al., 2016; Rivaie et al., 2008), como o MAPTF, e isso pode ter papel importante em sua eficiência, especialmente em cultivos no campo, em que existe um dinamismo maior do conteúdo volumétrico de água no solo. A cinética de liberação de nutriente nos conteúdos volumétricos de 70 e 80 % CC resultaram em sua maior eficiência em relação ao MAP,

reduzindo as perdas no sistema solo-planta, propiciando maior desenvolvimento da cultura do milho.

Borges et al (2019) também verificaram que o uso associado de uma fonte solúvel (superfosfato triplo) e torta de filtro melhoraram a disponibilidade de P no solo, possibilitando aumentos na produção de biomassa da cana-de-açúcar e maior eficiência no uso de P quando o solo era mantido a 70 % CC ou superior.

No primeiro e segundo ciclos de cultivo, os fertilizantes revestidos obtiveram melhores resultados em relação ao MAPTF a 60 % CC para todas as variáveis e não se diferenciaram no terceiro ciclo de cultivo (C9, Tabela 6). A 70 % CC, os fertilizantes revestidos se sobressaíram em relação ao MAPTF nos dois primeiros ciclos de cultivo para todas as variáveis, apenas não se diferenciaram para o tP_F2 e no terceiro ciclo de cultivo o MAPTF obteve melhores resultados para a AF3 (C9, Tabela 6). A 80 % CC, os fertilizantes revestidos obtiveram melhores resultados frente ao MAPTF para a mMS_PA e AF nos três ciclos de cultivo, mas o MAPTF obteve melhores resultados para tP_F1 e tP_F3 (C9, Tabela 6).

Quando se avalia a eficiência das tecnologias associadas nos três conteúdos volumétricos de água analisados, observa-se que os fertilizantes revestidos conseguiram melhor atender a demanda da cultura do milho e este fenômeno pode estar relacionado à cinética de liberação de P advindo de cada fonte, em que houve maior dinamismo nas fontes de revestimento físico em relação ao MAPTF.

O MAPTF, pelo fato do processo de produção, que envolve a compressão do material gerando um produto mais denso em relação aos demais fertilizantes, é de se esperar que ocorra menor liberação de P, o que contribuiu para a baixa produtividade da cultura do milho. Em culturas de ciclos mais longos, uma liberação mais lenta de P pode ser benéfica como adubação de manutenção, podendo inclusive associar o uso das tecnologias associadas, em que aos fertilizantes de revestimento físico disponibilizam mais prontamente o P, suprimindo a demanda inicial das culturas e o MAPTF supre P a um período maior de tempo.

O MAPBIO foi mais eficiente em relação ao MAPPOL a 60 % CC para as variáveis mMS_PA e AF no primeiro e segundo ciclos de cultivo e não se diferenciaram quanto ao tP_F e no terceiro ciclo de cultivo não houve diferença entre as fontes para as variáveis analisadas (C10, Tabela 6). A 70 % CC, o MAPBIO obteve melhores resultados em relação ao MAPPOL apenas para mMS_PA2 e AF3 (C10, Tabela 6). A 80 % CC o MAPBIO foi mais eficiente em relação ao MAPPOL para mMS_PA e AF no primeiro e

segundo ciclos de cultivo. Já no terceiro ciclo, o MAPBIO se sobressaiu em relação ao MAPPOL apenas para a AF (C10, Tabela 6).

Apesar de ambos os fertilizantes serem revestidos, existem diferenças entre os funcionamentos de cada um dos revestimentos que pode ter resultado em maiores valores de *mMS_PA* e AF para o MAPBIO em relação ao MAPPOL nos três ciclos de cultivo.

O revestimento do MAPPOL apresentou maior sensibilidade ao conteúdo volumétrico de água, liberando-o em condições mais propícias à sua difusão (Tomaszewska et al., 2002; Borsari, 2013), o que não é verificado no MAPBIO, o que pode ter permitido uma maior liberação de P através do revestimento com biochar, resultando em melhores resultados de *mMS_PA* e AF.

Avaliar a eficiência de um fertilizante com tecnologia associada é algo complexo, pois fatores conjuntos atuam alterando a cinética de liberação de nutriente de uma fonte. Isso ocorre, pois, o solo é um meio dinâmico e a eficiência das tecnologias associadas depende de condições muito específicas do meio em que é aplicado. Porém, espera-se que a disponibilidade no nutriente seja assegurada por um maior período de tempo pela tecnologia associada, melhorando a absorção de P pelas plantas.

CONCLUSÃO

Os fertilizantes revestidos foram mais eficientes em relação ao MAP nos três ciclos de cultivo, evidenciando que a alteração de cinética de liberação de nutrientes promoveu melhorias no desenvolvimento inicial da cultura do milho.

O MAPTF proporciona maior desenvolvimento da cultura do milho em relação ao MAP a partir de 60 dias, o que sugere combinação de tecnologias associadas, em que o fertilizante prontamente solúvel liberam mais prontamente P e o MAPTF promove liberação a longo prazo.

A cinética de liberação do MAPBIO produziu melhores resultados em relação ao MAPPOL para o desenvolvimento inicial da cultura do milho.

Os fertilizantes com tecnologia associada são mais eficientes em conteúdos volumétricos de água mais baixos (60 % CC), o que mostra seu potencial uso em condições de campo para cultivos não irrigados.

REFERÊNCIAS

- ALABI, K. E., SORENSEN, R. C., KNUDSEN, D., & REHM, G. W. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*, 50:937–94, 1986.
- ALMEIDA, J. A., TORRENT, J., & BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:985-1002, 2003.
- ALVAREZ, V. V. H., & ALVAREZ, G. A. M. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 3:24-33, 2006.
- AL-ZAHRANI, S. M. Utilization of polyethylene and paraffin waxes as controlled delivery systems for different fertilizers. *Industrial & engineering chemistry research*, 39:367-371, 2000.
- BORSARI F. Fertilizantes inteligentes: As novas tecnologias permitem o consumo dos nutrientes pelas plantas de forma gradativa, lenta e controlada. *Agro DBO*. 54-7, 2013.
- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- CARNEIRO, J. S. DA S., RIBEIRO, I. C. A., NARDIS, B. O., BARBOSA, C. F., LUSTOSA FILHO, J. F., & MELO, L. C. A. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of the Total Environment*, 760:143955, 2021.
- CHAGAS, W. F. T., GUELFY, D. R., EMRICH, E. B., SILVA, A. L., & FAQUIN, V. Agronomic efficiency of polymer-coated triple superphosphate in onion cultivated in contrasting texture soils. *Revista Ciência Agronômica*, 47:439-446, 2016.
- CHIEN, S. H., PROCHNOW, L. I., TU, S., & SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89:229-255, 2011.
- COSTA, J. P. da, BARROS, N. F. D., ALBUQUERQUE, A. W. D., MOURA FILHO, G., & SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10:828–835, 2006.
- EVERAERT, M., WARRINNIER, R., BAKEN, S., GUSTAFSSON, J. P., DE VOS, D., & SMOLDERS, E. Phosphate-exchanged Mg–Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4:4280-4287, 2016.
- FERNÁNDEZ-PÉREZ, M., VILLAFRANCA-SÁNCHEZ, M., FLORES-CÉSPEDES, F., & DAZA-FERNÁNDEZ, I. Ethylcellulose and lignin as bearer polymers in controlled release formulations of choridazon. *Carbohydrate Polymers*, 83:1672-1679, 2011.

