

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

EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA: DINÂMICA DE
FÓSFORO EM SOLO E PLANTA**

ALEGRE - ES

2020

EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA: DINÂMICA DE
FÓSFORO EM SOLO E PLANTA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade

ALEGRE - ES

2020

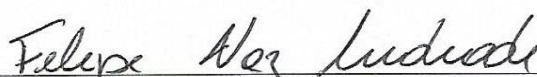
EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA: DINÂMICA DE
FÓSFORO EM SOLO E PLANTA**


Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em 02 de março de 2020

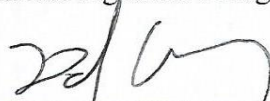
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - UFES
Orientador



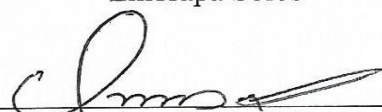
Prof. Dr./Sc. Renato Ribeiro Passos
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - UFES



Prof. Dr. Sc. David Vilas Boas de Campos
Embrapa Solos



Prof. Dr. Sc. Guilherme Kangussú Donagemma
Embrapa Solos



Prof. Dr. Sc. Otacílio José Passos Rangel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Espírito Santo – Campus Alegre

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

S798f Stauffer, Eduardo, 1990-
Fertilizantes com proteção integrada: dinâmica de fósforo em
solo e planta / Eduardo Stauffer. - 2020.
99 f. : il.

Orientador: Felipe Vaz Andrade.

Coorientador: Eduardo de Sá Mendonça.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Adubos e fertilizantes. 2. Fertilidade do solo. 3. Plantas -
Nutrição. 4. Fósforo. I. Andrade, Felipe Vaz. II. Mendonça, Eduardo
de Sá. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de
Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

A Deus.

Aos meus pais, Israel e Luzimar.

A minha noiva, Laís.

Pelo amor, companheirismo, exemplo de vida e dedicação na minha educação.

OFEREÇO E DEDICO

BIOGRAFIA

EDUARDO STAUFFER, filho de Israel Stauffer e Luzimar da Penha Bellatto Stauffer e irmão de Rodolfo Stauffer, nasceu em 24 de janeiro de 1990, na cidade de São Domingos do Norte, Estado do Espírito Santo.

Em 2009, iniciou o Curso de Agronomia, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo em Alegre - ES, graduando-se em 2013. Durante a graduação participou de programas de pesquisa por quatro anos e meio, dos quais foi bolsista de iniciação científica.

Em março de 2014, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas, obtendo o título de mestre em fevereiro de 2016.

Em março de 2016, iniciou o curso de doutorado no Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas, obtendo o título de doutor em março de 2020.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que é a razão do nosso viver e está presente em todos os dias da minha vida, guiando meus passos e mostrando o melhor caminho a seguir.

Aos meus pais, Israel e Luzimar, pelo incentivo e por não medir esforços em me proporcionar uma educação de qualidade.

À minha noiva Laís, pelo carinho, companheirismo, compreensão e por tornar minha vida mais feliz.

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pelo financiamento da bolsa.

A Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização do doutorado.

Ao professor e orientador Felipe Vaz Andrade pela amizade, confiança e dedicação aos ensinamentos que contribuíram para meu treinamento, desde o período de graduação.

Aos professores, Eduardo de Sá Mendonça e Renato Ribeiro Passos, pela amizade, ensinamentos e colaborações prestadas para a elaboração deste trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Solos, David Vilas Boas de Campos e Guilherme Kangussú Donagemma, e ao professor Otacílio José Passos Rangel por suas considerações na tese.

Ao produtor Mario Cezar Louvem, a sua esposa Dona Luiza e também ao seu filho Alex, por permitir que parte da tese fosse desenvolvida em sua propriedade e pela amizade construída.

Aos estudantes e amigos, Fabiano, Marlete, Maria Luiza, Felipe Menine, Danilo, Ronaldo, Yago, Felipe Siman, Loren, Ingrid, Guilherme, Amanda e Lais, pelas contribuições nos experimentos.

Aos funcionários do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da UFES, em especial aos que atuam no Laboratório de Química e Física do Solo.

A sociedade que por meio de seus impostos proporcionaram a minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de um modo ou de outro, contribuíram para a realização desta tese.

MUITO OBRIGADO A TODOS!

FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA: DINÂMICA DE FÓSFORO EM SOLO E PLANTA

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	10
GENERAL ABSTRACT.....	13
INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

CAPÍTULO 1 - FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA E A SUA RELAÇÃO COM A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS.....	20
RESUMO	20
1. INTRODUÇÃO.....	22
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4. CONCLUSÃO.....	31
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
APÊNDICE	37

CAPÍTULO 2 - FERTILIZANTES FOSFATADOS E A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS: EFEITO DO CONTEÚDO DE ÁGUA E TEMPOS DE CONTATO.....	39
RESUMO	39
1. INTRODUÇÃO.....	40
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4. CONCLUSÃO.....	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE	55

CAPÍTULO 3 - FERTILIZANTES FOSFATADOS COM PROTEÇÃO INTEGRADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA CULTURA DO MILHO (<i>Zea mays</i>)	57
--	-----------

RESUMO	57
1. INTRODUÇÃO.....	59
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	60
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4. CONCLUSÃO.....	70
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE	75

CAPÍTULO 4 - PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO DE CAFEIEIRO CONILON
(Coffea canephora) EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO COM FERTILIZANTES COM
PROTEÇÃO INTEGRADA..... 77

RESUMO	77
1. INTRODUÇÃO.....	79
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	80
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
3.1. Produtividade do cafeeiro conilon.....	83
3.2. Nutrição do cafeeiro conilon	88
4. CONCLUSÃO.....	92
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE	97

RESUMO GERAL

STAUFFER, Eduardo. Universidade Federal do Espírito Santo. Março de 2020.
Fertilizantes com proteção integrada: dinâmica de fósforo em solo e planta.
Orientador: Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade. Coorientador: PhD. Sc. Eduardo de Sá Mendonça.

Os solos tropicais, especificamente os Latossolos, apresentam acentuado grau de intemperismo o qual promove características como baixa disponibilidade de nutrientes e alta capacidade de adsorção de fósforo (P). Nessas condições, o solo atua como dreno e não como fonte de P para as plantas, havendo a necessidade da aplicação de quantidades de fertilizantes fosfatados acima da exigência das culturas agrícolas. Entretanto, a maioria dos fertilizantes fosfatados utilizados apresentam baixa eficiência de uso, devido às perdas de P por adsorção, que resulta em baixa disponibilidade de P na solução do solo. Nesse sentido, uma alternativa que tem sido estudada é a utilização de fertilizantes fosfatados que contém tecnologia agregada que possa reduzir a intensidade do fenômeno de adsorção de P e aumentar a disponibilidade de P quando comparado aos fertilizantes fosfatados convencionais, sendo denominados nessa tese de fertilizantes fosfatados com proteção integrada. Diante disso, objetivou-se nesta tese avaliar a dinâmica do P no sistema solo-planta a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada. Para tal, foram montados quatro experimentos que deram origem aos capítulos da tese. No capítulo 1, foi montado um experimento em condições de laboratório em esquema fatorial $2 \times 3 \times 3$, sendo dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e três épocas para atingir o potencial matricial de -10 kPa nos solos (Época 1 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido no dia da adição do grânulo do fertilizante fosfatado; Época 2 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido três dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado; e Época 3 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido seis dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado), visando a avaliar a disponibilidade de P após a aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos e épocas para atingir o potencial matricial de -10 kPa. O experimento do capítulo 2 também

foi realizado em condições de laboratório, sendo avaliada a disponibilidade de P após aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos, potenciais matriciais e tempos de contato. Os fatores em estudo foram dois solos (LVA 1 e LVA 2), três fertilizantes fosfatados (CONV, POL e ORG), dois potenciais matriciais (-10 e -50 kPa) e sete tempos de contato (1, 2, 4, 8, 15, 30 e 45 dias após a adição dos fertilizantes fosfatados). No capítulo 3 foi avaliado o efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada na disponibilidade de P para as plantas de milho, sendo realizado um experimento em casa de vegetação. Foram utilizados dois solos (LVA 1 e LVA 2), três fertilizantes fosfatados (CONV, POL e ORG) e dois potenciais matriciais (-15 kPa e -50 kPa). O experimento do capítulo 4 foi realizado em campo durante dois anos para avaliar a produtividade e a nutrição do cafeeiro conilon a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados e nitrogenados com proteção integrada. O experimento, implantado num fatorial $3 \times 2 \times 3$, consistiu em três fertilizantes fosfatados (CONV, POL e ORG), duas quantidades dos fertilizantes fosfatados (Q100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; Q150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado) e dois fertilizantes nitrogenados (ureia convencional - UC e ureia convencional recoberta com polímero - UP). No capítulo 1, os resultados indicaram que a aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL e ORG) promoveu aumento na disponibilidade de P no LVA 1, demonstrando que o uso da tecnologia pode ser promissor para melhorar a disponibilidade de P em solos com menor capacidade de adsorção de P. Os resultados no capítulo 2 mostraram que o ORG apresentou as menores reduções nos teores de P disponível com o aumento dos tempos de contato em relação ao POL e CONV. Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados na disponibilidade de P, sendo que o ORG apresentou valores mais constantes em ambos potenciais matriciais, demonstrando que o revestimento orgânico pode ser promissor na manutenção da disponibilidade de P ao longo do tempo. No capítulo 3, os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG), em relação ao CONV, aumentaram a produção de matéria seca de folha (5,0 %), o teor foliar de P (7,4 %) e o conteúdo de P na folha (15,7 %) no LVA 1 e o teor de P na seiva xilemática (7,6 e 10,3 %) no LVA 1 e LVA 2, respectivamente. Os resultados experimentais demonstraram que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada favoreceram o desenvolvimento inicial das plantas de milho. No capítulo 4, os resultados mostraram que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG), em relação ao CONV, promoveram aumento na produtividade do cafeeiro conilon de 6,8 % (5,4 sc ha⁻¹) e de 11,6 % (10,4 sc ha⁻¹) nas

safras de 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. A maior quantidade dos fertilizantes fosfatados (Q150) e a aplicação da UP, em geral, resultou em maior produtividade de grãos beneficiados no cafeeiro.

Palavras chave: tecnologia em fertilizante, fertilizante fosfatado, disponibilidade de fósforo, nutrição de plantas.

GENERAL ABSTRACT

STAUFFER, Eduardo. Federal University of Espírito Santo. March of 2020. **Fertilizers with integrated protection: phosphorus dynamics in soil and plant.** Advisor: Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade. Co-advisor: PhD. Sc. Eduardo de Sá Mendonça.

Tropical soils, specifically Latossols, have a marked degree of weathering, which promotes characteristics such as low availability of nutrients and high phosphorus adsorption capacity (P). Under these conditions, the soil acts as a drain and not as a source of P for the plants, with the need to apply quantities of phosphate fertilizers above the requirement of agricultural crops. However, most of the phosphate fertilizers used have low efficiency of use, due to the loss of P by adsorption, which results in low availability of P in the soil solution. In this sense, an alternative that has been studied is the use of phosphate fertilizers that contain aggregate technology that can reduce the intensity of the P adsorption phenomenon and increase the availability of P when compared to conventional phosphate fertilizers, being called in this thesis of phosphate fertilizers with integrated protection. Therefore, the objective of this thesis was to evaluate the dynamics of P in the soil-plant system from the application of phosphate fertilizers with integrated protection. To this end, four experiments were set up, which gave rise to the thesis chapters. In chapter 1, an experiment was carried out under laboratory conditions in a $2 \times 3 \times 3$ factorial scheme, with two soils (clay Red-Yellow Latosol - LVA 1 and clayey Red-Yellow Latosol - LVA 2), three phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - CONV; conventional monoammonium phosphate coated with polymer - POL; and conventional monoammonium phosphate pelleted with filter cake - ORG) and three times to reach the matric potential of -10 kPa in soils (Season 1 = the matric potential of -10 kPa in the soil was reached on the day of the addition of the phosphate fertilizer granule; Season 2 = the matric potential of -10 kPa in the soil was reached three days after the addition of the phosphate fertilizer granule; and Season 3 = the matric potential of -10 kPa in the soil was reached six days after the addition of the phosphate fertilizer granule), aiming to evaluate the availability of P after the application of phosphate fertilizers with integrated protection in different soils and times to reach the matric potential of -10 kPa. The experiment in Chapter 2 was also carried out under laboratory conditions, being evaluated the availability of P after application of phosphate fertilizers with integrated protection in different soils, matric potentials and contact times. The

factors under study were two soils (LVA 1 and LVA 2), three phosphate fertilizers (CONV, POL and ORG), two matric potentials (-10 and -50 kPa) and seven contact times (1, 2, 4, 8, 15, 30 and 45 days after the addition of phosphate fertilizers). In chapter 3, the effect of applying phosphate fertilizers with integrated protection on the availability of P for corn plants was evaluated, and an experiment was carried out in a greenhouse. Two soils (LVA 1 and LVA 2), three phosphate fertilizers (CONV, POL and ORG) and two potential matric (-15 kPa and -50 kPa) were used. The experiment in Chapter 4 was carried out in the field for two years to evaluate the productivity and nutrition of Conilon coffee from the application of phosphate and nitrogen fertilizers with integrated protection. The experiment, implanted in a $3 \times 2 \times 3$ factorial, consisted of three phosphate fertilizers (CONV, POL and ORG), two quantities of phosphate fertilizers (Q100 = 100 % of the quantity of phosphate fertilizer; Q150 = 150 % of the quantity of phosphate fertilizer) and two nitrogen fertilizers (conventional urea - UC and conventional urea covered with polymer - UP). In chapter 1, the results indicated that the application of phosphate fertilizers with integrated protection (POL and ORG) promoted an increase in the availability of P in LVA 1, indicating that the use of technology can be promising to improve the availability of P in soils with lower adsorption capacity of P. The results in chapter 2 showed that the ORG showed the smallest reductions in the levels of available P with the increase in contact times in relation to POL and CONV. The matric potentials allowed the differentiation of the phosphate fertilizers studied in the availability of P, and the ORG showed more constant values in both potential matric, demonstrating that the organic coating can be promising in maintaining the availability of P over time. In chapter 3, phosphate fertilizers with integrated protection (POL + ORG) compared to CONV increased the production of leaf dry matter (5.0 %), the leaf content of P (7.4 %) and the content of P in leaf (15.7 %) in LVA 1 and P content in xylemic sap (7.6 and 10.3 %) in LVA 1 and LVA 2, respectively. The results obtained demonstrate that phosphate fertilizers with integrated protection favored the initial development of corn plants. In chapter 4, the results showed that phosphated fertilizers with integrated protection (POL + ORG) in relation to CONV promoted an increase in the productivity of Conilon coffee by 6.8 % (5.4 sc ha⁻¹) and 11.6 % (10.4 sc ha⁻¹) in the 2017/2018 and 2018/2019 harvests, respectively. The greater quantity of phosphate fertilizers (Q150) and the application of UP, in general, resulted in greater productivity of processed beans in coffee.

Keywords: fertilizer technology, phosphate fertilizer, phosphorus availability, plant nutrition.

INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) apresenta importante função no crescimento e desenvolvimento das plantas, participando em diversos processos, tais como: na formação de proteínas, divisão celular, fotossíntese, armazenamento de energia, respiração e fornecimento de energia (Taiz e Zeiger, 2013). No entanto, a baixa disponibilidade de P nos solos é um dos fatores limitantes na produtividade das culturas agrícolas (DeLonge et al., 2013; Dias et al., 2015).

Os solos tropicais, especificamente os Latossolos, caracterizam-se pelo acentuado grau de intemperismo, predominando os minerais de argila 1:1 e óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Esta condição lhes conferem elevada capacidade de adsorção de P (Abdala et al., 2015; Campos et al., 2016), ocasionando a baixa disponibilidade desse nutriente na solução do solo (Fink et al., 2016).

Além da mineralogia, a disponibilidade de P também pode ser influenciada por outros fatores, tais como: a textura do solo (Machado e Souza, 2012), o conteúdo volumétrico de água no solo (Ruiz et al., 1988; Dominghetti et al., 2014), o tempo de contato (Broggi et al., 2014), o teor de matéria orgânica (Pavinato et al., 2009; Yang et al., 2019) assim como o tipo de fertilizante fosfatado (McLaughlin et al., 2011; Montalvo et al., 2015; Stauffer et al., 2019).