- FIGUEIREDO, C. C. de, BARBOSA, D. V., DE OLIVEIRA, S. A., FAGIOLI, M., & SATO, J. H. Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. *Revista Ciência Agronômica*, 43:446, 2012.
- GLASER, B., & LEHR, V. I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific reports*, 9:1-9, 2019.
- HOAGLAND, D. R., & ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California agricultural experiment station, 347, 1950.
- JOSEPH, S. D., GRABER, E. R., CHIA, C., MUNROE, P., DONNE, S., THOMAS, T., NIELSEN, S., MARJO, C., RUTLIDGE, H., PAN, G. X., Li, L., TAYLOR, P., RAWAL, A. & HOOK, J. Shifting paradigms: development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Management*, 4:323-343, 2013.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of The Total Environment*, 709:136028, 2020.
- MARCIŃCZYK, M., & OLESZCZUK, P. Biochar and engineered biochar as slow-and controlled-release fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 130685, 2022.
- MIKULA, K., IZYDORCZYK, G., SKRZYPCZAK, D., MIRONIUK, M., MOUSTAKAS, K., WITEK-KROWIAK, A., & CHOJNACKA, K. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. *Science of The Total Environment*, 712:136365, 2020.
- NAZ, M. Y., & SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: A review. *Journal of Controlled Release*, 225:109-120, 2016.
- NOVAIS, R. F., & SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1ª ed. Viçosa; Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- OLSEN, S. R., & WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society of America Journal*, 21:144-149, 1957.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12:211-216, 1988.
- RIVAIE, A. A., LOGANATHAN, P., GRAHAM, J. D., TILLMAN, R. W., & PAYN, T. W. Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 82:75-88, 2008.
- RUIZ, H. A., FERNANDES, B., NOVAIS, R. F., & FERREIRA, P. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12:43-48, 1988.
- SCHNEIDER, F., & HADERLEIN, S. B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus—mechanistic insights. *Geoderma*, 277:83-90, 2016.

- SILVA, A. D. A., SILVA, T. S., VASCONCELOS, A. C. P. D., & LANA, R. M. Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*, 28:240-250, 2012.
- SINGH, Y., SINGH, B., MASKINA, M. S., & MEELU, O. P. Effect of organic manures, crop residues and green manure (*Sesbania aculeata*) on nitrogen and phosphorus transformations in a sandy loam at field capacity and under waterlogged conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 6:183-187, 1988.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 4, 2017.
- TISDALE, L. S., NELSON, W. L., & BEATON, J. D. Soil fertility and fertilizers. New York: Lehig Press, 1993.
- TOMASZEWSKA, M., JARPSOEWICZ, A., & KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*, 146:319-323, 2002.
- VALDERRAMA, M., BUZETTI, S., BENETT, C. G. S., ANDREOTTI, M., & TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41:254-263, 2011.
- WEI, Y., LI, J., LI, Y., ZHAO, B., ZHANG, L., YANG, X., & CHANG, J. Research on permeability coefficient of a polyethylene controlled-release film coating for urea and relevant nutrient release pathways. *Polymer Testing*, 59:90-98, 2017.

CAPÍTULO 6

FRACIONAMENTO DE P APÓS SUCESSIVAS ADUBAÇÕES COM FERTILIZANTES FOSFATADOS COM TECNOLOGIA ASSOCIADA EM LAVOURA DE CAFÉ

RESUMO

O fósforo (P) pode ser encontrado no solo basicamente em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi). Porém, independentemente do composto a que o P está ligado, ele pode ser analisado de acordo com a sua disponibilidade à absorção vegetal. Os níveis de labilidade podem ser determinados por extratores químicos, sendo formas lábeis, moderadamente lábeis, labilidade restrita e não-lábeis. As diferentes técnicas de fertilização de longo prazo, bem como a utilização de fertilizantes com tecnologia associada podem alterar a disponibilidade de P ao longo do tempo, aumentando a capacidade de suprimento às plantas. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada e seus efeitos sobre a disponibilidade de fósforo no solo após adubações sucessivas em lavoura de café. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2$, sendo os fatores: três fontes fosfatadas (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero – MAPPOL e MAP + torta de filtro – MAPTF), duas doses, sendo 100 e 150 % da recomendação de adubação fosfatada para cafeeiro segundo Prezotti et al. (2007) e duas fontes nitrogenadas (ureia convencional - UC e ureia revestida com polímero e enxofre - UPS), totalizando 12 tratamentos, sendo seis plantas de café por unidade experimental. O solo foi coletado na profundidade de 0-10 cm após três anos de cultivo do cafeeiro em campo para se determinar as frações lábeis, moderadamente lábeis e de labilidade restrita através do fracionamento sequencial de P. Como resultado observou-se os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada obtiveram melhores resultados em relação ao MAP quanto aos teores de P inorgânico (Pi) e orgânico (Porg) prontamente lábil (NaHCO_3 0,5M). Este resultado nos mostra que na fração mais lábil de P no solo houve aumento nos teores com a aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada. Para a fração moderadamente lábil, os fertilizantes com tecnologia associada obtiveram melhores resultados em relação ao MAP para os teores de Pi extraídos em HCl 1 M. Os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram teores médios (Pi) de $9,32 \text{ mg dm}^{-3}$ enquanto o MAP registrou valor de $6,75 \text{ mg dm}^{-3}$ para este extrator. Na fração de labilidade restrita, os fertilizantes com tecnologia associada também obtiveram melhores resultados em relação ao MAP para os teores de Porg extraídos em NaOH 0,5 M. A média obtida pelo MAP foi de $5,30 \text{ mg dm}^{-3}$ enquanto as tecnologias associadas registraram $7,98 \text{ mg dm}^{-3}$ (aumento de 50,56 %). Conclui-se que o efeito dos fertilizantes fosfatados com tecnologia associada a longo prazo pode ser observado pelo aumento dos teores de P nas frações lábeis, moderadamente lábeis e de labilidade restrita.

Palavras-chave: polímero, biochar, MAP, torta de filtro, fertilizante, fósforo

FRACTIONATION OF P AFTER SUCCESSIVE FERTILIZATION WITH PHOSPHATE FERTILIZERS WITH TECHNOLOGY IN COFFEE CROP

ABSTRACT

Phosphorus (P) can be found in the soil basically in organic (Po) and inorganic (Pi) forms. However, regardless of the compound to which P is linked, it can be analyzed according to its availability for plant absorption. The levels of lability can be determined by chemical extractors, being labile, moderately labile, restricted labile and non-labile forms. The different long-term fertilization techniques, as well as the use of fertilizers with associated technology, can change the availability of P over time, increasing the supply capacity to the plants. Therefore, this work aimed to evaluate the effects of phosphate fertilizers with associated technology and their effects on the availability of phosphorus in the soil after successive fertilizations in coffee crops. The experimental design was in randomized blocks, with three replications, in a $3 \times 2 \times 2$ factorial arrangement, with the following factors: three phosphate sources (conventional monoammonium phosphate – MAP, polymer-coated MAP – MAPPOL and MAP + filter cake – MAPTF), two doses, being 100 and 150 % of the recommended phosphorus fertilizer for coffee plants according to Prezotti et al. (2007) and two nitrogen sources (conventional urea - UC and urea coated with polymer and sulfur - UPS), totaling 12 treatments, with six coffee plants per experimental unit. Soil was collected at a depth of 0-10 cm after three years of coffee cultivation in the field to determine labile, moderately labile and restricted labile fractions through sequential fractionation of P. As a result, it was observed that phosphate fertilizers with associated technology were superior to MAP in terms of labile inorganic (Pi) and organic (Porg) P (NaHCO_3 0.5M) contents. This result shows us that in the most labile fraction of P in the soil there was an increase in levels with the application of phosphate fertilizers with associated technology. For the moderately labile fraction, fertilizers with associated technology were superior to MAP for Pi contents extracted in 1 M HCl. Fertilizers with associated technology showed average levels (Pi) of 9.32 mg dm^{-3} while MAP recorded a value of 6.75 mg dm^{-3} for this extractor. In the restricted lability fraction, fertilizers with associated technology were also superior to MAP for Porg contents extracted in 0.5 M NaOH. The average obtained by MAP was 5.30 mg dm^{-3} while the associated technologies recorded 7.98 mg dm^{-3} (50.56 % increase). It is concluded that the effect of phosphate fertilizers with associated technology in long-term can be observed by the increase in P levels in the labile, moderately labile and restricted labile fractions.

Keywords: polymer, biochar, MAP, filter cake, fertilizer, phosphorus

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial para se manter a produtividade agrícola em solos tropicais, em especial pelos baixos teores verificados, que ocorrem em consequência do intemperismo, sendo necessária adubações de correção dos teores de nutrientes no solo e manutenção. A fertilização com P influencia as concentrações disponíveis no solo deste nutriente, sendo necessário o entendimento de como o P é influenciado por diferentes estratégias de fertilização de longo prazo (Qiong et al., 2022).

Ao longo do tempo foram criadas denominações para o P presente no solo, introduzindo o conceito de fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado (Santos et al., 2008). Porém, independentemente da natureza química, o P pode ser discutido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo (Santos et al., 2008), pois impacta diretamente na disponibilidade de P durante o ciclo de uma cultura. Nesse contexto, surge o conceito de formas prontamente lábeis, moderadamente lábeis, labilidade restrita e não-lábeis (Dalal, 1977).

A dinâmica das formas de P é de fundamental importância para o estudo de fertilidade do solo, pois consegue observar a distribuição de formas lábeis de P, sobretudo a ciclagem da forma orgânica, que é um importante fator na disponibilização desse nutriente às plantas (Adepetu & Corey, 1976), especialmente em solos com alta capacidade de adsorção de P.

Práticas de manejo do solo que incrementam os teores de matéria orgânica aumentam a formação de compostos orgânicos de P, assim como ligações fósforo-metal-húmicos, que também são dependentes da atividade biológica, da vegetação predominante e das características físico-químicas do meio (Walker & Syers, 1976; Cross & Schlesinger, 1995), especialmente quando se considera disponibilidade em curto prazo.

As formas inorgânicas de P são dependentes, sobretudo, do grau de intemperismo do solo, da mineralogia e textura da fração argila e podem ser adicionadas ao solo através de fertilizantes, como o monoamônio fosfato (MAP) convencional ou acrescido de tecnologia associada, alterando a dinâmica de P no solo.

Essa dinâmica pode ser compreendida através do fracionamento sequencial empregando soluções químicas com diferentes capacidades de extração (Silva & Raij, 1999), avaliando a labilidade de P. Dentre as técnicas mais utilizadas, tem ganhado visibilidade o fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), pelo qual podemos determinar as frações Po e Pi em diferentes graus de labilidade e ao longo do tempo.

Na literatura poucos estudos são apresentados sobre a dinâmica e compartimentos de P no solo pelo uso de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada e como o manejo do solo e da fertilização alteram esses compartimentos. A utilização de tecnologias associadas aos fertilizantes fosfatados solúveis tende a alterar a cinética de liberação do nutriente, liberando-o em condições mais propícias, como maior umidade do solo (Tomaszewska et al., 2001) e/ou melhoram o ambiente no entorno do grânulo pela adição de matéria orgânica (Borges et al., 2019; Li et al., 2020). Este fato favorece o aumento de atividade biológica, facilitando seu trânsito entre os compartimentos, pelas formas de fosfato de inositol, fosfolipídios e ácidos nucleicos.

Borges et al. (2019) já observaram que a adição de torta de filtro ao superfosfato triplo propiciou maior fração de P com labilidade intermediária, extraída em NaOH 0,1 M, o que pode representar um reservatório a médio e longo prazo, com suprimento mais gradual desse elemento. Os autores também concluíram que a adição de torta de filtro teve um efeito benéfico na redução da adsorção de P nos óxidos de Fe e Al, o que aumenta a disponibilidade de P e o suprimento às plantas.

Oliveira et al. (2022) verificaram que os níveis de fósforo no solo variaram em função das fontes (MAP e MAP revestido com polímero) e doses de P aplicadas à cana-de-açúcar, em que o MAP revestido disponibilizou os maiores teores de nutrientes (12,72 mg dm⁻³ P) enquanto o MAP convencional apresentou teor de 10,89 mg dm⁻³ P em compartimento prontamente lábil, extraído em resina de troca aniônica.