Atualmente, os fertilizantes fosfatados de maior solubilidade (p.e. superfosfatos simples e triplo, fosfato monoamônico e diamônico) são os mais utilizados na agricultura brasileira. Esses fertilizantes quando aplicados nos solos tropicais, com elevada capacidade de adsorção de P, apresentam baixa eficiência de uso devido às perdas de P por adsorção (Hedley e McLaughlin, 2005; Everaert et al., 2017), acarretando baixa disponibilidade de P para as plantas.

Nesse contexto, é imprescindível a busca por tecnologias que aumentem a eficiência da adubação fosfatada e, conseqüentemente, a disponibilidade de P para as plantas. Uma estratégia que tem sido estudada é a utilização de fertilizantes fosfatados que contêm tecnologia agregada capaz de reduzir a intensidade do fenômeno de adsorção e aumentar a disponibilidade de P quando comparado aos fertilizantes fosfatados convencionais, sendo denominados nesta tese fertilizantes fosfatados com proteção integrada.

Em vários trabalhos na literatura sobre fertilizantes fosfatados com proteção integrada os autores usam os termos “liberação lenta ou gradual de P” para explicar a liberação de P nesses fertilizantes. Porém, nesta tese vamos considerar que as tecnologias

atrasam/retardam a liberação de P. Tais fertilizantes podem ser revestidos ou misturados com diferentes materiais: polímeros biodegradáveis (Jin et al., 2013), polímeros sintéticos (Figueiredo et al., 2012), ácidos orgânicos (Urrutia et al., 2014; Teixeira et al., 2016), cama de aviário (Castro et al., 2015), torta de filtro e composto suíno (Stauffer et al., 2019).

Alguns trabalhos têm apresentado resultados positivos com a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em culturas como milho (Almeida et al., 2016; Grohskopf et al., 2019), soja (Guareschi et al., 2011; Souza et al., 2014), cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2014), cevada (Pauly et al., 2002), alface (Chagas et al., 2015) e cafeeiro (Chagas et al., 2016). No entanto, outros autores não observaram diferenças entre os fertilizantes fosfatados com proteção integrada e os convencionais na cultura do feijão (Valderrama et al., 2009) e do milho (Valderrama et al., 2011).

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

- (1) Fertilizantes com proteção integrada e a sua relação com a disponibilidade de fósforo em Latossolos;
- (2) Fertilizantes fosfatados e a disponibilidade de fósforo em Latossolos: efeito do conteúdo de água e tempos de contato;
- (3) Fertilizantes fosfatados com proteção integrada no desenvolvimento inicial da cultura do milho (*Zea mays*);
- (4) Produtividade e nutrição de cafeeiro conilon (*Coffea canephora*) em resposta à adubação com fertilizantes com proteção integrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdala DB, Northrup PA, Arai Y, Sparks DL. 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*. 2015;437:297–303.
- Almeida T, Pocojeski E, Nesi CN, Oliveira JPM, Silva LS. Eficiência de fertilizante fosfatado protegido na cultura do milho. *Scientia Agraria*. 2016;17:29–35.
- Broggi F, Oliveira AC, Freire FJ, Oliveira ECA, Rocha AT, Freire MBGDS. Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *Revista Caatinga*. 2014;27:164–170.
- Campos M, Antonangelo JA, Alleoni LRF. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. *Soil & Tillage Research*. 2016;156:110–118.
- 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.
- Chagas WFT, Emrich EB, Guelfi DR, Caputo ALC, Faquin V. Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. *Revista Ciência Agronômica*. 2015;46:266–276.
- Chagas WFT, Guelfi DR, Caputo ALC, Dominghetti AW, Faquin V, Lopes RM, Chagas RMR. Eficiência agronômica do superfosfato triplo por polímeros no crescimento inicial do cafeeiro. *Coffee Science*. 2016;11:426–434.
- DeLonge M, Vandecar KL, D’Odorico P, Lawrence D. The impact of changing moisture conditions on short-term P availability in weathered soils. *Plant and Soil*. 2013;365:201–209.
- Dias KGL, Furtini Neto AE, Guimarães PTG, Reis THP, Oliveira CHC. Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels. *Ciência e Agrotecnologia*. 2015;39:110–120.
- Dominghetti AW, Scalco MS, Guimarães RJ, Silva DRG, Carvalho JPS, Pereira VA. Doses de fósforo e irrigação na nutrição foliar do cafeeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2014;18:1235–1240.
- Everaert M, Degryse F, McLaughlin MJ, Vos D, Smolders E. Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017;65:6736–6744.

- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43:446–452.
- Fink JR, Inda AV, Bavaresco J, Sánchez-Rodríguez AR, Barrón V, Torrent J, Bayer C. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52:203–210.
- Grohskopf MA, Corrêa JC, Fernandes DM, Benites VM, Teixeira PC, Cruz CV. Phosphate fertilization with organomineral fertilizer on corn crops on a Rhodic Khandiudox with a high phosphorus content. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2019;54:e00434.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011;35:643–648.
- Hedley M, McLaughlin M. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In: Sims JT, Sharpley NA (ed.). *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America. 2005. p. 181–252.
- Jin S, Wang Y, He J, Yang Y, Yu X, Yue G. Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013;128:407–415.
- Machado VJ, Souza CHE. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*. 2012;28:1–7.
- McLaughlin MJ, McBeath TM, Smernik R, Stacey SP, 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*. 2011;349:69–87.
- Montalvo D, Degryse F, McLaughlin MJ. Agronomic effectiveness of granular and fluid phosphorus fertilizers in Andisols and Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*. 2015;79:577–584.

- Pauly DG, Nyborg M, Malhi SS. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. *Canadian Journal of Soil Science*. 2002;82:201–210.
- Pavinato PS, Merlin A, Rosolem CA. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil & Tillage Research*. 2009;105:149–155.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988;12:43–48.
- Souza JR, Ribeiro BN, Raposo TP, Fiorin JE, Castro GSA, Magalhães RS. Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja. *Acta Iguazu*. 2014;3:1–9.
- Stauffer E, Andrade FV, Mendonça ES, Donagemma GK. Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13:61–68.
- Taiz L, Zeiger E. *Fisiologia Vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed; 2013.
- Teixeira RS, Silva IR, Sousa RN, Mattiello EM, Soares EMB. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16:1097–1112.
- Teixeira WG, Sousa RTX, Korndörfer GH. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. *Bioscience Journal*. 2014;30:1729–1736.
- Urrutia O, Erro J, Guardado I, San Francisco S, Mandado M, Baigorri R, Yvin JC, Garcia-Mina JM. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2014;177:128–136.
- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Arf O, Sá ME. Fontes e doses de nitrogênio e fósforo em feijoeiro no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2009;39:191-196.
- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Teixeira Filho MCM. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesqui Agropecuária Tropical*. 2011;41:254-263.
- Yang X, Chen X, Yang X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil & Tillage Research*. 2019;187:85–91.

CAPÍTULO 1

FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA E A SUA RELAÇÃO COM A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS

RESUMO

A alta capacidade de adsorção de fósforo (P) em solos altamente intemperizados limita a produção agrícola, devido à baixa disponibilidade de P na solução do solo. Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada podem exercer importante papel na disponibilidade de P nesses solos, no sentido de diminuir a intensidade do fenômeno de adsorção de P no solo, tornando-o mais disponível para as plantas. Objetivou-se neste trabalho avaliar a disponibilidade de P após a aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos e épocas para atingir o conteúdo volumétrico de água. Para isso foi realizado um experimento em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições, em esquema fatorial $2 \times 3 \times 3$, sendo dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e três épocas para atingir o potencial matricial de -10 kPa nos solos (Época 1 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido no dia da adição do grânulo do fertilizante fosfatado; Época 2 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido três dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado; e Época 3 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido seis dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado). O experimento foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a 25 ± 2 °C, por 42 dias. Os teores de P disponível foram extraídos por Mehlich-1. Os teores médios de P disponível para o POL e ORG foram, respectivamente, 10,2 % ($695,55 \text{ mg dm}^{-3}$) e 16,4 % ($735,21 \text{ mg dm}^{-3}$) maiores em relação ao CONV ($631,40 \text{ mg dm}^{-3}$) no LVA 1. Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada apresentaram maior disponibilidade de P no solo com menor capacidade de adsorção de P (LVA 1), onde o ORG proporcionou maiores teores de P disponível. O retardamento da aplicação do conteúdo volumétrico de água nos solos aumentou a disponibilidade de P nos solos sob aplicação dos fertilizantes fosfatados. Os

resultados experimentais indicam que o uso da tecnologia pode ser promissor para melhorar a disponibilidade de P em solos com menor capacidade de adsorção de P.

Palavras-chave: tecnologia em fertilizante, fosfato monoamônico, adsorção de fósforo.

1. INTRODUÇÃO

Em solos tropicais altamente intemperizados, o fósforo (P) é um dos nutrientes que mais limita a produtividade das culturas agrícolas (Caione et al., 2012; Dias et al., 2015). Esses solos, quando predominam a mineralogia oxídica, possuem elevada capacidade de adsorção de P (Novais et al., 2007; Abdala et al., 2015), ocasionando baixa disponibilidade desse nutriente (Kruse et al., 2015). Em consequência, têm-se baixa eficiência da adubação fosfatada e necessidade de aplicação de grande quantidade de fertilizantes para garantir a rentabilidade das culturas (Withers et al., 2018).

Além da mineralogia, a adsorção de P também pode ser influenciada por outros fatores, tais como: o conteúdo volumétrico de água no solo (Ruiz et al., 1988), o teor de matéria orgânica (Yang et al., 2019), assim como, a fonte de fertilizante fosfatado utilizada (Montalvo et al., 2015).

Atualmente, a maioria dos fertilizantes fosfatados comerciais no Brasil são os fertilizantes de maior solubilidade (p.e. superfosfatos simples e triplo, fosfato monoamônico e diamônico), que possuem maior velocidade de liberação de P para a solução do solo em relação aos demais fertilizantes fosfatados. Entretanto, nos solos tropicais, com elevada capacidade de adsorção de P, os fertilizantes fosfatados solúveis apresentam baixa eficiência (Everaert et al., 2017), acarretando em baixa disponibilidade de P para as plantas.

Uma estratégia que tem sido estudada para aumentar a disponibilidade de P nos solos tropicais é a utilização de fertilizantes fosfatados com proteção integrada, como os revestidos com polímeros. Os que são encontrados no mercado diferem na composição química e espessura do revestimento. Além disso, existe grande dificuldade para identificar a composição química destes polímeros, pois, na sua maioria, são de sigilo da empresa produtora.

Os fertilizantes com polímeros são preparados revestindo grânulos de fertilizantes convencionais com vários materiais para reduzir sua taxa de dissolução (Shaviv, 2001). Recentemente, vários materiais foram testados como: os polímeros biodegradáveis (Jin et al., 2012), os polímeros sintéticos (Figueiredo et al., 2012) e os ácidos orgânicos (Teixeira et al., 2016).

A aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada proporcionou aumento na produção de grãos nas culturas do milho e da soja (Figueiredo et al., 2012; Souza et al., 2014b). Esses autores justificaram o aumento da eficiência dos fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros em decorrência da liberação gradual de P ao longo

do ciclo das culturas, resultando em maiores produtividades. Silva et al. (2012) relataram que os fosfatados revestidos com polímeros proporcionaram disponibilização gradual de P sem reduzir a eficiência na absorção desse nutriente pelas plantas de milho.

Outra alternativa utilizada é a mistura de fertilizantes fosfatados com material orgânico, como cama de aviário (Castro et al., 2015) e torta de filtro (Teixeira et al., 2014). O material orgânico misturado com a fonte mineral promove proteção física (barreira imposta pelo revestimento ao contato direto do fertilizante a matriz do solo) e química (presença de ácidos orgânicos, oriundos do material orgânico presente no fertilizante, na solução ao redor do grânulo), diminuindo a intensidade de adsorção de P. Os ácidos orgânicos podem realizar ligações com o Fe e Al na solução do solo e/ou competir pelos sítios de adsorção na matriz do solo, em ambos os casos diminuindo a intensidade de adsorção/precipitação (Andrade et al., 2003), interferindo na disponibilidade de P.

Informações sobre como os fertilizantes fosfatados com proteção integrada interferem na disponibilidade de P em solos oxídicos são importantes para melhorar a eficiência de uso de P desses fertilizantes. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P após a aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos e épocas para atingir o conteúdo volumétrico de água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de laboratório com temperatura controlada a 25 °C (± 2), no Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre - ES.

Para condução do experimento foram utilizadas amostras subsuperficiais (0,20 – 0,40 m) de dois Latossolos Vermelho-Amarelo, coletados na região de Alegre - ES. Após coletadas, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar.

Posteriormente, foi realizada a caracterização química (Silva, 2009), física (Teixeira et al., 2017), P remanescente (Alvarez V. et al., 2000) e capacidade máxima de adsorção de P - CMAP (Olsen e Watanabe, 1957), como apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física e química dos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA) coletados na profundidade de 0,20 a 0,40 m

Característica	LVA 1	LVA 2
Textura (g kg ⁻¹) ^{1/}		
Argila	466	600
Silte	41	23
Areia grossa	304	270
Areia fina	189	107
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,165	1,166
Retenção de água (g kg ⁻¹) ^{3/}		
-10 kPa	274	393
-100 kPa	203	250
-1500 kPa	172	216
pH-H ₂ O ^{4/}	5,16	4,84
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,10	5,10
P-rem (mg L ⁻¹) ^{7/}	27,09	8,83
CMAp (mg cm ⁻³) ^{8/}	0,673	1,004
COT (dag kg ⁻¹) ^{9/}	1,40	0,60

^{1/}Método da pipeta; ^{2/}Método da proveta; ^{3/} Extrator de placa porosa (Richards, 1949); ^{4/} Relação solo-água 1:2,5; ^{5/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ^{6/} Extrator Mehlich-1; ^{7/} Fósforo remanescente; ^{8/} Capacidade máxima de adsorção de fósforo; ^{9/}Carbono orgânico total (Yeomans e Bremner, 1988).

Após a caracterização química as amostras dos solos tiveram pH ajustado para 6,0, com base na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras dos solos foram acondicionadas, homogeneizadas e incubadas em sacos plásticos com carbonato de cálcio durante 30 dias, mantendo-se a umidade dos solos a 75 % da capacidade de campo (-10 kPa). Posteriormente, as amostras dos solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

O experimento seguiu o delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições, em esquema fatorial 2 × 3 × 3, em que os fatores foram: dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2 ; três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG), e três épocas para atingir o potencial matricial de -10 kPa (Época 1 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido no dia da adição do grânulo do fertilizante fosfatado; Época 2 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido três dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado; e Época 3 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido seis dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado).

A caracterização química dos fertilizantes fosfatados é apresentada na tabela 2. O ORG foi produzido por meio do processo de peletização após a mistura de torta de filtro, fosfato monoamônico e um polímero orgânico biodegradável. A torta de filtro foi utilizada após o processo de compostagem.

Os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2 a 3,35 mm a fim de homogeneizar a granulometria desses fertilizantes. A dose de P aplicada foi referente a 20 % da CMAP de cada solo, equivalente a 135,2 mg dm⁻³ de P no LVA 1 e a 200,8 mg dm⁻³ de P no LVA 2.

As unidades experimentais foram constituídas por placas de petri (86 mm de diâmetro), onde as amostras (65 g) dos solos foram adicionadas. Foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir o potencial matricial de -100 kPa. Em seguida, as placas de petri foram incubadas por 24 horas para assegurar a distribuição uniforme da água no solo contido em cada unidade experimental.

Após esse período, um grânulo do fertilizante fosfatado foi colocado no centro da placa de petri. A partir dessa etapa, as unidades experimentais receberam a quantidade de água para atingir o potencial matricial de -10 kPa de cada solo e de acordo com as épocas 1, 2 e 3 para atingir o conteúdo volumétrico de água nos solos. A umidade do solo das placas de petri foi controlada por meio de pesagem, adicionando água deionizada quando necessário.

Após 42 dias da adição dos grânulos dos fertilizantes fosfatados, foram retiradas amostras de solo na forma de anéis concêntricos de 0,0 a 0,5 e de 0,5 a 1,0 cm distante do grânulo do fertilizante fosfatado, iniciando-se pela região central. As amostras foram secas a 40 °C até massa constante, para posterior determinação da concentração de P. Foi realizada a extração de P disponível por Mehlich-1 e a determinação por colorimetria.