Sabe-se que as frações orgânicas e inorgânicas de P no solo podem atuar como fonte ou dreno, o que envolve fatores ambientais, condições de solo, manejo e fontes fertilizantes utilizadas. O fracionamento de Hedley tem se mostrado sensível a identificar os compartimentos de P no solo, porém, são escassas informações de como a utilização de fertilizantes com tecnologia associada são capazes de influenciar os compartimentos de P no solo ao longo do tempo. Posto isso, este trabalho teve como objetivo avaliar os compartimentos de P pela aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada após adubações sucessivas em lavoura de café.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi conduzido em uma lavoura de café conilon (*Coffea canephora*) localizada no município de Jerônimo Monteiro - ES (20°49'58" S e 41°24'51" W). O solo

da propriedade é um Argissolo Vermelho-Amarelo, de textura média, com relevo forte ondulado e o clima da região é o Cwa, segundo a classificação de Koppen.

Os cafeeiros utilizados para o experimento são da variedade clonal de café “Incaper 8142 - Conilon Vitória”, com 5 anos de idade. Foram utilizados 13 clones que compõem a variedade, dispostos em linhas, sendo que no experimento foram utilizadas apenas as linhas com o clone V12 (conhecido popularmente como clone 02). As linhas do cafeeiro, com o clone V12, não foram irrigadas durante o período do experimento. O espaçamento entre plantas utilizado foi de $2,5 \times 1,5$ m. O período experimental foi entre julho de 2017 a junho de 2020. Os dados de produtividade são apresentados na tabela 1 (Stauffer, 2020).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2$, sendo os fatores: três fontes fosfatadas (fosfato monoamônio convencional – MAP, MAP revestido com polímero – MAPPOL e MAP + torta de filtro – MAPTF), duas doses, sendo 100 e 150 % da recomendação de adubação fosfatada para cafeeiro segundo Prezotti et al. (2007) e duas fontes nitrogenadas (ureia convencional - UC e ureia revestida com polímero e enxofre - UPS), totalizando 12 tratamentos, sendo seis plantas de café por unidade experimental.

Foram coletadas amostras de solo (profundidade de 0 - 20 cm), na projeção da copa das plantas, para caracterização física (Teixeira et al., 2017) e química do solo (Silva, 2009) nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019. Após as análises, foi realizada a calagem na superfície do solo, na projeção da copa das plantas, para elevar a saturação por bases para 60 % (Prezotti et al., 2007) em cada safra do cafeeiro P_2O_5 (Stauffer et al., 2020).

A adubação com N e P foi realizada para uma produtividade de 71 a 100 sc ha^{-1} de acordo com Prezotti et al. (2007), que corresponde a uma dose por safra de 440 e 75 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 , respectivamente. A quantidade do fertilizante fosfatado referente a dose 100 % é de 75 kg ha^{-1} de P_2O_5 e para a dose 150 % é de $112,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 (Stauffer et al., 2020).

Decorridas as três safras mencionadas, por se verificar aumento de produtividade do cafeeiro a partir da utilização de fontes fertilizantes com tecnologia associada, procedeu-se a coleta de solo a fim de avaliar as mudanças no compartimento de P a partir das fontes analisadas.

Tabela 1 - Médias de produtividade do cafeeiro conilon nas safras 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020 em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados e nitrogenados e das doses de fertilizantes fosfatados

Fertilizante fosfatado	Dose fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Produtividade (sc ha ⁻¹)		
			17/18	18/19	19/20
MAP	100 %	UC	68,43	77,00	76,31
		UPS	79,37	85,81	87,63
	150 %	UC	81,96	93,84	93,57
		UPS	86,59	101,98	101,38
MAPPOL	100 %	UC	75,00	94,70	87,55
		UPS	81,66	96,87	96,74
	150 %	UC	82,38	99,96	100,03
		UPS	96,59	103,28	106,53
MAPTF	100 %	UC	72,95	97,57	97,25
		UPS	87,90	102,93	106,63
	150 %	UC	82,20	100,93	100,96
		UPS	96,99	104,38	111,55

MAP: monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro.

O solo foi coletado na projeção da copa do cafeeiro, na profundidade de 0 – 10 cm, para realizar o fracionamento de P e determinar os compartimentos de P orgânico e o P inorgânico em todas as unidades experimentais. Foi utilizado o método desenvolvido por Hedley et al (1982), com adaptações desenvolvidas (Araújo et al., 1993; Camargo et al., 1999; Condron et al., 1985; Cross; Schlesinger, 1995; Tiessen & Moir, 1993) descrito por Andrade & Villani (2017).

Este método tem como objetivo determinar as formas lábeis (prontamente disponíveis), moderadamente lábeis (disponibilidade a médio prazo) e de labilidade restrita (disponibilidade a longo prazo). Para tal, a extração sequencial de P visa determinar em cada extrator o P inorgânico (Pi) e P total (Pt), exceto na primeira etapa, que é a resina de troca aniônica, em que será quantificado o P adsorvido à resina. O P orgânico (Porg) é determinado por diferença entre o Pt e o Pi.

Foram utilizados 0,5 g de solo coletado, seco e passado em peneira com malha de 2 mm para realizar as etapas de extração, sendo a primeira delas a extração em resina de troca aniônica, seguido por NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ pH 8,5, NaOH 0,1 mol L⁻¹, HCl 1 mol L⁻¹, NaOH 0,5 mol L⁻¹ e a etapa final a digestão de 0,25 g de solo restante para de determinar o P-residual no extrato.

Realizou-se uma relação entre o Pi e Porg em diferentes graus de labilidade por cada um dos extratores e sua relação com as tecnologias associadas em fertilizantes fosfatados e nitrogenados utilizados, avaliando seu efeito na disponibilidade de P após cultivos sucessivos.

Os dados foram submetidos à análise de variância e os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez & Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 5 e 10 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de P no solo variou em função das fontes fosfatadas aplicadas na lavoura de café conilon (Tabela 2). De maneira geral, as tecnologias associadas promoveram maior teor de P no compartimento prontamente lábil e de labilidade restrita (C1, Tabela 3). O MAP, por sua vez aumentou o teor de P na fração não lábil em relação às tecnologias associadas (C1, Tabela 3).

No compartimento prontamente lábil, a extração pelo método da resina de troca aniônica (P-resina) apresentou diferença entre o MAP e as fontes fosfatadas com tecnologia associada (C1, Tabela 3). As fontes com tecnologia associada, MAPPOL e MAPTF, apresentaram diferença entre si para este extrator (C2, Tabela 3).

O maior teor de P extraído em resina pelos fertilizantes com tecnologia associada em relação ao MAP se deve à cinética de liberação das fontes com tecnologia associada, que liberam o P em condições mais propícias, como elevada umidade de solo, fazendo com que permaneça maior tempo em compartimento lábil. A alta solubilidade do MAP e ausência de mecanismos de controle de solubilidade reduziram o teor de P neste compartimento.

A diferença observada entre as fontes com tecnologia associada pode estar relacionada às características de liberação de nutriente por fertilizantes polimerizados, que ao entrar em contato com água, esta penetra nas microfissuras do revestimento, aumentando a pressão osmótica e aumentando a difusão do nutriente para o meio (Tomaszewska et al., 2001), liberando-o em condição de maior conteúdo volumétrico de água no solo. Essa liberação coincide com as condições que propiciam maior atividade biológica no solo sugerindo uma maior permanência de P nesse compartimento na forma de, por exemplo, fosfato de inositol, fosfolipídeos e ácidos nucleicos, além de P inorgânico adsorvido com menor energia (P lábil).

Tabela 2 - Teores médios de P disponível em função dos extratores após aplicação dos fertilizantes fosfatados considerando as doses e fertilizantes nitrogenados

Extratores	Fertilizantes nitrogenados	Dose da fonte fosfatada (%)	Fonte de fertilizantes fosfatados		
			MAP	MAPPOL (mg dm ⁻³)	MAPTF
Resina Troca Aniônica	UC	100	3,84	4,14	4,44
		150	4,80	5,08	4,67
	UPS	100	4,35	4,63	4,27
		150	5,16	8,19	4,62
NaHCO ₃ 0,5M (Pi)	UC	100	65,22	89,88	96,80
		150	69,63	110,60	161,36
	UPS	100	69,08	112,23	94,63
		150	93,50	139,16	129,59
NaHCO ₃ 0,5M (Porg)	UC	100	5,56	20,42	37,70
		150	24,71	50,62	42,11
	UPS	100	7,68	34,19	25,83
		150	25,16	53,93	50,15
NaOH 0,1M (Pi)	UC	100	35,75	35,18	36,59
		150	35,47	38,40	40,98
	UPS	100	31,58	42,66	33,62
		150	42,15	44,27	37,98
NaOH 0,1M (Porg)	UC	100	22,61	22,10	22,90
		150	24,39	24,17	35,01
	UPS	100	27,75	22,26	20,47
		150	28,56	25,06	23,28
HCl 1M (Pi)	UC	100	6,17	7,10	9,33
		150	7,53	7,43	11,02
	UPS	100	6,19	8,40	8,23
		150	7,10	10,98	12,06
HCl 1M (Porg)	UC	100	4,81	7,01	4,65
		150	6,22	7,11	5,28
	UPS	100	4,18	4,63	4,23
		150	5,89	5,58	16,74
NaOH 0,5 M (Pi)	UC	100	7,68	6,44	6,44
		150	8,51	6,83	7,67
	UPS	100	7,78	7,50	7,89
		150	8,08	7,78	8,19
NaOH 0,5 M (Porg)	UC	100	4,77	6,77	8,01
		150	6,00	9,45	8,23
	UPS	100	4,55	6,40	8,45
		150	5,90	7,81	8,76
Digestão (P-residual)	UC	100	1607,68	1508,93	1208,87
		150	1568,00	1548,37	1643,23
	UPS	100	2005,76	1386,76	1404,53
		150	1907,84	1769,51	1923,00

MAP: monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro.

Tabela 3 - Contrastes ortogonais dos extratores de P considerando os fertilizantes fosfatados independente das quantidades dos fertilizantes fosfatados e dos fertilizantes nitrogenados

	Contrastes Ortogonais	
	C1	C2
Compartimentos		
Prontamente lábil	-66,49**	-5,79 ^{ns}
Moderadamente lábil	-5,26 ^{ns}	-2,51 ^{ns}
Labilidade restrita	-2,01**	-1,17*
Não lábil	223,17**	8,48 ^{ns}
Extratores		
Resina Troca Aniônica	-0,47*	1,01**
NaHCO ₃ 0,5M (Pi)	-42,43**	-7,63 ^{ns}
NaHCO ₃ 0,5M (Porg)	-23,60**	0,82 ^{ns}
NaOH 0,1M (Pi)	-2,47 ^{ns}	2,83 ^{ns}
NaOH 0,1M (Porg)	1,42 ^{ns}	-2,02 ^{ns}
HCl 1M (Pi)	-2,57**	-1,68**
HCl 1M (Porg)	-1,63 ^{ns}	-1,64 ^{ns}
NaOH 0,5 M (Pi)	0,67 ^{ns}	-0,41 ^{ns}
NaOH 0,5 M (Porg)	-2,68**	-0,75 ^{ns}
Digestão (P-residual)	223,17**	8,48 ^{ns}

C1: MAP vs (MAPPOL + MAPTF); C2: MAPPOL vs MAPTF; MAP: monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; ** e * significativos a 1 e 5 %, respectivamente, e ns, não significativo.

Os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada proporcionaram maiores teores de Pi e Porg prontamente lábeis (extraídos em NaHCO₃ 0,5M) em relação ao MAP (C1, Tabela 3). Por sua vez, os fertilizantes com tecnologia associada não se diferenciaram para os teores de P prontamente lábeis (C2, Tabela 3). O MAP apresentou média de 74,36 mg dm⁻³ para Pi e 15,78 mg dm⁻³ para Porg enquanto as tecnologias associadas apresentaram valores de 116,78 mg dm⁻³ (Pi) e 39,38 mg dm⁻³ (Porg) (Tabela 2).

Este resultado é relevante, pois indica que, de maneira geral, na fração mais lábil de P no solo houve aumento nos teores com a aplicação de fertilizantes fosfatados com tecnologia associada, seja pelo revestimento com polímeros ou adição de torta de filtro ao MAP.

Os teores mais baixos registrados pelo MAP podem estar associados à alta solubilidade da fonte solúvel e a ausência de mecanismos de liberação de P em condições favoráveis de solo, ocasionando a adsorção imediata e a migração para compartimentos menos lábeis. Quanto menor a permanência em compartimentos lábeis, mais rápido é o seu

trânsito para os compartimentos menos lábeis, reduzindo o aproveitamento do P via adubação química (Amaral et al., 2011).

A adição de tecnologia à fonte solúvel tem potencial de aumentar as frações lábeis de P (Borges et al., 2019; Lustosa Filho et al., 2020), pois promove a liberação do nutriente em condições favoráveis de solo (p.e elevado conteúdo volumétrico de água) e/ou melhora o ambiente na região de liberação de P (adição de matéria orgânica). Como resultado ocorre aumento do teor de matéria orgânica, aumento de cargas negativas e liberação de ácidos orgânicos. Além disso, diminui o tempo de contato do P com a matriz do solo, reduzindo as formas menos disponíveis pelo processo de adsorção (Wadt & Silva, 2011; Cruz et al., 2017).

Existem particularidades no funcionamento de cada tecnologia associada. O MAPPOL possui uma camada de revestimento responsiva à umidade solo, a solubilização do fertilizante em seu interior ocorre de acordo com a umidade (Mikula et al., 2020). Essa dinâmica de liberação permite que o nutriente seja liberado em condições mais propícias, além disso, o maior conteúdo volumétrico de água propicia maior atividade biológica e, conseqüentemente, maior presença no compartimento prontamente lábil.