Tabela 2. Caracterização química dos fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	N ¹	P ₂ O ₅ ²	K ₂ O ³	C ⁴	CTC ⁵
	----- % -----				mmol _c kg ⁻¹
CONV	10,8	51,7	0	-	-
POL	8,9	46,8	0	-	-
ORG	6,1	30,3	0	7,9	80,2

¹/N total; ²/P total; ³/K = Potássio solúvel em água; ⁴/C = Carbono orgânico total; ⁵/CTC = Capacidade de Troca Catiônica (Mapa, 2014). CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro.

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o programa R (R Core Team, 2018). Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 5 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O LVA 1 apresentou maiores teores médios de P disponível ($687,39 \text{ mg dm}^{-3}$) em relação ao LVA 2 ($571,04 \text{ mg dm}^{-3}$) testado pelo teste F ($p \leq 0,05$), como esperado. Esse comportamento está relacionado às características desses solos (Tabela 1). Solos com maior CMAP apresentam menor disponibilidade de P ao longo do tempo devido à maior adsorção de P com o tempo de contato (Novais et al., 2007; Machado et al., 2011; Broggi et al., 2014).

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) apresentaram maiores teores de P disponível quando comparado ao CONV no LVA 1 (C1, Tabela 4). Os teores médios de P disponível para o POL e ORG foram, respectivamente, 10,2 e 16,4 % maiores em relação ao CONV no LVA 1 (Tabela 3). Isso demonstra que a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada pode ser uma alternativa para aumentar a disponibilidade de P nesse solo quando comparado a uma fonte solúvel como o CONV (Tabelas 3 e 4).

Esses resultados podem estar relacionados às tecnologias de revestimento aplicadas nos fertilizantes fosfatados com proteção integrada, que podem atrasar a liberação de P para a solução do solo, aumentando a disponibilidade de P (Teixeira et al., 2016). A maior eficiência dos fertilizantes com revestimento de polímeros, como no POL, é atribuída à estrutura dos grânulos do fertilizante revestido, que reduz o contato direto do P com os colóides do solo, reduzindo a intensidade de adsorção de P (Figueiredo et al., 2012).

Os fertilizantes fosfatados solúveis misturados com uma fonte orgânica, como o ORG, também podem exercer proteção física que impede o contato direto do P com o solo, evitando perdas por adsorção (Erro et al., 2012), e também podem exercer proteção química relacionada à presença de ácidos orgânicos, oriundos do material orgânico, os quais podem competir pelos sítios de adsorção na matriz do solo e/ou realizar ligações com o Fe e Al na solução, em ambos os casos, diminuindo a intensidade de adsorção/precipitação de P (Andrade et al., 2003; Souza et al., 2014a; Borges et al., 2019).

Tabela 3. Teores médios de P disponível (mg dm^{-3}) para os diferentes fertilizantes fosfatados (Fert) considerando os solos, as épocas para atingir o conteúdo volumétrico de água e as distâncias a partir do grânulo do fertilizante fosfatado (Dist)

Fert	Dist (cm)	LVA 1			LVA 2		
		EP1	EP2	EP3	EP1	EP2	EP3
CONV	0,0 - 0,5	708,10	836,42	864,40	754,06	936,27	895,02
	0,5 - 1,0	463,42	469,03	447,02	282,39	276,23	288,03
POL	0,0 - 0,5	906,37	923,24	954,74	791,39	900,06	959,21
	0,5 - 1,0	470,82	450,55	467,60	281,36	269,31	284,77
ORG	0,0 - 0,5	999,90	1041,49	1122,33	781,88	857,74	1146,25
	0,5 - 1,0	432,68	449,14	365,71	175,91	169,83	228,96

CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro; LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa; EP1 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido no dia da adição do grânulo do fertilizante fosfatado; EP2 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido três dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado; EP3 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido seis dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado.

Tabela 4. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) dos fertilizantes fosfatados dentro dos solos independente das distâncias a partir do grânulo do fertilizante fosfatado e épocas de aplicação do conteúdo volumétrico de água

Solos	C1	C2
LVA 1	-83,98*	-39,65*
LVA 2	1,45 ^{ns}	20,92 ^{ns}

C1: CONV vs POL + ORG /Solos (2+, --); C2: POL vs ORG /Solos (+, -); ^{ns} não significativo e * significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa.

O ORG apresentou maiores teores de P disponível quando comparado ao POL no LVA 1 (C2, Tabela 4), no qual, os teores médios de P disponível no ORG foram 5,7 % maiores em relação ao POL (Tabela 3). Esses resultados mostram que o tipo de material utilizado no revestimento influenciou na liberação de P do fertilizante e, consequentemente, na disponibilidade de P no LVA 1, pois foi utilizada a mesma dose e fonte de P. As diferenças de liberação de P desses fertilizantes estão relacionadas as suas distintas características, como: processo de fabricação (revestimento com polímeros ou peletização), tipo e espessura do revestimento e a CTC dos fertilizantes.

A liberação de P dos fertilizantes revestidos com polímeros é influenciada pelas características físicas e químicas desses fertilizantes, tais como: porosidade (Tomaszewska e Jarosiewicz, 2004), espessura da camada de revestimento (Lubkowski, 2014) e composição química do polímero (Han et al., 2009), que interferem na liberação de P do grânulo para o solo (Stauffer et al., 2019), como observado nesse experimento (Tabela 3 e 4).

Para o LVA 2, não houve diferenças entre os fertilizantes fosfatados (C1 e C2, Tabela 4). Esses resultados indicam que há necessidade de melhorar a eficiência desses fertilizantes em solos com maior CMAP, como no caso do LVA 2, uma vez que, em solos com menor CMAP (LVA 1) esses fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL e ORG) apresentaram maior disponibilidade de P (Tabelas 3 e 4). Nesse sentido, levanta-se a hipótese que a liberação gradual de P dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em solos com maior capacidade de adsorção de P pode não ser eficiente para aumentar a disponibilidade de P devido ao fato de apresentarem elevado dreno de P.

Resultados distintos são encontrados na literatura sobre a aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada, demonstrando a necessidade de mais estudos para melhorar a eficiência desses fertilizantes com tecnologias em solos com baixa disponibilidade de P. Chagas et al. (2016) observaram que o uso de superfosfato triplo revestido com polímeros apresentou maior eficiência agrônômica em comparação ao superfosfato triplo sem revestimento. Entretanto, Guareschi et al. (2011) também estudando superfosfato triplo com e sem revestimento de polímeros não encontraram diferenças significativas entre os fertilizantes estudados.

O atraso da aplicação da água para atingir o conteúdo de água (épocas 2 + 3) quando comparado à rápida adição de água (época 1) proporcionou maiores teores de P disponível para o CONV e ORG na distância 0,0 a 0,5 cm do grânulo do fertilizante fosfatado no LVA 1 (C3, Tabela 5). No CONV, os teores médios de P disponível nas épocas 2 e 3 foram 18,1 e 22,1 % maiores que na época 1, respectivamente. Para o ORG, os teores médios de P disponível nas épocas 2 e 3 foram, respectivamente, 4,2 e 12,2 % maiores comparados com a época 1 (Tabela 3).

Tabela 5. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm⁻³) considerando os solos, os fertilizantes fosfatados e as distâncias a partir do grânulo do fertilizante fosfatado para as épocas para atingir o conteúdo volumétrico de água

C	CONV		POL		ORG	
	0,0-0,5 cm	0,5-1,0 cm	0,0-0,5 cm	0,5-1,0 cm	0,0-0,5 cm	0,5-1,0 cm
Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa						
C3	-142,30*	5,39 ^{ns}	-32,62 ^{ns}	11,74 ^{ns}	-82,00*	25,25 ^{ns}
C4	-27,98 ^{ns}	22,01 ^{ns}	-31,50 ^{ns}	-17,05 ^{ns}	-80,84*	83,43*
Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa						
C3	-161,59*	0,26 ^{ns}	-138,25*	4,32 ^{ns}	-220,11*	-23,49 ^{ns}
C4	41,25 ^{ns}	-11,80 ^{ns}	-59,16 ^{ns}	-15,46 ^{ns}	-288,51*	-59,14 ^{ns}

C3: EP1 vs EP2 + EP3 /Fertilizantes/Distâncias/Solos (2+, --); C4: EP2 vs EP3 /Fertilizantes/Distâncias/Solos (+, -); * significativo a 5 % de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro. EP1 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido no dia da adição do grânulo do fertilizante fosfatado; EP2 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido três dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado; EP3 = o potencial matricial de -10 kPa no solo foi atingido seis dias após a adição do grânulo do fertilizante fosfatado

Comportamento semelhante foi observado para o CONV, POL e ORG na distância 0,0 a 0,5 cm do grânulo do fertilizante fosfatado no LVA 2 (C3, Tabela 5). Para o CONV, os teores médios de P disponível nas épocas 2 e 3 foram, respectivamente, 24,2 e 18,7 % maiores comparados com a época 1. No POL, os teores médios de P disponível nas épocas 2 (13,7 %) e 3 (21,2 %) foram maiores que na época 1. Os teores médios de P disponível no ORG nas épocas 2 e 3 foram, respectivamente, 9,7 e 46,6 % maiores em relação à época 1 (Tabela 3).

Com base nos resultados descritos acima, levanta-se a hipótese que o atraso na aplicação de água para atingir o conteúdo volumétrico de água (épocas 2 e 3) retardou a liberação de P, diminuindo o tempo de contato com os coloides do solo, aumentando a disponibilidade desse nutriente devido à diminuição da intensidade de adsorção de P.

A maior umidade no solo pode favorecer maior penetração de água na camada de revestimento de polímeros, provocando maior dissolução e liberação de P do fertilizante (Sarkar et al., 2018). No entanto, o retardamento na liberação de P dos grânulos de fertilizantes fosfatados pode ser uma estratégia eficaz para aumentar a disponibilidade de P (Lustosa Filho et al., 2019), principalmente, em solos intemperizados que possuem elevada capacidade de adsorção de P (Abdala et al., 2015), pois o aumento do tempo de

contato de P liberado dos fertilizantes com os óxidos de Fe e Al reduz a disponibilidade de P no solo (Guedes et al., 2016).

Os efeitos das épocas de aplicação de água no solo nesse experimento podem ser melhor visualizados em condições de campo após aplicação de lâminas de irrigação ou precipitações pluviométricas seguidas de períodos sem aplicação de água. Nessas condições, espera-se que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada possam retardar a liberação de P e, com isso reduzir a intensidade do fenômeno de adsorção de P, uma vez que mais de 90 % do P aplicado de fertilizantes fosfatados solúveis é adsorvido na primeira hora de contato com o solo (Gonçalves et al., 1985).

Para a distância 0,5 a 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado não houve diferenças significativas dos teores de P disponível quando comparadas as épocas 2 + 3 com a época 1 nos fertilizantes fosfatados e solos estudados (C4, Tabela 5). Esses resultados podem estar relacionados à difusão de P no solo a curtas distâncias, no qual, os maiores teores de P disponível são observados na distância próxima da aplicação dos fertilizantes (distância 0,0 - 0,5 cm), e com isso não foram encontradas diferenças na distância 0,5 a 1,0 cm dos grânulos dos fertilizantes (Tabela 3), corroborando com os resultados obtidos por Castro et al. (2015) e Lombi et al. (2004).

A época 3 apresentou maiores teores de P disponível em relação à época 2 no ORG na distância 0,0 a 0,5 cm do grânulo do fertilizante fosfatado para ambos os solos (C4, Tabela 5). Na distância 0,5 a 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado, a época 2 apresentou teores superiores de P disponível em relação à época 3 no LVA 1 para o ORG (C4, Tabela 5). Isso pode ser explicado pelos maiores teores de P disponível na segunda distância (0,5 - 1,0 cm) para a época 2 (Tabela 3), evidenciando maior difusão de P da primeira para a segunda distância.

4. CONCLUSÃO

Os fertilizantes fosfatados influenciaram a disponibilidade de P nos solos estudados, sendo a maior disponibilidade de P proporcionada pelo fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro no solo com menor capacidade de adsorção de P, seguida do fosfato monoamônico revestido com polímero e do fosfato monoamônico convencional.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada aumentaram a disponibilidade de P no solo com menor capacidade de adsorção de P. Para o solo com maior capacidade de adsorção de P não houve diferenças na disponibilidade de P, demonstrando que o aumento na disponibilidade de P pela aplicação desses fertilizantes dependem do tipo de solo.

O atraso na aplicação de água nos solos mostrou-se eficiente no aumento da disponibilidade de P no solo sob a aplicação dos fertilizantes fosfatados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdala DB, Northrup PA, Arai Y, Sparks DL. 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*. 2015;437:297–303.
- Alabi KE, Sorensen RC, Knudsen D, Rehm GW. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*. 1986;50:937–941.
- Almeida BG, Donagemma GK, Ruiz HA, Braida JA, Viana JHM, Reichert JMM, Oliveira LB, Ceddia MB, Wadt PS, Fernandes RBA, Passos RR, Dechen SCF, Klein VA, Teixeira, WG. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. *Embrapa Solos*. 2012.
- Alvarez V. VH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. 2006.
- Alvarez V. VH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. 2000;25:21-32
- Andrade FV, Mendonça ES, Alvarez VH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2003;27:1003–1011.
- Borges BMMN, Abdala DB, Souza MF, Viglio LM, Coelho MJA, Pavinato PS, Franco HCJ. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. *Geoderma*. 2019;339:20–30.
- Broggi F, Oliveira AC, Freire FJ, Oliveira ECA, Rocha AT, Freire MBGDS. Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *Revista Caatinga*. 2014;27:164–170.
- Caione G, Fernandes FM, Lange A, Bergamaschine AF, Dalchiavon FC, Silva AF. Produtividade e valor nutricional de variedades de cana-de-açúcar sob diferentes fontes de fósforo. *Semina: Ciências Agrárias*. 2012;33:2813–2824.
- 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.

- Dias KGL, Furtini Neto AE, Guimarães PTG, Reis THP, Oliveira CHC. Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels. *Ciência e Agrotecnologia*. 2015;39:110–120.
- Erro J, Urrutia O, Baigorri R, Aparicio-Tejo P, Irigoyen I, Storino F, Mandado M, Yvin JC, Garcia-Mina JM. Organic complexed superphosphates (csp): physicochemical characterization and agronomical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60:2008–2017.
- Everaert M, Degryse F, McLaughlin MJ, Vos D, Smolders E. Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017;65:6736–6744.
- Fernandes ALT, Santinato R, Drumond LCD, Oliveira CB. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2007;11:159–166.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43:446–452.
- Gonçalves JLM, Firme DJ, Novais RF, Ribeiro AC. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1985;9:107–111.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011;35:643–648.
- 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.
- Han X, Chen S, Hu X. Controlled-release fertilizer encapsulated by starch/polyvinyl alcohol coating. *Desalination*. 2009;240:21–26.
- Jin S, Wang Y, He J, Yang Y, Yu X, Yue G. Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;128:407–415.
- Kruse J, Abraham M, Amelung W, Baum C, Bol R, Kühn O, Lewandowski H, Niederberger J, Oelmann Y, Rieger C, Santner J, Siebers M, Siebers N, Spohn M,

- Vestergren J, Vogts A, Leinweber P. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2015;178:43–88.
- Lombi E, McLaughlin MJ, Johnston C, Armstrong RD, Holloway RE. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil*. 2004;269:25–34.
- Lubkowski K. Coating fertilizer granules with biodegradable materials for controlled fertilizer release. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014;13:2573–2581.
- Lustosa Filho JF, Barbosa CF, Carneiro JSS, Melo LCA. Diffusion and phosphorus solubility of biochar-based fertilizer: Visualization, chemical assessment and availability to plants. *Soil & Tillage Research*. 2019;194:104298.
- Machado VJ, Souza CHE, Andrade BB, Lana RMQ, Korndorfer GH. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. *Bioscience Journal*. 2011;27:70–76.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Mapa. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília; 2014.
- Montalvo D, Degryse F, McLaughlin MJ. Agronomic effectiveness of granular and fluid phosphorus fertilizers in Andisols and Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*. 2015;79:577–584.
- Novais RF, Alvarez V. VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007.
- Olsen SR, Watanabe FS. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the langmuir isotherm1. *Soil Science Society of America Journal*. 1957;21:144–149.
- R Core Team. A language and environment for statistical computing. 2018.
- Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*. 1949;68:95–112.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988;12:43–48.
- Sarkar A, Biswas DR, Datta SC, Roy T, Moharana PC, Biswas SS, Ghosh A. Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. *Soil & Tillage Research*. 2018;180:48–62.

- Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in Agronomy*. 2001;71:1–49.
- Silva AA, Silva TS, Vasconcelos ACP, Lana RMQ. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*. 2012;28:240–250.
- Silva FC. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.
- Souza MF, Soares EMB, Silva IR, Novais RF, Silva MFO. Competitive sorption and desorption of phosphate and citrate in clayey and sandy loam soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014a;38:1153–1161.
- Souza JR, Ribeiro BN, Raposo TP, Fiorin JE, Castro GSA, Magalhães RS. Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja. *Acta Iguazu*. 2014b;3:1–9.
- Stauffer E, Andrade FV, Mendonça ES, Donagemma GK. Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13:61–68.
- Teixeira PC, Donagemma, GK, Fontana A, Teixeira, W. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília: Embrapa; 2017.
- Teixeira RS, Silva IR, Sousa RN, Mattiello EM, Soares EMB. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16:1097–1112.
- Teixeira WG, Sousa RTX, Korndörfer GH. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. *Bioscience Journal*. 2014;30:1729–1736.
- Tomaszewska M, Jarosiewicz A. Polysulfone coating with starch addition in CRF formulation. *Desalination*. 2004;163:247–252.
- Withers PJA, Rodrigues M, Soltangheisi A, Carvalho TS, Guilherme LRG, Benites VM, Gatiboni LC, Sousa DMG, Nunes RS, Rosolem CA, Andreote FD, Oliveira Júnior A, Coutinho ELM, Pavinato PS. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Scientific Reports*. 2018;8:25–37.
- Yang X, Chen X, Yang X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil & Tillage Research*. 2019;187:85–91.

Yeomans JC, Bremner JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1988;19:1467–1476.

APÊNDICE

Tabela 1A. Análise de variância dos teores de P disponível em função da aplicação de fertilizantes fosfatados (Fert) considerando os solos, as épocas para atingir o conteúdo volumétrico de água e as distâncias a partir do grânulo do fertilizante fosfatado (Dist)

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio
Solos	1	609170,204*
Fert/Solo1	2	82321,299*
Fert/Solo2	2	3303,356
Época/Fert1/Dist1/Solo1	2	34729,594*
Época/Fert1/Dist2/Solo1	2	654,080
Época/Fert2/Dist1/Solo1	2	3014,019
Época/Fert2/Dist2/Solo1	2	592,881
Época/Fert3/Dist1/Solo1	2	19377,450*
Época/Fert3/Dist2/Solo1	2	9764,397*
Época/Fert1/Dist1/Solo2	2	45644,962*
Época/Fert1/Dist2/Solo2	2	174,219
Época/Fert2/Dist1/Solo2	2	36229,064*
Época/Fert2/Dist2/Solo2	2	329,685
Época/Fert3/Dist1/Solo2	2	184794,194*
Época/Fert3/Dist2/Solo2	2	5291,027
Resíduo	146	2571,276
CV (%)	8,06	

Solo1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; Solo2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa; Fert1 = fosfato monoamônico convencional; Fert2 = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; Fert3 = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm a partir do grânulo do fertilizante fosfatado; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm a partir do grânulo do fertilizante fosfatado. * Significativo a 5 % pelo teste F.

CAPÍTULO 2

FERTILIZANTES FOSFATADOS E A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS: EFEITO DO CONTEÚDO DE ÁGUA E TEMPOS DE CONTATO

RESUMO

As tecnologias associadas aos fertilizantes fosfatados têm sido desenvolvidas com o intuito de diminuir a intensidade do fenômeno de adsorção e aumentar a disponibilidade de fósforo (P) no solo. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P após aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos, potenciais matriciais e tempos de contato. O experimento foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a 25 ± 2 °C. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, distribuídos em esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo a parcela principal composta por dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e dois conteúdos de água no solo correspondentes a dois potenciais matriciais (-10 e -50 kPa); e a subparcela composta por sete tempos de contato (1, 2, 4, 8, 15, 30 e 45 dias após a adição dos fertilizantes fosfatados), com quatro repetições. Os teores de P disponível foram extraídos por Mehlich-1. Os maiores teores de P disponível no LVA 1 foram obtidos no POL (1254,74 mg dm⁻³), seguidos do CONV (1205,63 mg dm⁻³) e ORG (974,01 mg dm⁻³). O ORG apresentou as menores reduções nos teores de P disponível em relação aos demais fertilizantes fosfatados estudados com o aumento dos tempos de contato. Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados na disponibilidade de P, onde o ORG apresentou valores mais constantes em ambos potenciais matriciais. Este resultado pode sinalizar que o revestimento orgânico pode ser promissor na manutenção da disponibilidade de P ao longo do tempo.

Palavras-chave: fosfato monoamônico, tecnologia em fertilizantes, fósforo disponível.

1. INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos de regiões tropicais é um dos fatores mais limitantes na produtividade das culturas (DeLonge et al., 2013). Esses solos, quando apresentam acentuado grau de intemperismo possuem elevada capacidade de adsorção de P em função do predomínio de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), ocasionando baixa disponibilidade de P no solo (Fink et al., 2014).

Além da mineralogia, a disponibilidade de P no solo é influenciada por outros fatores, tais como, o tempo de contato (Broggi et al., 2014), o teor de matéria orgânica (Pavinato et al., 2009), a fonte de fertilizante fosfatado (McLaughlin et al., 2011) e o conteúdo volumétrico de água no solo (Ruiz et al., 1988).

O conteúdo de água no solo interfere na intensidade de adsorção de P, pois sua redução aumenta a adsorção de P por aproximar o íon fosfato presente na solução do solo à superfície do colóide, ao passo que o filme de água mais espesso aumenta essa distância, diminuindo a intensidade desse fenômeno (Costa et al., 2006; Novais et al., 2007).

Outro fator que influencia a intensidade de adsorção de P é a presença de matéria orgânica. Os ácidos orgânicos provenientes da decomposição da matéria orgânica podem bloquear os sítios de adsorção de P e também podem complexar Fe e Al presentes na solução do solo, diminuindo a precipitação de compostos com P e tornando-o mais disponível (Andrade et al., 2003; Guppy et al., 2005). Nesse sentido, espera-se que os fertilizantes fosfatados associados a compostos orgânicos possam se beneficiar das características da matéria orgânica em relação à diminuição na adsorção de P, podendo aumentar a disponibilidade de P.

O tipo de fertilizante fosfatado utilizado também influencia a disponibilidade de P no solo (Stauffer et al., 2019). Os fertilizantes fosfatados de maior solubilidade (p.e. superfosfatos simples e triplo, fosfato monoamônico e diamônico) são os mais utilizados na agricultura brasileira. Quando aplicados no solo liberam o P rapidamente para a solução do solo, porém com o aumento do tempo de contato do P com os colóides do solo ocorre redução na disponibilidade desse nutriente e, conseqüentemente, diminuição na eficiência agrônômica desses fertilizantes (Hedley e McLaughlin, 2005).

Em função da baixa eficiência dos fertilizantes fosfatados aplicados no solo e da diminuição da disponibilidade de P devido à sua adsorção, é imprescindível a busca por tecnologias para aumentar sua disponibilidade para as plantas. Uma alternativa que tem sido estudada é a utilização de fertilizantes fosfatados com proteção integrada, que

buscam reduzir a intensidade do fenômeno de adsorção de P, como os revestidos com polímeros e os misturados com material orgânico.

Almeida et al. (2016) constataram que o revestimento com polímeros nos fertilizantes fosfatados proporciona disponibilização gradual de P e maior eficiência na absorção desse nutriente. Avaliando o efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros orgânicos, Teixeira et al. (2016) observaram que os fertilizantes revestidos favoreceram maior disponibilidade de P do solo ao longo do tempo em relação ao fertilizante fosfatado sem revestimento.

Nesse sentido, objetivou-se nesse trabalho avaliar a disponibilidade de P após aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos, potenciais matriciais e tempos de contato.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre - ES, em condições de laboratório com temperatura controlada a 25 °C (± 2).

Foram utilizadas amostras subsuperficiais (0,20 - 0,40 m) de dois Latossolos Vermelho-Amarelo, coletados na região de Alegre - ES. As amostras dos solos foram secas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar.

Foi realizada a caracterização química (Silva, 2009), física (Teixeira et al., 2017), P remanescente (Alvarez V. et al., 2000) e capacidade máxima de adsorção de P - CMAP (Olsen e Watanabe, 1957), conforme observado na tabela 1.

As amostras dos solos, após a caracterização química, tiveram pH ajustado para 6,0 baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras foram incubadas por 30 dias, mantendo-se a umidade dos solos a 75 % da capacidade de campo. Posteriormente, as amostras dos solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para a montagem do experimento.

Tabela 1. Caracterização física e química dos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA) coletados na profundidade de 0,20 a 0,40 m

Característica	LVA 1	LVA 2
Textura (g kg ⁻¹) ^{1/}		
Argila	466	600
Silte	41	23
Areia grossa	304	270
Areia fina	189	107
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,165	1,166
Retenção de água (g kg ⁻¹) ^{3/}		
-10 kPa	274	393
-50 kPa	218	271
-1500 kPa	172	216
pH-H ₂ O ^{4/}	5,16	4,84
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,10	5,10
P-rem (mg L ⁻¹) ^{7/}	27,09	8,83
CMAP (mg cm ⁻³) ^{8/}	0,673	1,004
COT (dag kg ⁻¹) ^{9/}	1,40	0,60

^{1/}Método da pipeta; ^{2/}Método da proveta; ^{3/} Extrator de placa porosa (Richards, 1949); ^{4/} Relação solo-água 1:2,5; ^{5/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ^{6/} Extrator Mehlich-1; ^{7/} Fósforo remanescente; ^{8/} Capacidade máxima de adsorção de fósforo; ^{9/}Carbono orgânico total (Yeomans e Bremner, 1988).

O delineamento foi em blocos casualizados, com quatro repetições, distribuídos em esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo a parcela principal composta por dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e dois conteúdos de água no solo correspondentes a dois potenciais matriciais (-10 e -50 kPa); e a subparcela composta por sete tempos de contato (1, 2, 4, 8, 15, 30 e 45 dias após a adição dos fertilizantes fosfatados).

A caracterização química dos fertilizantes fosfatados é apresentada na tabela 2. O ORG foi produzido através do processo de peletização após a mistura de torta de filtro (após o processo de compostagem), fosfato monoamônico e um polímero orgânico biodegradável.

A dose de P aplicada foi de 135,2 mg dm⁻³ de P no LVA 1 e de 200,8 mg dm⁻³ de P no LVA 2, que correspondente a 20 % da CMAP de cada solo. A fim de homogeneizar a granulometria, os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2 a 3,35 mm.

Tabela 2. Caracterização química dos fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	N ¹	P ₂ O ₅ ²	K ₂ O ³	C ⁴	CTC ⁵
	----- % -----				mmol _c kg ⁻¹
CONV	10,8	51,7	0	-	-
POL	8,9	46,8	0	-	-
ORG	6,1	30,3	0	7,9	80,2

¹/N total; ²/P total; ³/K = Potássio solúvel em água; ⁴/C = Carbono orgânico total; ⁵/CTC = Capacidade de Troca Catiônica (Mapa, 2014). CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro.

Como unidade experimental foram utilizadas placas de petri (86 mm de diâmetro), onde as amostras de solo (65 g) foram adicionadas. Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir os potenciais matriciais desejados e as placas de petri foram incubadas por 24 horas, a fim de garantir maior uniformidade na distribuição da água que foi aplicada sobre as amostras de solo. Após esse período, um grânulo do fertilizante fosfatado de cada tratamento foi colocado no centro da placa de petri. A umidade do solo nas placas foi controlada através de pesagem, adicionando água deionizada quando necessário.

Ao final de cada tempo de contato, os grânulos dos fertilizantes fosfatados foram retirados. Em seguida, foram coletadas amostras de solo na forma de anéis concêntricos nas distâncias 0,0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm distante do grânulo do fertilizante fosfatado, iniciando-se pela região central. As subamostras retiradas foram secas a 40 °C até massa constante, para posterior determinação da concentração de P. Foi realizada a extração de P por Mehlich-1 e a determinação por colorimetria.

Os dados foram submetidos à análise de variância, usando o programa R (R Core Team, 2018). Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 5 % de probabilidade, e os tempos de contato foram avaliados por regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores médios de P disponível no LVA 1 (1144,80 mg dm⁻³) foram superiores aos teores no LVA 2 (835,90 mg dm⁻³) comprovado pelo teste F ($p \leq 0,05$), como era esperado, uma vez que, o LVA 2 apresenta maior CMAP (Tabela 1). Solos que possuem maior CMAP apresentam menor disponibilidade de P ao longo do tempo, devido à maior adsorção de P com o tempo de contato (Novais et al., 2007; Rodrigues et al., 2016), como observado nesse experimento (Tabela 3).

Tabela 3. Teores médios de P disponível (mg dm^{-3}) após aplicação dos fertilizantes fosfatados (Fert) considerando os solos, os potenciais matriciais (Ψ_m), os tempos de contato e as distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado (Dist)

Fert	Ψ_m (kPa)	Dist (cm)	Tempos de contato (dias)						
			1	2	4	8	15	30	45
Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa									
CONV	-10	0,0-0,5	2218,9	1999,2	1798,9	1340,4	1101,1	1072,9	951,2
		0,5-1,0	449,9	561,0	646,3	666,9	693,6	706,5	736,7
	-50	0,0-0,5	2927,2	3022,1	2504,4	2067,8	1626,6	1597,7	1421,4
		0,5-1,0	133,6	422,0	557,9	561,0	647,4	649,9	675,1
POL	-10	0,0-0,5	2140,8	2013,5	1890,8	1386,2	1115,6	1155,4	1049,7
		0,5-1,0	468,3	577,4	715,8	720,1	760,4	765,0	759,2
	-50	0,0-0,5	2962,0	3218,3	2573,6	2126,6	1714,4	1743,3	1518,0
		0,5-1,0	142,3	462,6	576,4	590,1	631,3	661,4	694,1
ORG	-10	0,0-0,5	1726,2	1534,0	1517,3	1209,3	1118,4	1032,1	897,1
		0,5-1,0	216,6	325,0	423,0	548,9	565,9	574,6	591,2
	-50	0,0-0,5	2035,8	2039,2	1951,0	1848,5	1665,4	1618,6	1319,3
		0,5-1,0	123,2	171,3	310,6	424,4	410,9	522,1	552,6
Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa									
CONV	-10	0,0-0,5	1922,7	1467,1	1440,3	1252,8	1070,3	918,0	850,0
		0,5-1,0	60,0	296,1	317,3	333,1	333,5	356,9	399,5
	-50	0,0-0,5	1898,6	1882,3	1758,7	1618,9	1419,5	1347,0	1171,5
		0,5-1,0	38,5	162,4	250,2	308,1	312,4	335,4	345,9
POL	-10	0,0-0,5	1748,4	1799,8	1462,9	1245,4	1055,5	977,4	988,8
		0,5-1,0	111,1	290,0	309,5	325,7	314,9	360,3	401,6
	-50	0,0-0,5	2008,3	2290,5	1895,5	1826,2	1486,2	1481,8	1401,2
		0,5-1,0	36,0	191,0	259,2	318,3	315,4	311,6	362,5
ORG	-10	0,0-0,5	1449,7	1302,9	1247,4	1155,8	1078,0	984,6	1019,9
		0,5-1,0	91,5	159,3	230,0	246,5	307,2	342,8	472,4
	-50	0,0-0,5	1603,3	1628,8	1373,4	1386,5	1263,6	1165,0	1160,4
		0,5-1,0	52,2	82,9	130,2	184,5	190,2	204,0	261,6

CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro.

Os teores de P disponível foram superiores para o CONV quando comparado com os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) no LVA 1 (C1, Tabela 4). Esses resultados podem estar relacionados a uma menor velocidade de dissolução do ORG, resultando em teores médios de P disponível de $974,01 \text{ mg dm}^{-3}$ durante esse experimento, enquanto os teores para o POL e CONV foram, respectivamente, $1254,74$ e $1205,63 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 3). Devido a isso, os menores teores de P disponível do ORG resultaram na diferença estatística entre o CONV e os fertilizantes com proteção integrada.

Tabela 4. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) para os fertilizantes fosfatados dentro dos solos independente dos potenciais matriciais, dos tempos de contato e das distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado

Solos	C1	C2
LVA 1	91,25*	280,73*
LVA 2	24,73 ^{ns}	171,44*

C1: CONV vs POL + ORG /Solos (2+, --); C2: POL vs ORG /Solos (+, -); * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa.