O MAPTF, por ser um fertilizante organomineral, a matéria orgânica presente em sua constituição atua revestindo óxidos de Fe e Al e os ácidos orgânicos liberados competem pelos sítios de adsorção de P nos argilominerais, o que reduz a intensidade de adsorção e aumenta a disponibilidade de P (Andrade et al., 2003; Fernandes et al., 2015), elevando os teores de P no compartimento lábil.

Soma-se ainda que os compostos fósforo-metal-húmicos formados entre o P e a matéria orgânica tendem a possuir maior reversibilidade se comparado a óxidos, o que pode ter aumentado os teores de P extraídos em resina de troca aniônica e NaHCO_3 0,5M (Lustosa Filho et al., 2020).

Soltangheisi et al. (2019) encontraram aumento das frações lábeis de P em até 45,7 % ao se adicionar torta de filtro a uma fonte solúvel (superfosfato triplo). Os autores atribuíram esses resultados ao fato da torta de filtro ser um material orgânico e com alta capacidade de troca catiônica, o que pode reduzir a intensidade de adsorção de P e aumenta sua disponibilidade.

Oliveira et al. (2022), utilizando MAP revestido com polímeros verificaram que nas frações lábeis e moderadamente disponíveis o fertilizante revestido com polímero se apresentou mais eficiente. Contudo, Gazola et al. (2013) não encontram interação entre o MAP (convencional e revestido) e teor de fósforo residual no solo, o que demanda estudos

mais aprofundados para se estabelecer a relação entre os fertilizantes polimerizados e a disponibilidade de P no solo pelos diversos extratores.

De maneira geral, não houve diferenças entre as fontes com tecnologia associada e o MAP ou entre MAPPOL e MAPBIO para o compartimento moderadamente lábil. Contudo, neste compartimento, os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram melhores resultados em relação ao MAP e o MAPTF foi melhor em relação ao MAPPOL para o teor de Pi moderadamente lábil extraído em HCl 1 M (C1 e C2, Tabela 3).

Os fertilizantes com tecnologia associada apresentaram teores médios (Pi) de 9,32 mg dm⁻³ enquanto o MAP registrou valor de 6,75 mg dm⁻³ para o extrator HCl 1 M. O MAPTF apresentou valor 19,81 % superior em relação ao MAPPOL para esta mesma variável.

Os melhores resultados apresentados pelas tecnologias associadas em relação ao MAP na fração moderadamente lábil para o teor de Pi extraído em HCl 1M podem estar associados à cinética de liberação de P, ao revestimento dos óxidos de Fe e Al pela matéria orgânica e a formação de compostos orgânicos com P (Borges et al., 2019; Li et al., 2020; Lustosa Filho et al., 2020).

Tais mecanismos contribuem para a redução da intensidade de adsorção de P em óxidos de Fe e Al, que se iniciam pela adsorção-precipitação reversível do íon ortofosfato da solução do solo até sua irreversibilidade, do ponto de vista agrônomo (Novais et al., 2007; Fernández et al., 2008), diminuindo a labilidade de P, fenômeno que é observado mais pronunciadamente para as fontes solúveis, como o MAP.

Os melhores resultados obtidos pelo MAPTF em relação ao MAPPOL para labilidade moderada de P podem estar relacionados à migração de P dos compartimentos mais lábeis, que se dá através do tempo. Ressalta-se ainda que este compartimento tem importância na dinâmica de P e contribui para a absorção de P pelas culturas, especialmente as perenes (Tisdale & Nelson, 1993; Li et al., 2020).

Os fertilizantes com tecnologia associada obtiveram melhores resultados em relação ao MAP para o compartimento de labilidade restrita (C1, Tabela 3). Neste compartimento, as tecnologias associadas proporcionaram melhores resultados em relação ao MAP para os teores de Porg extraídos em NaOH 0,5 M (C1, Tabela 3). A média obtida pelo MAP foi de 5,30 mg dm⁻³ enquanto as tecnologias associadas registraram 7,98 mg dm⁻³ (aumento de 50,56 %). Observa-se que mesmo em compartimento de labilidade restrita houve aumento nos teores de P, fato que pode estar relacionado às adubações sucessivas durante as safras, que além de aumentarem os teores de P nos compartimentos lábeis e

moderadamente lábeis contribuíram para o aumento de P associado a ácidos fúlvicos e húmicos dentro de agregados (Condrón et al., 1985).

O MAP apresentou maiores valores de P para o compartimento não lábil em relação às tecnologias associadas (C1, Tabela 3). Enquanto os fertilizantes com tecnologia associada registraram valores médios de 1549,15 mg dm⁻³, o MAP apresentou valor de 1772,32 mg dm⁻³, fato esperado, pois o MAP convencional tende a apresentar teores mais elevados em formas de P mais estáveis no solo.

Os teores de Pi e Porg no compartimento de labilidade restrita (NaOH 0,5 M) e os teores de P não lábil não apresentaram diferenças entre as tecnologias associadas (C2, Tabela 3). Esses resultados demonstram que a adição de torta de filtro ou revestimento com polímeros apresentaram resultados semelhantes para esses compartimentos.

Quando se consideram as doses de P observa-se que o MAP e o MAPTF na dose de 150 % apresentaram maiores teores de P prontamente lábil, de labilidade restrita e não lábil em relação a 100 % (C3, Tabela 4).

Tabela 4 - Contraste ortogonal (C) dos extratores de P, considerando as doses dos fertilizantes fosfatados dentro dos fertilizantes fosfatados, independente dos fertilizantes nitrogenados

	Contrastes Ortogonal C3		
	MAP	MAPPOL	MAPTF
Compartimentos			
Prontamente lábil	33,61**	51,04**	64,38**
Moderadamente lábil	9,12 ^{ns}	6,83 ^{ns}	21,16**
Labilidade restrita	1,86*	2,38**	1,03 ^{ns}
Não lábil	368,96**	171,67 ^{ns}	476,41**
Extratores			
Resina Troca Aniônica	0,88**	2,25**	0,29 ^{ns}
NaHCO ₃ 0,5M (Pi)	14,41*	23,82**	49,76**
NaHCO ₃ 0,5M (Porg)	18,31*	24,97**	14,33*
NaOH 0,1M (Pi)	5,14*	2,42 ^{ns}	4,37*
NaOH 0,1M (Porg)	1,29 ^{ns}	2,43 ^{ns}	7,46 ^{ns}
HCl 1M (Pi)	1,13 ^{ns}	1,45*	2,76**
HCl 1M (Porg)	1,56 ^{ns}	0,53 ^{ns}	6,57**
NaOH 0,5 M (Pi)	0,57 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,77 ^{ns}
NaOH 0,5 M (Porg)	1,29 ^{ns}	2,04**	0,26 ^{ns}
Digestão (P-residual)	368,96**	211,11*	476,41**

C3: 150 % da dose vs 100 % da dose; MAP: monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; **e * significativos a 1 e 5 %, respectivamente, e ns, não significativo.