A concentração de P disponível no solo aumenta rapidamente quando se aplica uma fonte solúvel de P, como o fosfato monoamônico (Lombi et al., 2004), conforme observado nesse experimento (Tabela 3). Entretanto, o aumento do tempo de contato do P com os óxidos de Fe e Al reduz a disponibilidade desse nutriente no solo (Guedes et al., 2016). Esse comportamento corrobora com os resultados observados no LVA 1, em que as menores diminuições dos teores médios de P disponível foram observados no ORG (18,1 %), seguidos do POL (29,6 %) e do CONV (34,0 %), quando comparado o primeiro tempo de contato (1 dia) com o último tempo de contato (45 dias) (Tabela 3).

No LVA 2 não foram observadas diferenças entre os teores de P disponível do CONV em relação ao POL + ORG (C1, Tabela 4). Com base nesses resultados, levanta-se a hipótese que as tecnologias aplicadas nos fertilizantes fosfatados com proteção integrada para retardar a liberação de P pode não ser eficiente para aumentar a disponibilidade de P em solos com maior CMAP, visto que esses solos apresentam maior dreno de P. Castro et al. (2015) também não encontraram diferenças entre os fertilizantes fosfatados com proteção integrada estudados em Latossolo Vermelho argiloso.

Nota-se que o ORG apresentou diminuição de 8,8 % dos teores médios de P disponível do primeiro tempo de contato (1 dia) para o último tempo de contato (45 dias) no LVA 2, enquanto o POL e o CONV apresentaram diminuição de 19,2 e 29,4 %, respectivamente. A menor redução dos teores de P disponível observada no ORG pode estar relacionada ao fato do ORG ter retardado a liberação de P para a solução do solo, reduzindo o tempo de contato do P com os colóides do solo e, conseqüentemente, a adsorção de P.

Com base nos resultados descritos, pode-se inferir que a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL e ORG) podem ser uma alternativa para manter a disponibilidade de P nos solos estudados durante um maior período de

tempo quando comparado a uma fonte solúvel como o fosfato monoamônico. O ORG apresentou teores de P disponível constante ao longo dos tempos estudados e também menores reduções na disponibilidade de P (Tabela 3).

Pauly et al. (2002) observaram que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada retardaram a liberação, aumentaram a disponibilidade e a eficiência do uso de P. Avaliando a disponibilidade de P em solos com diferentes texturas em função da aplicação de fertilizante fosfatado com proteção integrada, Machado e Souza (2012) observaram acréscimo na disponibilidade de P no solo de textura argilosa de 34, 22 e 38 % com aplicação das doses 50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

O POL apresentou maiores teores de P disponível que o ORG em ambos os solos estudados (C2, Tabela 4). Os teores médios de P disponível para o POL foram 28,8 e 23,1 % maiores em relação ao ORG no LVA 1 e LVA 2, respectivamente (Tabela 3). Como foi utilizada a mesma dose e fonte de P, esses resultados demonstram que o POL apresentou liberação de P mais rápida que o ORG e aumentou a disponibilidade de P nesse experimento. No entanto, pelo fato do ORG possivelmente ter retardado a liberação de P, levanta-se a hipótese que esse fertilizante pode manter constante a disponibilidade de P ao longo do tempo, como observado pelas menores reduções dos teores de P disponível nos tempos de contato estudados (Tabela 3).

Os maiores teores de P disponível encontrados para o POL em relação ao ORG podem ter sido proporcionados pela estrutura dos grânulos revestidos por polímeros, que reduz o contato direto do P com os colóides do solo, minimizando as perdas de P por adsorção (Guareschi et al., 2011). Estudando a disponibilidade de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, Stauffer et al. (2019) verificaram que o fosfato monoamônico revestido com polímeros apresentou maiores teores de P disponível que os organofosfatados, corroborando com os resultados encontrados nesse experimento.

Os teores de P disponível foram superiores para o CONV quando contrastado ao POL + ORG nas distâncias 0,0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado, no LVA 1 (C3, Tabela 5). Isso ocorreu devido a rápida liberação de P do CONV, resultando no aumento dos teores de P disponível nessas distâncias em relação aos demais fertilizantes (Tabela 3), o que resultou no aumento do gradiente de concentração de P, favorecendo sua difusão, sendo observadas as diferenças entre os fertilizantes nessas distâncias.

Tabela 5. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) para os fertilizantes fosfatados considerando os solos e as distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado independente dos potenciais matriciais e dos tempos de contato

C	Distâncias (cm)			
	LVA 1		LVA 2	
	0,0-0,5	0,5-1,0	0,0-0,5	0,5-1,0
C3	113,56*	68,95*	19,59 ^{ns}	29,87 ^{ns}
C4	364,00*	197,46*	274,90*	67,98*

C3: CONV vs POL + ORG /solos/distâncias (2+, --); C4: POL vs ORG /solos/distâncias (+, -). * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa.

No LVA 2 não foram observadas diferenças entre os teores de P disponível do CONV em relação ao POL + ORG nas distâncias 0,0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado (C3, Tabela 5), relacionado ao fato de que esses fertilizantes não apresentaram diferenças estatísticas nos teores de P disponível nesse solo (C1, Tabela 4).

Nas distâncias 0,0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm, o POL apresentou maiores teores de P disponível em relação ao ORG, em ambos os solos (C4, Tabela 5). A maior liberação de P pelo POL nessas distâncias pode ter proporcionado maiores teores de P disponível (Tabela 3), favorecendo a maior difusão de P em relação ao ORG.

O aumento no conteúdo volumétrico de água nos solos influencia o fator de impedância, diminuindo a tortuosidade da trajetória e a viscosidade da solução, aumentando a difusão de P (Novais et al., 2007). O potencial matricial de -50 kPa proporcionou maiores teores de P disponível comparado ao potencial matricial de -10 kPa na distância 0,0 - 0,5 cm para todos os fertilizantes fosfatados no LVA 1 e LVA 2 (C5, Tabela 6). Os resultados demonstram que o maior conteúdo volumétrico de água no potencial matricial de -10 kPa favoreceu a difusão de P da primeira (0,0 - 0,5 cm) para a segunda distância (0,5 - 1,0 cm).

Os menores teores de P disponível na distância de 0,0 - 0,5 cm no potencial matricial de -10 kPa (Tabela 3) podem ser explicados pela relação direta entre o coeficiente de difusão de P e o conteúdo de água no solo. Com o aumento do conteúdo volumétrico de água no solo maior será a difusão de P, devido ao filme de água próximo às partículas do solo ficar mais espesso, diminuindo a interação do P com os colóides do solo (Montalvo et al., 2014).

Tabela 6. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm^{-3}) para os potenciais matriciais considerando os solos, os fertilizantes fosfatados e as distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado independente dos tempos de contato

Fertilizantes	Distância (cm)	C5	
		LVA 1	LVA 2
CONV	0,0 - 0,5	-669,23*	-310,75*
	0,5 - 1,0	116,30*	49,06 ^{ns}
POL	0,0 - 0,5	-729,18*	-444,49*
	0,5 - 1,0	144,06*	45,60 ^{ns}
ORG	0,0 - 0,5	-491,90*	-191,83*
	0,5 - 1,0	104,30*	106,30*

C5: Potencial matricial de -10 kPa vs Potencial matricial de -50 kPa Solos/fertilizantes/Distâncias (+, -). * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa.

Estudando o efeito de potenciais matriciais de água do solo e doses de P, Ruiz et al. (1988) observaram que o conteúdo de água no solo pode ser mais importante para regulação da difusão de P em solos tropicais do que as doses aplicadas desse nutriente. Costa et al. (2006), estudando o efeito de conteúdos de água no solo e doses de P sobre a difusão de P em Latossolos, observaram que o incremento do conteúdo de água aumentou a difusão para qualquer dose desse nutriente.

De modo geral, foram observados teores superiores de P disponível para o potencial matricial de -10 kPa comparado ao potencial matricial de -50 kPa na distância 0,5 - 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado no LVA 1 e LVA 2 (C5, Tabela 6). Esses resultados estão relacionados à maior difusão de P para a região mais distante do grânulo do fertilizante fosfatado, devido ao maior conteúdo volumétrico de água nos solos.

Analisando os fertilizantes fosfatados em função dos tempos de contato, observou-se comportamento semelhante dos fertilizantes nos diferentes potenciais matriciais e solos, porém, com magnitudes distintas dos teores de P disponível (Figuras 1 e 2).

Os potenciais matriciais evidenciaram a diferenciação na liberação de P dos fertilizantes fosfatados, no qual nota-se que os fertilizantes apresentaram dois grupos diferentes de liberação de P no potencial matricial de -50 kPa, onde o ORG apresentou teores de P disponível mais constante ao longo dos tempos de contato (Figuras 1 e 2).

Os teores de P disponível na distância 0,0 - 0,5 cm do grânulo do fertilizante diminuíram ao longo dos tempos de contato, enquanto na distância 0,5 - 1,0 cm verificou-se incrementos nos teores de P disponível ao longo dos tempos de contato independentemente dos solos, dos fertilizantes e dos potenciais matriciais (Figuras 1 e 2). Esses resultados provavelmente estão relacionados aos maiores teores de P disponível na distância 0,0 - 0,5 cm, favorecendo à difusão de P para a distância 0,5 - 1,0 cm.

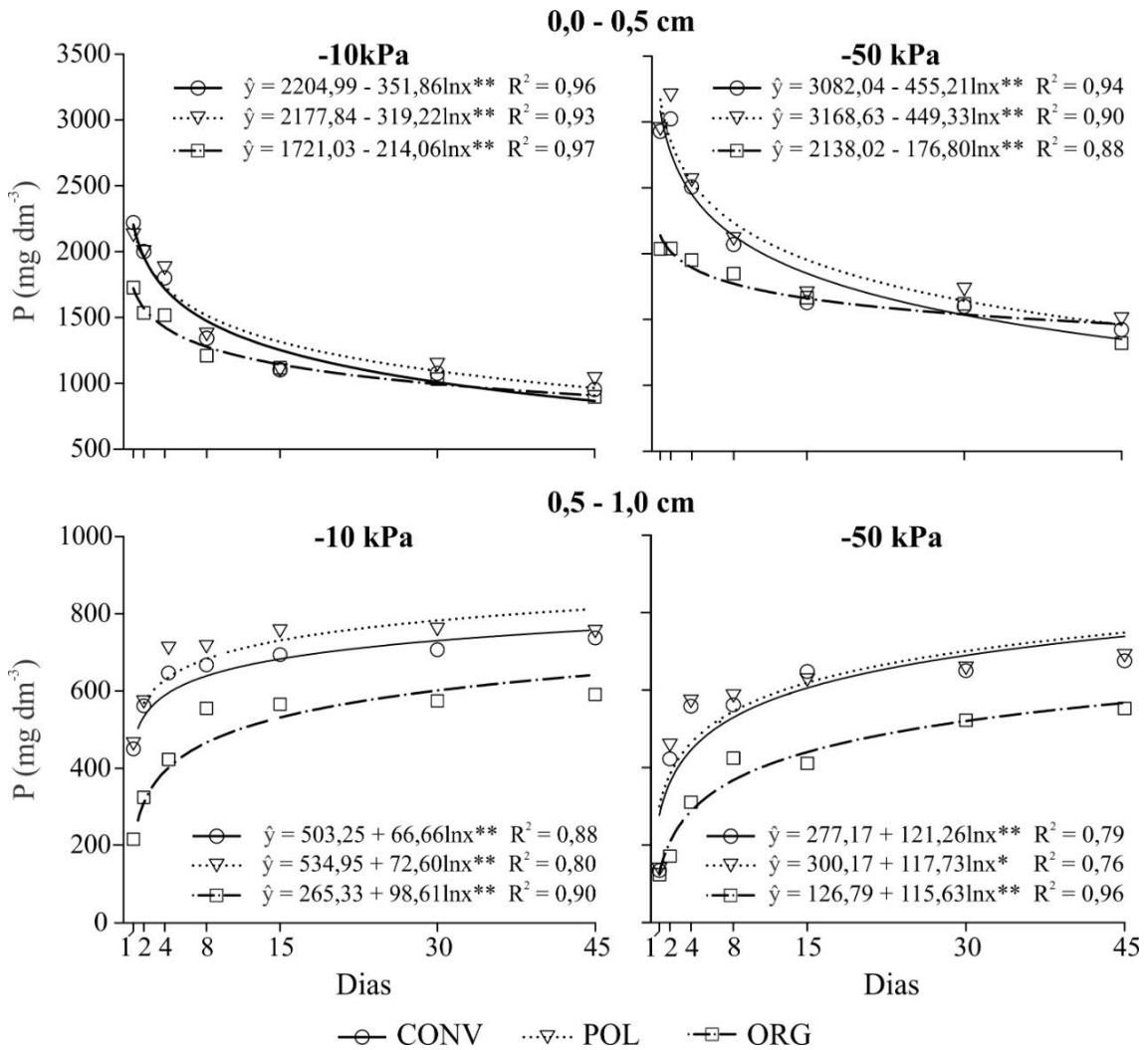


Figura 1. Teores de P disponível ao longo dos tempos de contato influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais, em duas distâncias a partir do grânulo, no Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

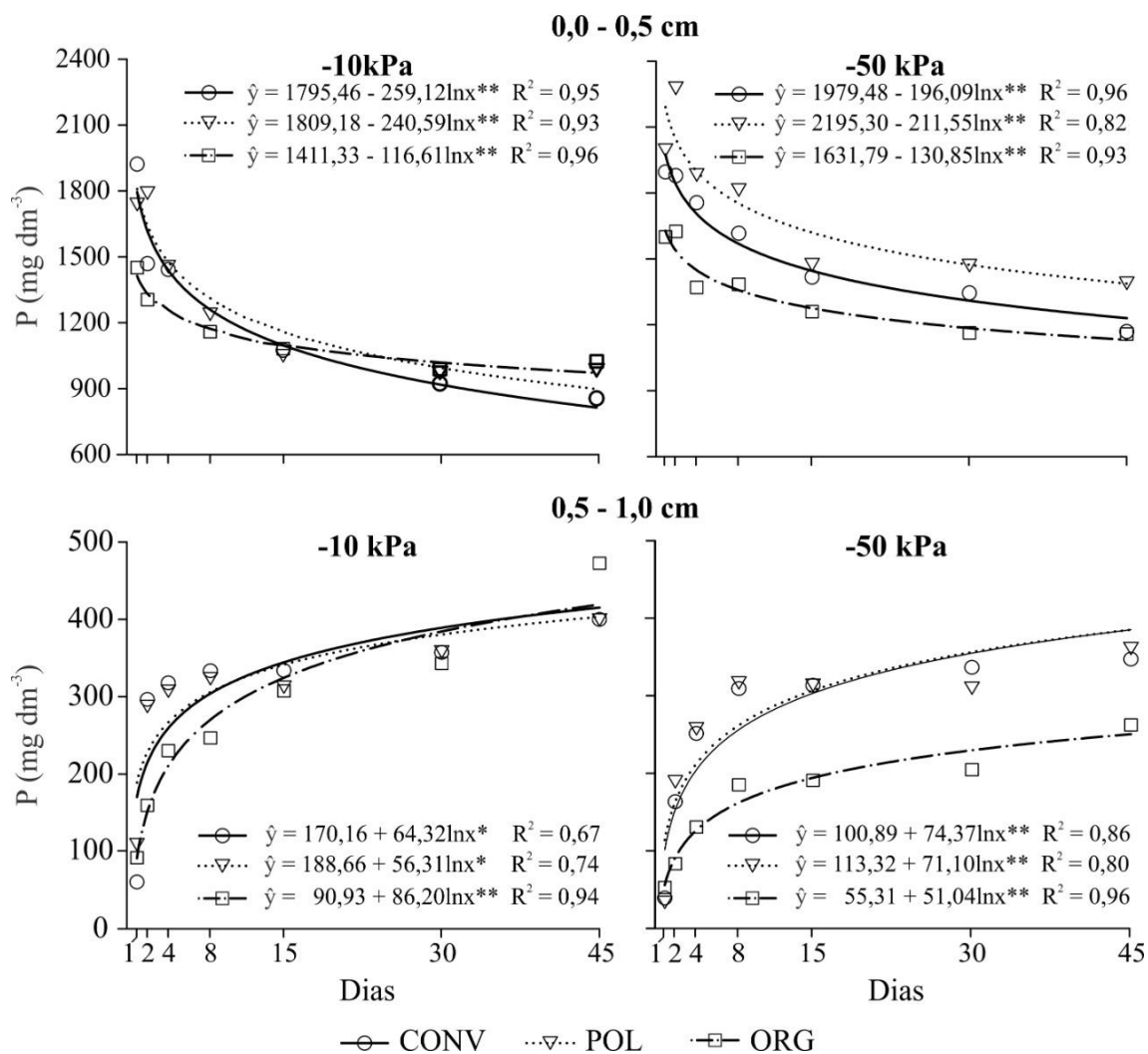


Figura 2. Teores de P disponível ao longo dos tempos de contato influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais, em duas distâncias a partir do grânulo, no Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

4. CONCLUSÃO

Os fertilizantes fosfatados influenciaram a disponibilidade de P nos solos estudados, no qual o fosfato monoamônico convencional apresentou os maiores teores de P disponível no solo com menor capacidade máxima de adsorção de P. Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada seguiram a ordem crescente da disponibilidade de P: fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro < fosfato monoamônico revestido com polímero.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada apresentaram menores reduções nos teores de P disponível ao longo dos tempos de contato, demonstrando a importância do revestimento do fertilizante fosfatado solúvel na disponibilidade de P no solo.

Os conteúdos volumétricos de água nos solos permitiram diferenciar a liberação de P dos fertilizantes fosfatados estudados, no qual o fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro apresentou teores de P disponível mais constante em ambos os solos, o que pode ser interessante na manutenção da disponibilidade de P ao longo do tempo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabi KE, Sorensen RC, Knudsen D, Rehm GW. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*. 1986;50:937–941.
- Almeida T, Pcojeski E, Nesi CN, Oliveira JPM, Silva LS. Eficiência de fertilizante fosfatado protegido na cultura do milho. *Scientia Agraria*. 2016;17:29–35.
- Alvarez V. VH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*; 2006.
- Alvarez V. VH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*; 2000;25:21-32.
- Andrade FV, Mendonça ES, Alvarez VH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2003;27:1003–1011.
- Broggi F, Oliveira AC, Freire FJ, Oliveira ECA, Rocha AT, Freire MBGDS. Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *Revista Caatinga*. 2014;27:164–170.
- 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.
- Costa JPV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2006;10:828–835.
- DeLonge M, Vandecar KL, D’Odorico P, Lawrence D. The impact of changing moisture conditions on short-term P availability in weathered soils. *Plant and Soil*. 2013;365:201–209.
- Fink JR, Inda AV, 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*. 2014;36:379–387.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011;35:643–648.
- 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.
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*. 2005;43:189–202.
- Hedley M, McLaughlin M. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In: Sims JT, Sharpley NA (ed.). *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America. 2005. p. 181–252.
- Lombi E, McLaughlin MJ, Johnston C, Armstrong RD, Holloway RE. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil*. 2004;269:25–34.
- Machado VJ, Souza CHE. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*. 2012;28:1–7.
- McLaughlin MJ, McBeath TM, Smernik R, Stacey SP, 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*. 2011;349:69–87.
- Montalvo D, Degryse F, McLaughlin MJ. Fluid fertilizers improve phosphorus diffusion but not lability in Andisols and Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*. 2014;78:214–224.
- Novais RF, Alvarez V. VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007.
- Olsen SR, Watanabe FS. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the langmuir isotherm1. *Soil Science Society of America Journal*. 1957;21:144–149.
- Pauly DG, Nyborg M, Malhi SS. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. *Canadian Journal of Soil Science*. 2002;82:201–210.
- Pavinato PS, Merlin A, Rosolem CA. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil & Tillage Research*. 2009;105:149–155.
- R Core Team. *A language and environment for statistical computing*. 2018.
- Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*. 1949;68:95–112.

- Rodrigues M, Pavinato PS, Withers PJA, Teles APB, Herrera WFB. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of The Total Environment*. 2016;542:1050–1061.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988;12:43–48.
- Silva FC. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.
- Stauffer E, Andrade FV, Mendonça ES, Donagemma GK. Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13:61–68.
- Teixeira PC, Donagemma, GK, FA, Teixeira, WG. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília: Embrapa; 2017.
- Teixeira RS, Silva IR, Sousa RN, Mattiello EM, Soares EMB. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16:1097–1112.
- Yeomans JC, Bremner JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1988;19:1467–1476.

APÊNDICE

Tabela 1A. Análise de variância dos teores de P disponível em função da aplicação de fertilizantes fosfatados (Fert) considerando os solos, os potenciais matriciais (Ψ_m), os tempos de contato (TC) e as distâncias do grânulo do fertilizante fosfatado (Dist)

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio
Solos	1	16029590,171*
Fert/Solo1	2	2517600,977*
Fert/Solo2	2	845775,821*
Fert/Solo1/Dist1	2	2095714,978*
Fert/Solo1/Dist2	2	634616,522*
Fert/Solo2/Dist1	2	1065123,383*
Fert/Solo2/Dist2	2	81348,995*
Ψ_m /Solo1/Fert1/Dist1	1	6270230,023*
Ψ_m /Solo1/Fert1/Dist2	1	189355,008*
Ψ_m /Solo1/Fert2/Dist1	1	7443943,407*
Ψ_m /Solo1/Fert2/Dist2	1	290545,970*
Ψ_m /Solo1/Fert3/Dist1	1	3387567,730*
Ψ_m /Solo1/Fert3/Dist2	1	152312,419*
Ψ_m /Solo2/Fert1/Dist1	1	1351958,272*
Ψ_m /Solo2/Fert1/Dist2	1	33689,992
Ψ_m /Solo2/Fert2/Dist1	1	2765990,151*
Ψ_m /Solo2/Fert2/Dist2	1	29108,304
Ψ_m /Solo2/Fert3/Dist1	1	515199,749*
Ψ_m /Solo2/Fert3/Dist2	1	158191,408*
Resíduo	547	16051,439
CV (%)	12,79	

Solo1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; Solo2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa; Fert1 = fosfato monoamônico convencional; Fert2 = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; Fert3 = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm a partir do grânulo do fertilizante fosfatado; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm a partir do grânulo do fertilizante fosfatado. * Significativo a 5 % pelo teste F.

CAPÍTULO 3

FERTILIZANTES FOSFATADOS COM PROTEÇÃO INTEGRADA NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays*)

RESUMO

A maioria dos solos brasileiros apresentam baixa disponibilidade e elevada capacidade de adsorção de fósforo (P), sendo baixo o aproveitamento do P aplicado via adubação. Nesse sentido, alternativas tecnológicas têm sido estudadas para aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados, para que seja possível diminuir a intensidade do fenômeno de adsorção de P no solo, tornando-o mais disponível para as plantas. Nesse trabalho, objetivou-se avaliar a aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos e conteúdos volumétricos de água no desenvolvimento inicial da cultura do milho. O experimento foi realizado em casa de vegetação em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. O esquema fatorial foi $2 \times 3 \times 2$, sendo: dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e dois conteúdos de água no solo correspondentes a dois potenciais matriciais (-15 e -50 kPa). A dose de P aplicada foi 168,3 e 251,0 mg dm⁻³ para o LVA 1 e LVA 2, respectivamente. Foi utilizado como planta-teste o milho. O experimento foi conduzido durante 30 dias após o transplântio. Após esse período, foi realizada a determinação da área foliar, da produção da matéria seca de folhas, da concentração de P do exsudato xilemático e dos teores foliares de P. Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) apresentaram maior matéria seca de folha (5,0 %), teor de fósforo na folha (7,4 %), teor de fósforo na seiva xilemática (7,6 %) e conteúdo de fósforo na folha (15,7 %) no LVA 1 e maior teor de fósforo na seiva xilemática (10,3 %) no LVA 2 em relação ao CONV. No LVA 1, o POL + ORG apresentaram maior área foliar, matéria seca de folha, teor de fósforo na folha, teor de fósforo na seiva xilemática e conteúdo de fósforo na folha no maior conteúdo de água (potencial matricial de -15 kPa). No entanto, no menor potencial matricial (-50 kPa) nos solos não ocorreram diferenças entre os fertilizantes fosfatados. Esses resultados indicam que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada

favorecem o desenvolvimento inicial das plantas de milho em solos com menor capacidade de adsorção de P e maior conteúdo de água no solo.

Palavras-chave: Fósforo, tecnologia em fertilizantes, nutrição de plantas.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) mesmo absorvido em menores quantidades, comparado ao nitrogênio e ao potássio, destaca-se dentre os nutrientes necessários ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, tendo importante função em diversos processos, como na formação de proteínas, divisão celular, fotossíntese, armazenamento e fornecimento de energia e respiração (Epstein e Bloom, 2006; Taiz e Zeiger, 2013).

A baixa disponibilidade de P é um fator limitante ao desenvolvimento das plantas nos solos tropicais altamente intemperizados (Johnson e Loeppert, 2006; Cessa et al., 2009). Esses solos possuem elevada capacidade de adsorção de P (Valladares et al., 2003; Campos et al., 2016) e, como consequência, apresentam baixa disponibilidade de P (Fink et al., 2016).

O conteúdo de água no solo também influencia a disponibilidade de P no solo (Ruiz et al., 1988c). Estudando o efeito de níveis de umidade, Costa et al. (2006) observaram que o aumento no conteúdo de água nos solos resultou em maior fluxo difusivo de P, e conseqüentemente, em maior disponibilidade de P nos solos.

Como alternativa para aumentar a disponibilidade de P nos solos tem sido estudado a utilização de fertilizantes fosfatados que contém tecnologia agregada. Esses fertilizantes retardam a liberação de P para a solução do solo, com potencial de aumento na disponibilidade de P quando comparado aos fertilizantes convencionais, sendo denominados nesse trabalho de fertilizantes fosfatados com proteção integrada.

Na maioria dos trabalhos com fertilizantes fosfatados com proteção integrada, os autores usam os termos “liberação lenta de P ou liberação gradual de P” para explicar como ocorre a liberação de P desses fertilizantes. Contudo, nesse trabalho vamos considerar que as tecnologias retardam a liberação de P.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada podem ser revestidos ou misturados com diferentes materiais: polímeros biodegradáveis (Jin et al., 2013), polímeros sintéticos (Machado e Souza, 2012), ácidos orgânicos (Urrutia et al., 2014), cama de aviário (Castro et al., 2015), torta de filtro e composto suíno (Stauffer et al., 2019).

Alguns trabalhos têm apresentado resultados contraditórios sobre a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada. Estudos mostraram resultados de maior eficiência dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em culturas como soja (Guareschi et al., 2011), cevada (Pauly et al., 2002) e milho (Almeida et al., 2016). Entretanto, outros autores não observaram diferenças entre fertilizantes fosfatados

convencionais e revestidos em feijão (Valderrama et al., 2009) e milho (Valderrama et al., 2011).

Vários estudos foram realizados com intuito de avaliar os efeitos da aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diversas culturas, porém, informações sobre o comportamento desses fertilizantes quando são aplicados em diferentes solos e conteúdos volumétricos de água ainda são escassas na literatura.

Diante do exposto, objetivou-se nesse trabalho avaliar o desenvolvimento inicial de plantas de milho a partir aplicação de fertilizantes fosfatados com proteção integrada em diferentes solos e conteúdos volumétricos de água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre-ES. Para a condução do experimento foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (20° 46' 34" S e 41° 32' 27" W) e um Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa (20° 45' 38" S e 41° 29' 40" W), coletadas na profundidade de 0,20-0,40 m.

As amostras dos solos foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar e posteriormente foi realizada a caracterização química (Silva, 2009), física (Teixeira et al., 2017), P remanescente (Alvarez V. et al., 2000) e capacidade máxima de adsorção de P - CMAP (Olsen e Watanabe, 1957), como observado na tabela 1.

Após a caracterização química, amostras dos solos foram acondicionadas, homogeneizadas e incubadas em sacos plásticos com carbonato de cálcio para elevar o pH para 6,0, com base na curva de incubação com carbonato de cálcio (Alabi et al., 1986). As amostras foram incubadas durante 30 dias, mantendo-se a umidade dos solos a 75 % 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 delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo um esquema fatorial $2 \times 3 \times 2$, sendo: dois solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa – LVA 1 e Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa – LVA 2), três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG) e dois conteúdos de água no solo correspondentes a dois potenciais matriciais (-15 e -50 kPa).

Tabela 1. Caracterização física e química dos Latossolos Vermelho-Amarelo coletados na profundidade de 0,20 a 0,40 m

Característica	LVA 1	LVA 2
Textura (g kg ⁻¹) ^{1/}		
Argila	466	600
Silte	41	23
Areia grossa	304	270
Areia fina	189	107
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{2/}	1,165	1,166
Retenção de água (g kg ⁻¹) ^{3/}		
-15 kPa	256	350
-50 kPa	218	271
-1500 kPa	172	216
pH-H ₂ O ^{4/}	5,16	4,84
P (mg dm ⁻³) ^{6/}	2,10	5,10
P-rem (mg L ⁻¹) ^{7/}	27,09	8,83
CMAP (mg cm ⁻³) ^{8/}	0,673	1,004
COT (dag kg ⁻¹) ^{9/}	1,40	0,60

^{1/}Método da pipeta; ^{2/}Método da proveta; ^{3/} Extrator de placa porosa (Richards, 1949); ^{4/} Relação solo-água 1:2,5; ^{5/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ^{6/} Extrator Mehlich-1; ^{7/} Fósforo remanescente; ^{8/} Capacidade máxima de adsorção de fósforo; ^{9/}Carbono orgânico total (Yeomans e Bremner, 1988).

A caracterização química dos fertilizantes fosfatados é demonstrada na tabela 2. A fabricação do ORG foi através do processo de peletização após a mistura de torta de filtro (após o processo de compostagem), fosfato monoamônico e um polímero orgânico biodegradável.

A dose de P aplicada no LVA 1 e no LVA 2 foi de 168,3 e de 251,0 mg dm⁻³, respectivamente, que correspondente a 25 % da CMAP de cada solo. A fim de homogeneizar a granulometria, os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2 a 3,35 mm.

Tabela 2. Caracterização química dos fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	N ^{1/}	P ₂ O ₅ ^{2/}	K ₂ O ^{3/}	C ^{4/}	CTC ^{5/}
	----- % -----				mmol _c kg ⁻¹
CONV	10,8	51,7	0	-	-
POL	8,9	46,8	0	-	-
ORG	6,1	30,3	0	7,9	80,2

^{1/}N total; ^{2/}P total; ^{3/}K = Potássio solúvel em água; ^{4/}C = Carbono orgânico total; ^{5/}CTC = Capacidade de Troca Catiônica (Mapa, 2014). CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

As unidades experimentais foram constituídas de vasos plásticos de base retangular, geminados (Ruiz et al., 1988a), constituídos de duas unidades (A e B) de 5 dm³ cada. A unidade A foi constituída com solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1950), sem P comum a todos os tratamentos, para assegurar à planta o suprimento efetivo de macronutrientes (exceto P), micronutrientes e água necessários ao seu crescimento normal. A solução nutritiva foi arejada continuamente e coberta por uma tampa de isopor. O pH da solução nutritiva foi mantido em 5,5, com correção diária.

A unidade B foi constituída com o solo com os tratamentos. A aplicação dos fertilizantes fosfatados foi realizada simulando uma adubação em sulco (em linha), adicionando-se os fertilizantes próximos das raízes na metade do vaso da unidade B. Foram colocadas tampas de isopor sobre o solo da unidade B, para reduzir as perdas de água por evaporação.

Foi utilizado como planta-teste o milho (híbrido PRE 22S18). As sementes foram colocadas para germinar em papel germitest por sete dias. Após germinação, a raiz principal das plântulas foi cortada, favorecendo o crescimento de raízes secundárias em solução nutritiva adaptada (Hoagland e Arnon, 1950) durante sete dias. Dez plântulas foram separadas no momento do transplântio para análise dos nutrientes em estudo. Duas plântulas foram transplântadas em cada unidade experimental, com distribuição das raízes entre as unidades A e B.

Os potenciais matriciais das unidades B foram monitorados diariamente utilizando-se sensores de umidade do solo (modelo 5TE da Decagon Devices) localizados no terço médio do vaso. No início da manhã foram realizadas as leituras da umidade dos solos, ajustando o potencial matricial diariamente.

O experimento foi conduzido durante 30 dias após o transplântio. 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 no integrador de área foliar “Area meter”, modelo 3100, LiCor.

Em seguida, as folhas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas, para posterior determinação da matéria seca de folhas (MSF).

Paralelamente, após o corte da parte aérea, foi coletado exsudato xilemático durante 2 h, por contato direto de tubos capilares com a região do corte (Ruiz et al., 1988b). A coleta foi realizada entre 5 e 7 h da manhã, para evitar o período de maior

temperatura e radiação solar. A concentração de P no exsudato xilemático foi determinada por espectrofotometria de emissão óptica com plasma acoplado por indução.