O MAPPOL apresentou maiores teores de P nos compartimentos prontamente lábil e de labilidade restrita na dose de 150 % em relação à 100 % (C3, Tabela 4). Como era de se esperar, o aumento de dose do fertilizante fosfatado sugere maiores teores de P, especialmente nos compartimentos mais lábeis (C3, Tabela 4). Isso ocorre, pois, em virtude do aumento da dose de P aplicada, podem-se saturar os sítios de adsorção de P nas regiões adjacentes aos grânulos, elevando a disponibilidade de P.

Observa-se que o efeito da dose no MAP e no MAPPOL ocorreram majoritariamente nos extratores de P prontamente lábil e não lábil (C3, Tabela 4). Já o MAPTF proporcionou maiores resultados também em extratores de labilidade moderada, sendo Pi extraído em NaOH 0,1 M e Pi e Porg extraídos em HCl 1M na dose de 150 % em relação a 100 % (C3, Tabela 4). Este fato pode estar relacionado à cinética de liberação de P, pois a adição de torta de filtro à fonte solúvel gera um produto peletizado, o que altera as características mecânicas do produto final e, conseqüentemente, a taxa de liberação de P, a depender do conteúdo volumétrico de água do meio.

Autores já vêm relatado um maior período de liberação do MAPTF em relação às demais tecnologias associadas, aumentando os teores de P no solo e mantendo-o em níveis agronomicamente adequados por até dois anos (Soltangheisi et al., 2019), em compartimentos lábeis e moderadamente lábeis, fato que pode ter ocorrido neste trabalho.

O MAP, de maneira geral, não influenciou os teores de P para extratores de labilidade moderada (C3, Tabela 4), fato atribuído à intensidade de adsorção de P, que tende a ser maior em fontes solúveis convencionais. Isso ocorre, pois, ao liberar P mais rapidamente na solução do solo e em condições menos propícias, como por exemplo ausência de matéria orgânica na região de liberação de P, e aumento do tempo de contato com óxidos de Fe e Al, tende a reduzir as formas mais disponíveis de P (Wadt & Silva, 2011). Portanto, não se observou resposta nos teores de P no solo para extrações de P de labilidade moderada.

Para o extrator de labilidade restrita, NaOH 0,5 M, a dose de 150 % só foi superior à de 100 % para o teor de Porg registrado pelo MAPPOL. Para todas as fontes, a maior dose proporcionou maior teor de P-residual, o que era de se esperar, pois as adubações sucessivas e em dosagem superior ao recomendado tendem a aumentar os teores de P em compartimentos não lábeis, independentemente da fonte.

De maneira geral, não ocorreu interação para o uso de fertilizantes nitrogenados (C4, Tabela 5), o que era de se esperar em experimento de longo prazo. Autores já verificaram aumento de absorção de P quando aplicado com nitrogênio amoniacal no sulco de plantio

(Hanway & Olson, 1980). Porém, esse efeito foi observado em plantas. No solo, o nitrogênio tem um dinamismo e não se espera efeitos positivos na disponibilidade de P em longo prazo.

Os dados referentes às fontes nitrogenadas não foram apresentados pela ausência de significância para os contrastes referentes ao uso de fertilizantes nitrogenados (ureia convencional - UC x ureia revestida com polímero e enxofre - UPS). A dinâmica de nitrogênio e o incipiente efeito residual justificam os resultados encontrados.

Contudo, cabe destacar que o efeito em curto prazo pode surgir. Isso ocorre, pois a UPS possui enxofre em sua composição e quando adicionada ao solo, o enxofre liberado pode competir com outros ânions, como o fosfato, pelos sítios de adsorção em óxidos de Fe e Al, especialmente em argilas de baixa de atividade (Casagrande et al., 2003). Com isso, pode-se reduzir a intensidade de adsorção, especialmente em fontes fosfatadas de P com tecnologia associada, que alteram a cinética de liberação do nutriente, assim como a UPS, melhorando a disponibilidade de N e P para as plantas.

CONCLUSÃO

Os fertilizantes fosfatados com tecnologia associada influenciaram a disponibilidade de P no solo nas frações lábeis, moderadamente lábeis e de labilidade restrita a longo prazo. Esses resultados demonstram a viabilidade em se utilizar tecnologias associadas aos fertilizantes fosfatados solúveis em cultivos de campo, aumentando a disponibilidade de P para cultivos sucessivos ou culturas perenes.

O principal efeito dos fertilizantes com tecnologia associada ocorreu na fração lábil do solo, o que indica maior potencial produtivo para culturas de ciclo curto e perenes ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ADEPETU, J. A., & COREY, R. B. Organic phosphorus as a predictor of plant-available phosphorus in soils of southern Nigeria. *Soil Science*, 122:159-164, 1976.
- ALVAREZ, V. V. H., & ALVAREZ, G. A. M. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 3:24-33, 2006.
- AMARAL, J. F. T. D., MARTINEZ, H. E. P., LAVIOLA, B. G., TOMAZ, M. A., FERNANDES FILHO, E. I., & CRUZ, C. D. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. *Coffee Science*, 6:65-74, 2011.
- ANDRADE, F.V., & VILLANI, E.M. de A. Fracionamento de Fósforo. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Org.). *Manual de Métodos de análise de solos*. 3 ed. Brasília: Embrapa, 343-358, 2017.
- ARAUJO, M. B., SALCEDO, I. H., & SAMPAIO, E. B. Efeito de fertilizações fostatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I: Intensidade e formas de acumulação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 17:389-396, 1993.
- BORGES, B. M. M. N., ABDALA, D. B., DE SOUZA, M. F., VIGLIO, L. M., COELHO, M. J. A., PAVINATO, P. S., & FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*, 339:20-30, 2019.
- CAMARGO, F. A. O., GIANELLO, C., RHEINHEIMER, D., KAMINSKI, J., BISSANI, C. A. Fracionamento do N, P e S orgânicos. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 373-376, 1999.
- CASAGRANDE, J. C., ALLEONI, L. R. F., CAMARGO, O. D., & BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:51-59, 2003.
- CONDRON, L. M., GOH, K. M., & NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, 36:199-207, 1985.
- CROSS, A. F., & SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64:197-214, 1995.
- CRUZ, D. F. da, BORTOLETTO-SANTOS, R., GUIMARÃES, G. G. F., POLITO, W. L., & RIBEIRO, C. 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*, 65:5890-5895, 2017.
- DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. *Advances in agronomy*, 29:83-117, 1977.
- FERNÁNDEZ R, I. E., NOVAIS, R. F., NUNES, F. N., & KER, J. C. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química: II-extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2319-2330, 2008.

- FERNANDES, D. M., GROHSKOPF, M. A., GOMES, E. R., FERREIRA, N. R., & BÜLL, L. T. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. *Irriga*, 1:14-27, 2015.
- GAZOLA, R.N., BUZETTI, S., DINALLI, R. P., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., & DE SOUZA CELESTRINO, T. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*, 60:876-884, 2013.
- HANWAY, J. J., & OLSON, R. A. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. *The role of phosphorus in agriculture*, 681-692, 1980.
- HEDLEY, M. J., STEWART, J. W. B., & CHAUHAN, B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46:970-976, 1982.
- KOCH, M., KRUSE, J., EICHLER-LÖBERMANN, B., ZIMMER, D., WILLBOLD, S., LEINWEBER, P., & SIEBERS, N. Phosphorus stocks and speciation in soil profiles of a long-term fertilizer experiment: evidence from sequential fractionation, P K-edge XANES, and ³¹P NMR spectroscopy. *Geoderma*, 316:115-126, 2018.
- LI, H., LI, Y., XU, Y., & LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*, 244:125471, 2020.
- LUSTOSA FILHO, J. F., DA SILVA CARNEIRO, J. S., BARBOSA, C. F., DE LIMA, K. P., DO AMARAL LEITE, A., & MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. *Science of The Total Environment*, 709:136028, 2020.
- MIKULA, K., IZYDORCZYK, G., SKRZYPCZAK, D., MIRONIUK, M., MOUSTAKAS, K., WITEK-KROWIAK, A., & CHOJNACKA, K. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. *Science of The Total Environment*, 712:136365, 2020.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 471-550, 2007.
- OLIVEIRA, C. L. B. D., CASSIMIRO, J. B., LIRA, M. V. D. S., BONI, A. D. S., DONATO, N. D. L., REIS JR, R. D. A., & HEINRICH, R. Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. *Agronomy*, 12:2817, 2022.
- PREZOTTI, L.C.; OLIVEIRA, J.; GOMES, J.; DADALTO, G. Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo: 5. ed. Vitória: SEEA; INCAPER; CEDAGRO, 305p, 2007.
- QIONG, W. A. N. G., QIN, Z. H., ZHANG, W. W., CHEN, Y. H., PING, Z. H. U., CHANG, P. E. N. G., ... & COLINET, G. Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties. *Journal of Integrative Agriculture*, 21:2720-2733, 2022.

- SANTOS, D. R. D., GATIBONI, L. C., & KAMINSKI, J. Factors affecting the phosphorus availability and the fertilization management in no-tillage system. *Ciência Rural*, 38: 576-586, 2008.
- SILVA, F. C. D., & RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:267-288, 1999.
- SILVA, F. C. D., & DA SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- SOLTANGHEISI, A., SANTOS, V. R. D., FRANCO, H. C. J., KOLLN, O., VITTI, A. C., DIAS, C. T. D. S., ... & PAVINATO, P. S. Phosphate sources and filter cake amendment affecting sugarcane yield and soil phosphorus fractions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, 2019.
- STAUFFER, E. Fertilizantes com proteção integrada: dinâmica de fósforo em solo e planta. [Tese]. Alegre: Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 2017.
- TIESSEN, H. & MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M. R. (Ed.). *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 75-86, 1993.
- TISDALE, L. S., NELSON, W. L., & BEATON, J. D. *Soil fertility and fertilizers*. New York: Lehig Press, 1993.
- TOMASZEWSKA, M., JARPSOEWICZ, A., & KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*, 146:319-323, 2002.
- WADT, P. Q. S., & SILVA, L. M. Determinação do Fósforo Remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 5p. (Embrapa Acre. Comunicado técnico, 178, 2011).
- WALKER, T.W., & SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15:01-19, 1976.

ANEXO 1

Tabela 1 - Contraste ortogonal (C) dos extratores de P, considerando os fertilizantes nitrogenados dentro das doses e dos fertilizantes fosfatados

	Contrastes Ortogonal C4					
	MAP		MAPPOL		MAPTF	
	100 %	150 %	100 %	150 %	100 %	150 %
Compartimentos						
Prontamente lábil	6,50 ^{ns}	24,69*	36,61**	34,97**	-14,28 ^{ns}	-23,77 ^{ns}
Moderadamente lábil	0,37 ^{ns}	10,09 ^{ns}	6,56 ^{ns}	8,78 ^{ns}	-6,92 ^{ns}	-2,23 ^{ns}
Labilidade restrita	-0,12 ^{ns}	-0,54 ^{ns}	0,69 ^{ns}	-0,69 ^{ns}	1,88 ^{ns}	1,05 ^{ns}
Não lábil	-39,68 ^{ns}	-97,92 ^{ns}	-161,64 ^{ns}	260,57 ^{ns}	-195,67 ^{ns}	279,77*
Extratores						
Resina Troca Aniônica	0,51 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,49 ^{ns}	3,11**	-0,17 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
NaHCO ₃ 0,5M (Pi)	3,87 ^{ns}	23,88*	22,35*	28,55**	-2,17 ^{ns}	-31,77*
NaHCO ₃ 0,5M (Porg)	2,13 ^{ns}	0,45 ^{ns}	13,77 ^{ns}	3,31 ^{ns}	-11,94 ^{ns}	8,04 ^{ns}
NaOH 0,1M (Pi)	-4,17 ^{ns}	6,68*	7,49*	5,87 ^{ns}	-2,97 ^{ns}	-3,00 ^{ns}
NaOH 0,1M (Porg)	5,14 ^{ns}	4,17 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,89 ^{ns}	-2,43 ^{ns}	-11,73 ^{ns}
HCl 1M (Pi)	0,03 ^{ns}	-0,44 ^{ns}	1,30 ^{ns}	3,55**	-1,11 ^{ns}	1,04 ^{ns}
HCl 1M (Porg)	-0,63 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-2,39 ^{ns}	-1,53 ^{ns}	-0,42 ^{ns}	11,46**
NaOH 0,5 M (Pi)	0,10 ^{ns}	-0,43 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,45 ^{ns}	0,52 ^{ns}
NaOH 0,5 M (Porg)	-0,22 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-1,64 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,53 ^{ns}
Digestão (P-residual)	-39,68 ^{ns}	-97,92 ^{ns}	-122,20 ^{ns}	221,23 ^{ns}	195,67 ^{ns}	279,77*

C4: ureia revestida com polímero e enxofre vs ureia convencional; MAP: monoamônio fosfato; MAPPOL: MAP revestido com polímero; MAPTF: MAP com adição de torta de filtro; **, * e ° significativos a 1, 5 e 10 %, respectivamente, e ns, não significativo.