Os teores de P nas folhas foram determinados de acordo com Silva (2009). Os conteúdos de P nas folhas foram calculados multiplicando-se os teores de P pelos respectivos valores da matéria seca, ($C = MS \times T$, em que C = conteúdo do nutriente; MS = peso da matéria seca; e T = teor do nutriente).

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o programa R (R Core Team, 2018). Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 5 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área foliar (AF), a matéria seca de folhas (MSF), o teor de fósforo nas folhas (TPF), o teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF) foram maiores no LVA 1 quando comparado ao LVA 2 (Tabela 3 e C1, Tabela 4), devido à maior CMAP do LVA 2 (Tabela 1). Solos que apresentam maior CMAP apresentam menor disponibilidade de P, devido à maior adsorção (Ranno et al., 2007).

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) quando comparados ao CONV apresentaram maior MSF, TPF, TPS e CPF no LVA 1 e maior TPS no LVA 2 (Tabela 3 e C2, Tabela 5). Os valores médios para os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) frente ao convencional (CONV) foram superiores em 5,0 % na MSF, 7,4 % no TPF, 7,6 % no TPS e 15,7 % no CPF no LVA 1 e 10,3 % no TPS no LVA 2 (Tabela 3). Com base nesses resultados, espera-se que a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada pode ser uma alternativa para aumentar o aproveitamento de P pelas plantas de milho em solos com menor capacidade de adsorção de P quando comparado a uma fonte solúvel como o CONV.

Tabela 3. Área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), teor de fósforo nas folhas (TPF), teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF), considerando os solos, os fertilizantes fosfatados e os potenciais matriciais (kPa)

Fertilizantes	Potencial matricial	AF	MSF	TPF	TPS	CPF
		cm ²	g planta ⁻¹	---- g kg ⁻¹ ----	----	mg planta ⁻¹
Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa						
CONV	-15	1892,3	8,56	4,57	70,45	39,15
	-50	1498,4	6,37	4,35	52,99	27,78
POL	-15	2073,7	9,35	5,48	84,81	51,21
	-50	1560,4	6,59	4,53	50,39	29,91
ORG	-15	2083,2	9,14	5,66	80,29	51,78
	-50	1422,0	6,28	3,50	50,25	21,94
Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa						
CONV	-15	1702,2	8,15	4,16	66,44	33,86
	-50	1314,4	6,03	3,88	46,31	23,36
POL	-15	1639,7	7,81	4,21	71,16	32,91
	-50	1357,6	6,27	3,89	56,77	24,40
ORG	-15	1659,3	7,95	4,07	67,80	32,35
	-50	1314,8	6,28	3,65	52,89	22,93

CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro.

Tabela 4. Contrastes ortogonais (C) da área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), teor de fósforo nas folhas (TPF), teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF), considerando os solos independente dos fertilizantes fosfatados e dos potenciais matriciais

C	AF	MSF	TPF	TPS	CPF
	cm ² planta ⁻¹	g planta ⁻¹	---- g kg ⁻¹ ----	----	mg planta ⁻¹
C1	257,00*	0,63*	0,71*	4,63*	8,66*

C1: LVA 1 vs LVA 2 (+, -); * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. LVA 1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; LVA 2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa.

Almeida et al. (2016) também verificaram que a aplicação de fertilizante fosfatado com proteção integrada promoveu melhores resultados na cultura do milho. Os autores observaram que o fertilizante fosfatado com proteção integrada utilizado resultou em maior produção de matéria seca (18,52 t ha⁻¹) e produtividade de grãos (11,3 t ha⁻¹), representando aumento de 11,1 % na produção de matéria seca e 12,9 % na produtividade de grãos em relação ao fertilizante fosfatado convencional (superfosfato triplo).

O revestimento nos grânulos dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada aumenta a disponibilidade de P no solo, por evitar o contato direto do P com os colóides do solo (Guareschi et al., 2011) e por atrasar a liberação de P na solução do solo (Silva et al., 2012). Isto possivelmente ocorreu no presente estudo, pois os fertilizantes POL + ORG proporcionaram maior MSF, TPF, TPS e CPF (C2, Tabela 5).

Outros estudos também mostram que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada proporcionam maior aproveitamento do P pelas plantas. Teixeira et al. (2016) verificaram que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada aumentaram a disponibilidade de P para plantas de milho ao longo do tempo, apresentando eficiência agrônômica variando de 3 a 13 % maior que o fosfato monoamônico convencional. Estudando a aplicação de fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros na cultura da cevada, Pauly et al. (2002) observaram que o fosfato monoamônico revestido com polímero proporcionou taxa de absorção de P pelas plantas 4,21 % superior em comparação ao fosfato monoamônico sem revestimento, demonstrando maior aproveitamento de P.

Ao comparar as tecnologias dos fertilizantes fosfatados entre si pelo contraste C3 (Tabela 5), nota-se que o POL apresentou maior TPF e CPF no LVA 1 e maior TPF no LVA 2. Os valores do TPF para o POL foram 9,4 e 4,9 % maiores em relação ao ORG no LVA 1 e LVA 2, respectivamente (Tabela 3). O valor do CPF foi 10,0 % maior no POL em relação ao ORG no LVA 1 (Tabela 3). Isso provavelmente está relacionado à maior disponibilidade de P nos solos estudados com a aplicação do POL em relação ao ORG, conforme observado por Stauffer et al. (2019).

A liberação de P dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada são influenciadas por vários fatores, tais como: porosidade do revestimento (Tomaszewska e Jarosiewicz, 2004), espessura da camada de revestimento (Lubkowski, 2014) e composição química do polímero (Han et al., 2009). Nesse sentido, os melhores resultados para o POL em relação ao ORG podem estar relacionados às suas distintas características (processo de fabricação, tipo e espessura do revestimento, quantidade de microfissuras em sua superfície) favorecendo a liberação de P e a absorção pelas plantas de milho.

Tabela 5. Contrastes ortogonais (C) da área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), teor de fósforo nas folhas (TPF), teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF), considerando os fertilizantes fosfatados dentro dos solos, independente dos potenciais matriciais

C	AF	MSF	TPF	TPS	CPF
	cm ² planta ⁻¹	g planta ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----	-----	mg planta ⁻¹
Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa					
C2	-89,43 ^{ns}	-0,37*	-0,33*	-4,72*	-5,24*
C3	64,50 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,43*	2,33 ^{ns}	3,70*
Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa					
C2	15,44 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-5,78*	0,46 ^{ns}
C3	11,61 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,19*	3,62 ^{ns}	1,02 ^{ns}

C2: CONV vs POL + ORG /Solos (2+, --); C3: POL vs ORG /Solos (+, -); * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

Avaliando a aplicação do fosfato monoamônico com revestimento na cultura do milho, Figueiredo et al. (2012) também observaram que o fertilizante polimerizado promoveu melhores resultados, com maior produtividade de grãos, produção de matéria seca total e altura das plantas. Os autores atribuíram esses resultados ao revestimento com polímeros, que permitiu aumentar a disponibilidade de P no solo para as plantas de milho. Stauffer et al. (2019), estudando os efeitos de fertilizantes fosfatados com proteção integrada na disponibilidade de P no solo, verificaram que o fosfato monoamônico revestido com polímeros aumentou a disponibilidade de P no solo. A maior disponibilidade de P proporcionada pelo POL, como observados pelos autores, deve ter favorecido a absorção de P pelas plantas de milho, uma vez que observou-se maiores TPF e CPF no LVA 1 e maior TPF no LVA 2 (C3, Tabela 5).

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) comparado ao CONV, dentro do potencial matricial de -15 kPa no LVA 1, apresentaram maior AF, MSF, TPF, TPS e CPF (C4, Tabela 6). Esses resultados podem estar relacionados ao revestimento do POL e do ORG, que podem ter retardado a liberação de P para a solução do solo durante o período do experimento. Esse comportamento pode ter diminuído o tempo de contato do P com os colóides do solo, favorecendo a absorção de P pelas plantas de milho. Como o CONV não tem revestimento, ocorreu a rápida liberação de P para a solução do solo, aumentando o tempo de contato de P e, conseqüentemente, diminuindo a disponibilidade de P.

A liberação dos nutrientes através de uma membrana de polímero não é significativamente afetada pelas propriedades do solo, tais como pH, textura e atividade microbiana, mas sim pela temperatura, umidade e permeabilidade do revestimento de polímero (Trenkel, 2010). Isso pode explicar os maiores valores de AF, MSF, TPF, TPS e CPF dos fertilizantes com proteção integrada (POL + ORG) em relação ao convencional (CONV), pois o maior conteúdo de água no LVA 1 pode ter provocado a expansão da camada de polímero, liberando mais P para a solução do solo, e aumentando sua disponibilidade para as plantas de milho.

O CONV apresentou maior TPF em relação ao POL + ORG dentro do potencial matricial de -50 kPa no LVA 1 (C4, Tabela 6). Esse resultado provavelmente está relacionado ao TPF ($3,50 \text{ g kg}^{-1}$) observado no ORG (Tabela 3), enquanto o TPF para o POL e CONV foram, respectivamente, 4,53 e $4,35 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 3). Devido a isso, observa-se que os menores TPF do ORG resultaram na diferença estatística entre o CONV com o POL + ORG. Esses menores TPF podem estar relacionados à menor disponibilidade de P proporcionada pelo ORG.

Para as demais variáveis não foram observadas diferenças do CONV em relação ao POL + ORG dentro do potencial matricial de -50 kPa no LVA 1 (C4, Tabela 6). Esses resultados podem estar relacionados ao fato dos revestimentos do POL e do ORG apresentarem barreira física à solubilização do P e, em condições de menor conteúdo de água no solo, retarda a liberação de P, com isso, não resultou em diferenças entre o CONV e o POL + ORG. Para o maior conteúdo de água houve diferenças entre esses fertilizantes. Valderrama et al. (2011) também não encontraram diferenças entre os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (superfosfato simples e superfosfato simples polimerizado) na cultura do milho, corroborando com esses resultados.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada, comparados dentro do potencial matricial de -15 kPa no LVA 1, não apresentaram diferença para AF, MSF, TPF, TPS e CPF (C5, Tabela 6). No entanto, o POL apresentou maior CPF em relação ao ORG no potencial matricial de -50 kPa (C5, Tabela 6). Isso demonstra que em condições de maior conteúdo de água (potencial de -15 kPa), o POL e o ORG apresentam comportamento semelhante, porém, em condições de menor conteúdo de água o POL, possivelmente, deve ter liberado mais P para a solução do solo que o ORG, resultando no maior CPF.

Tabela 6. Contrastes ortogonais (C) da área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), teor de fósforo nas folhas (TPF), teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF) considerando os fertilizantes fosfatados dentro dos solos e dos potenciais matriciais (kPa)

C	Potencial matricial	AF	MSF	TPF	TPS	CPF
		cm ² planta ⁻¹	g planta ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----	-----	mg planta ⁻¹
Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa						
C4	-15	-186,10*	-0,68*	-1,00*	-12,10*	-12,34*
C5		-9,42 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	4,53 ^{ns}	-0,58 ^{ns}
C4	-50	7,23 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,34*	2,67 ^{ns}	1,85 ^{ns}
C5		138,42 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,04*	0,14 ^{ns}	7,97*
Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa						
C4	-15	52,69 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-3,04 ^{ns}	1,23 ^{ns}
C5		-19,57 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,14 ^{ns}	3,36 ^{ns}	0,56 ^{ns}
C4	-50	-21,81 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-8,52*	-0,31 ^{ns}
C5		42,78 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,24 ^{ns}	3,89 ^{ns}	1,47 ^{ns}

C4: CONV vs POL + ORG /Solos/potencial matricial (2+, --); C5: POL vs ORG /Solos/potencial matricial (+, -); * significativo e ^{ns} não significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste F. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

De maneira geral, a comparação entre o CONV com os fertilizantes com proteção integrada (POL + ORG) no LVA 2, dentro dos potenciais matriciais (-15 e -50 kPa), mostrou que não ocorreu diferença estatística para AF, MSF, TPF, TPS e CPF (C4, Tabela 6). Esses resultados demonstram a necessidade de melhorar a eficiência dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada estudados em solos com maior CMAP (LVA 2), uma vez que, em solos com menor CMAP (LVA 1), o POL + ORG apresentaram maior AF, MSF, TPF, TPS e CPF (C4, Tabela 6).

Esses resultados corroboram com Gazola et al. (2013), que estudaram o efeito da utilização de fosfato monoamônico com e sem revestimento na cultura de milho durante dois ciclos sucessivos em um Latossolo Vermelho textura argilosa. Os autores observaram que os fertilizantes fosfatados não apresentaram diferenças nas variáveis avaliadas (teor foliar de P, índice de clorofila foliar, diâmetro do segundo internódio do colmo, altura de inserção da primeira espiga e altura de plantas de milho).

Também não foram observadas diferenças para as variáveis AF, MSF, TPF, TPS e CPF no LVA 2 comparando o POL com o ORG dentro do potencial matricial de -15 kPa e de -50 kPa, (C5, Tabela 6). Com base nesses resultados, levanta-se a hipótese que

o retardamento da liberação de P nos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em solos com maior CMAP, pode não ser eficiente em aumentar sua disponibilidade, devido ao maior dreno de P desses solos.

4. CONCLUSÃO

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada apresentaram comportamentos distintos nos solos estudados, demonstrando que os efeitos da aplicação desses fertilizantes dependem do tipo de solo utilizado.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada proporcionaram maior matéria seca de folhas, teor e conteúdo de fósforo na folha e teor de fósforo na seiva xilemática no LVA 1, demonstrando que esses fertilizantes favorecem o desenvolvimento inicial das plantas de milho em solo com menor capacidade máxima de adsorção de fósforo.

Os conteúdos volumétricos de água nos solos permitiram diferenciar a liberação de P dos fertilizantes fosfatados, onde os fertilizantes com proteção integrada apresentaram os melhores resultados no maior conteúdo volumétrico de água.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabi KE, Sorensen RC, Knudsen D, Rehm GW. Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*. 1986;50:937–941.
- Almeida T, Pocojeski E, Nesi CN, Oliveira JPM, Silva LS. Eficiência de fertilizante fosfatado protegido na cultura do milho. *Scientia Agraria*. 2016;17:29–35.
- Alvarez V. VH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*; 2006.
- Alvarez V. VH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*; 2000;25:21-32.
- Campos M, Antonangelo JA, Alleoni LRF. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. *Soil & Tillage Research*. 2016;156:110–118.
- 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.
- Cessa RMA, Celi L, Vitorino ACT, Novelino JO, Barberis E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2009;33:1153–1162.
- Costa JPV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2006;10:828–835.
- Epstein E, Bloom AJ. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2. ed. Londrina: Planta; 2006.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43:446–452.
- Fink JR, Inda AV, Bavaresco J, Sánchez-Rodríguez AR, Barrón V, Torrent J, Bayer C. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52:203–210.
- Gazola RN, Buzetti S, Dinalli RP, Teixeira Filho MCM, Celestrino TS. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *Revista Ceres*. 2013;60:876–884.

- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011;35:643–648.
- Han X, Chen S, Hu X. Controlled-release fertilizer encapsulated by starch/polyvinyl alcohol coating. *Desalination*. 2009;240:21–26.
- Hoagland DR, Arnon DI. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station; 1950.
- Jin S, Wang Y, He J, Yang Y, Yu X, Yue G. Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013;128:407–415.
- Johnson SE, Loeppert RH. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. *Soil Science Society of America Journal*. 2006;70:222–234.
- Lubkowski K. Coating fertilizer granules with biodegradable materials for controlled fertilizer release. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014;13:2573–2581.
- Machado VJ, Souza CHE. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*. 2012;28:1–7.
- Olsen SR, Watanabe FS. A Method to Determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the langmuir isotherm1. *Soil Science Society of America Journal*. 1957;21:144–149.
- Pauly DG, Nyborg M, Malhi SS. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. *Canadian Journal of Soil Science*. 2002;82:201–210.
- R Core Team. A language and environment for statistical computing. 2018.
- Ranno SK, Silva LS, Gatiboni LC, Rhoden AC. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2007;31:21–28.
- Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*. 1949;68:95–112.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Alvarez V VH. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988a;12:39–42.

- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Alvarez V VH, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988b;12:43–48.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1988c;12:43–48.
- Silva AA, Silva TS, Vasconcelos ACP, Lana RMQ. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Bioscience Journal*. 2012;28:240–250.
- Silva FC. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.
- Stauffer E, Andrade FV, Mendonça ES, Donagemma GK. Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13:61–68.
- Taiz L, Zeiger E. *Fisiologia Vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed; 2013.
- Teixeira PC, Donagemma, GK, Fontana A, Teixeira, WG. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília: Embrapa; 2017.
- Teixeira RS, Silva IR, Sousa RN, Mattiello EM, Soares EMB. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16:1097–1112.
- Tomaszewska M, Jarosiewicz A. Polysulfone coating with starch addition in CRF formulation. *Desalination*. 2004;163:247–252.
- Trenkel ME. *Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. 2nd ed. Paris: International fertilizer industry association (IFA); 2010.
- Urrutia O, Erro J, Guardado I, San Francisco S, Mandado M, Baigorri R, Yvin JC, Garcia-Mina JM. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sci*. 2014;177:128–136.
- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Arf O, Sá ME. Fontes e doses de nitrogênio e fósforo em feijoeiro no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2009;39:191-196.

- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Teixeira Filho MCM. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2011;41:254-263.
- Valladares GS, Pereira MG, Anjos LHC. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia*. 2003;62:111–118.
- Yeomans JC, Bremner JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1988;19:1467–1476.

APÊNDICE

Tabela 1A. Análise de variância da área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), teor de fósforo nas folhas (TPF), teor de fósforo na seiva xilemática (TPS) e conteúdo de fósforo nas folhas (CPF) em função da aplicação de fertilizantes fosfatados (Fert) considerando os solos e os potenciais matriciais (Ψ_m)

Fonte de variação	GL	Quadrado médio				
		AF	MSF	TPF	TPS	CPF
Solos	1	3170444,520*	4,813*	5,999*	257,669*	899,341*
Fert/Solo1	2	118597,027	0,502	0,661*	70,197*	100,668*
Fert/Solo2	2	3619,528	0,011	0,082	115,360*	2,627
Fert/Solo1/ Ψ_m 1	2	185061,771*	0,663*	1,365*	215,775*	203,364*
Fert/Solo1/ Ψ_m 2	2	76920,703	0,098	1,227*	9,522	68,096*
Fert/Solo2/ Ψ_m 1	2	16336,735	0,111	0,020	23,623	2,339
Fert/Solo2/ Ψ_m 2	2	9860,618	0,084	0,071	111,906*	2,289
Resíduo	33	43190,748	0,156	0,035	21,403	4,315
CV (%)		6,39	5,34	4,33	7,40	6,37

Solo1 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa; Solo2 = Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa; Ψ_m 1 = potencial matricial de -10 kPa; Ψ_m 2 = potencial matricial de -50 kPa; * Significativo a 5 % pelo teste F.

CAPÍTULO 4

PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO DE CAFEIEIRO CONILON (*Coffea canephora*) EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO COM FERTILIZANTES COM PROTEÇÃO INTEGRADA

RESUMO

As variedades de cafeeiro conilon cultivadas atualmente apresentam alta exigência nutricional. A baixa disponibilidade de fósforo (P) e nitrogênio (N) no solo é um fator determinante na produtividade do cafeeiro, havendo a necessidade da aplicação de fertilizantes para aumentar a produtividade. Entretanto, os fertilizantes fosfatados e nitrogenados aplicados nos solos apresentam baixa eficiência de uso, devido às perdas por adsorção, volatilização e lixiviação. Nesse sentido, tecnologias em fertilizantes fosfatados e nitrogenados têm sido desenvolvidas no intuito de reduzir essas perdas, e consequentemente, aumentar o aproveitamento de P e N pelas plantas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade e a nutrição do cafeeiro conilon a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados e nitrogenados com proteção integrada. O experimento foi realizado em campo e seguiu o delineamento em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 3$, sendo três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG); duas quantidades dos fertilizantes fosfatados (Q100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; Q150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado); e dois fertilizantes nitrogenados (ureia convencional - UC e ureia convencional recoberta com polímero - UP). O experimento foi conduzido durante duas safras do cafeeiro (2017/2018 e 2018/2019). Em cada safra, foi realizada a colheita dos frutos de café para determinação da produtividade e as coletas das folhas em diferentes fases fenológicas do cafeeiro (repouso e senescência; chumbinho e expansão dos frutos; granação dos frutos e maturação dos frutos) para determinação dos teores de N e P. Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG), quando comparados ao CONV, apresentaram maior produtividade dos grãos beneficiados, representando aumento na produtividade de 6,8 % ($5,4 \text{ sc ha}^{-1}$) e de 11,6 % ($10,4 \text{ sc ha}^{-1}$) nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. A maior quantidade dos fertilizantes fosfatados

(Q150) resultou, de maneira geral, em maior produção de grãos (maduro e total) e de produtividade. A aplicação da UP em relação à UC, em geral, aumentou a produção total de grãos e produtividade na safra 2017/2018. A aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) em relação ao CONV resultou em maiores teores foliares de P em algumas fases fenológicas do cafeeiro. O uso dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada foi eficiente em aumentar a produtividade do cafeeiro. O aumento na quantidade dos fertilizantes fosfatados aplicados pode aumentar a produtividade de grãos beneficiados. A aplicação da UP combinada com os fertilizantes fosfatados pode resultar em maior produção total e produtividade de grãos no cafeeiro.

Palavras-chave: Fósforo, nitrogênio, tecnologia em fertilizantes, adubação, cafeicultura.

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura apresenta grande importância na economia brasileira, sendo a principal atividade agrícola no Estado do Espírito Santo. A estimativa da produção nacional de café da safra 2019 foi de 49,3 milhões de sacas beneficiadas, sendo o Estado do Espírito Santo o maior produtor de café conilon do Brasil, com estimativa de 10,5 milhões de sacas beneficiadas, o que representa 69,9 % da produção nacional de café conilon (Conab, 2019).

A cadeia produtiva do café conilon teve grandes avanços tecnológicos na última década, principalmente nas áreas de melhoramento genético, manejo dos cafezais e da irrigação, colheita, pós colheita e nutrição de plantas (Ferrão et al., 2017). Em relação à nutrição, as variedades de cafeeiro conilon cultivadas atualmente apresentam grande potencial produtivo, apresentando alta exigência nutricional (Bragança et al., 2017).

Dentre os nutrientes, o fósforo (P) e o nitrogênio (N) possuem grande importância para o cafeeiro (Partelli et al., 2014), sendo a disponibilidade desses nutrientes no solo um fator determinante na produtividade das plantas. Em geral, os solos brasileiros utilizados na agricultura são naturalmente pobres em nutrientes, havendo a necessidade da aplicação de fertilizantes para a manutenção ou aumento da produtividade das culturas (Fageria e Baligar, 2014; Correa et al., 2016).

Entretanto, a maioria dos fertilizantes fosfatados e nitrogenados aplicados nos solos apresentam baixa eficiência de uso, devido às perdas de P por adsorção, e N por volatilização e lixiviação (Ladha et al., 2005; Trenkel, 2010). Para minimizar essas perdas, é imprescindível a busca por tecnologias que aumentem a eficiência da adubação fosfatada e nitrogenada.

Nesse contexto, têm sido utilizados fertilizantes fosfatados e nitrogenados que contêm tecnologia agregada que possam aumentar a disponibilidade de P e N, quando comparados aos fertilizantes convencionais, como por exemplo os revestidos com polímeros e os misturados com material orgânico, sendo denominados nesse trabalho de fertilizantes com proteção integrada.

Estudando a eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados, Chagas et al. (2016) notaram que o superfosfato triplo revestido com polímeros promoveu maior crescimento e eficiência agrônômica do cafeeiro, em comparação ao superfosfato triplo sem revestimento. Teixeira et al. (2016) observaram que aplicação de fosfato monoamônico revestido com polímeros orgânicos apresentaram eficiência agrônômica variando de 3 a 13 % superior ao fosfato monoamônico sem revestimento.

Vários estudos foram realizados com intuito de avaliar os efeitos da aplicação dos fertilizantes com proteção integrada em diversas culturas, porém, informações sobre o comportamento desses fertilizantes no cafeeiro conilon ainda são escassas na literatura. Nesse sentido, objetivou-se nesse trabalho avaliar a produtividade e a nutrição do cafeeiro conilon a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados e nitrogenados com proteção integrada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em uma lavoura de café conilon (*Coffea canephora*) no interior do município de Jerônimo Monteiro (20°49'58" S e 41°24'51" W), região Sul do Estado do Espírito Santo. A altitude do local é de 330 m e o solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo de textura média, com relevo forte ondulado. O clima predominante da região, segundo a classificação de Koppen, é o Cwa, caracterizado pela distribuição irregular das chuvas ao longo do ano, com verões chuvosos e invernos secos.

Na tabela 1 estão apresentadas a precipitação pluviométrica (mm) e a temperatura média (°C) no município de Jerônimo Monteiro – ES durante as safras 2017/2018 e 2018/2019.

Tabela 1. Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média (°C) no município de Jerônimo Monteiro – ES durante as safras 2017/2018 e 2018/2019.

Mês/Ano	Saфра 2017/2018		Mês/Ano	Saфра 2018/2019	
	Precipitação pluviométrica	Temperatura média		Precipitação pluviométrica	Temperatura média
Jul/2017	27,4	19,4	Jul/2018	14,4	20,6
Ago/2017	5,6	20,7	Ago/2018	54,4	21,0
Set/2017	10,0	22,6	Set/2018	26,0	23,1
Out/2017	69,6	25,7	Out/2018	67,0	24,4
Nov/2017	240,8	24,2	Nov/2018	223,6	24,5
Dez/2017	181,8	25,7	Dez/2018	220,4	25,6
Jan/2018	104,8	27,7	Jan/2019	37,6	28,2
Fev/2018	130,8	25,9	Fev/2019	193,6	27,0
Mar/2018	240,2	26,0	Mar/2019	186,2	26,2
Abr/2018	187,8	23,5	Abr/2019	85,2	25,3
Mai/2018	50,8	21,6	Mai/2019	37,0	23,7
Jun/2018	23,4	21,5	Jun/2019	14,8	21,9

A lavoura cafeeira selecionada é composta por plantas da variedade clonal de café “Incaper 8142 - Conilon Vitória” plantadas em espaçamento de $2,5 \times 1,5$ m, com cinco anos de idade. Os 13 clones que compõem a variedade foram 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 experimento foi conduzido durante o período de julho de 2017 a junho de 2019 (safra 2017/2018 e 2018/2019).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2$, sendo os fatores: três fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - CONV; fosfato monoamônico convencional revestido com polímero - POL; e fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro - ORG); duas quantidades dos fertilizantes fosfatados (Q100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; Q150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado); e dois fertilizantes nitrogenados (ureia convencional - UC e ureia convencional recoberta com polímero - UP), 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 2017/2018 e 2018/2019 (Tabela 2). 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.

A adubação mineral de produção com N, P e potássio (K) nas safras 2017/2018 e 2018/2019 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, 75 e 340 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. A quantidade do fertilizante fosfatado referente a Q100 é de 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e para a Q150 é de 112,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Os fertilizantes fosfatados, nitrogenados e potássicos foram aplicados na superfície do solo na projeção da copa da planta de cafeeiro. A adubação fosfatada foi realizada em aplicação única, enquanto a adubação nitrogenada e potássica foi parcelada em três aplicações (intervalos de 45 dias), conforme Prezotti et al. (2007). Como fonte de K foi utilizado o cloreto de potássio. Os tratamentos fitossanitários foram realizados de acordo com a necessidade da cultura.

Tabela 2. Caracterização química do Argissolo Vermelho-Amarelo, na profundidade de 0,0 a 0,2 m, nas safras 2017/2018 e 2018/2019

Característica	2017/2018	2018/2019
Textura (g kg ⁻¹) ^{1/}		
Argila	270	-
Silte	61	-
Areia grossa	541	-
Areia fina	128	-
pH-H ₂ O ^{2/}	5,16	4,82
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{3/}	0,29	0,49
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{3/}	0,90	1,44
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{3/}	0,25	0,43
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{4/}	3,49	4,85
Na (mg dm ⁻³) ^{5/}	2,50	2,80
K (mg dm ⁻³) ^{5/}	49,40	179,60
P (mg dm ⁻³) ^{5/}	5,40	9,90
P-rem (mg L ⁻¹) ^{6/}	37,60	38,50

^{1/} Método da pipeta; ^{2/} Relação solo-água 1:2,5; ^{3/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ^{4/} Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0; ^{5/} Extrator Mehlich-1; ^{6/} Fósforo remanescente.

As coletas das folhas das plantas de café, para a avaliação do estado nutricional, foram realizadas nas fases fenológicas do cafeeiro (repouso e senescência; chumbinho e expansão dos frutos; granação e maturação dos frutos) durante as safras 2017/2018 e 2018/2019. Foram coletados os 3º e 4º pares de folhas de ramos produtivos localizados à meia altura das plantas úteis de cada unidade experimental (as quatro plantas centrais), um par de cada lado das plantas, para a determinação dos teores de N e P (Silva, 2009).

A colheita dos frutos de café foi realizada para determinação da produtividade de cada tratamento, iniciando-se quando 90 % dos frutos estavam maduros. Os frutos das quatro plantas centrais de cada tratamento foram colhidos, lavados e separados em grãos boia, verde e maduro e, em seguida, foram pesados individualmente. Foi retirada uma amostra simples de 0,5 kg de grãos maduros de cada planta para formar uma amostra composta de 2,0 kg por tratamento. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada a 45 °C até obter umidade entre 11 e 12 %, controladas através do medidor de umidade modelo G800 da Gehaka AGRI. Posteriormente, as amostras foram piladas e pesadas para obtenção da produtividade em sacas beneficiadas por hectare (sc ha⁻¹).

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o programa R (R Core Team, 2018) e os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 5 e 10 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produtividade do cafeeiro conilon

Nas duas safras do cafeeiro (2017/2108 e 2018/2019), em geral, as produtividades dos grãos beneficiados (Tabela 1) estão de acordo com valores da produtividade esperada (71 a 100 sc ha⁻¹), conforme a adubação mineral de produção com N, P e K realizada.

Tabela 1. Médias da produção de grãos (boia, verde, maduro e total) e produtividade (Prod.) do cafeeiro conilon nas safras 2017/2018 e 2018/2019, em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados e nitrogenados e das quantidades dos fertilizantes fosfatados

Fertilizante fosfatado	Quantidade fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Grãos (kg planta ⁻¹)				Prod. (sc ha ⁻¹)
			Boia	Verde	Maduro	Total	
----- Safra 2017/2018 -----							
CONV	Q100	UC	0,23	0,76	5,24	6,22	68,43
		UP	0,23	1,19	5,73	7,15	79,37
	Q150	UC	0,20	0,81	6,50	7,47	81,96
		UP	0,22	1,23	6,36	7,81	86,59
POL	Q100	UC	0,23	0,65	6,35	6,90	75,00
		UP	0,28	1,10	6,22	7,60	81,66
	Q150	UC	0,20	1,13	6,03	7,36	82,38
		UP	0,26	0,54	8,02	8,82	96,59
ORG	Q100	UC	0,17	0,79	5,79	6,75	72,95
		UP	0,35	0,74	6,94	8,04	87,90
	Q150	UC	0,24	0,91	6,50	7,61	82,20
		UP	0,19	1,42	7,18	8,79	96,99
----- Safra 2018/2019 -----							
CONV	Q100	UC	0,46	0,62	6,06	7,13	77,00
		UP	0,38	0,95	6,64	7,97	85,81
	Q150	UC	0,45	0,59	7,51	8,55	93,84
		UP	0,50	0,86	8,19	9,55	101,98
POL	Q100	UC	0,54	0,69	7,44	8,66	94,70
		UP	0,55	0,95	7,42	8,91	96,87
	Q150	UC	0,68	1,20	7,36	9,24	99,96
		UP	0,35	1,28	7,90	9,53	103,28
ORG	Q100	UC	0,55	1,06	7,46	9,06	97,57
		UP	0,73	0,85	7,99	9,56	102,93
	Q150	UC	0,42	1,08	7,62	9,12	100,93
		UP	0,43	1,04	7,95	9,42	104,38

CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; Q100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; Q150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado; UC = Ureia convencional; UP = ureia convencional recoberta com polímero.

Os resultados de produtividade obtidos em todos os tratamentos (Tabela 1) estão acima da produtividade média para o café conilon na safra 2017/2018 e 2018/2019 no Estado do Espírito Santo, que foi de 38,85 e de 43,41 sc ha⁻¹ (Conab, 2019), demonstrando a importância da adubação no aumento da produtividade do cafeeiro.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG), quando comparados ao CONV nas safras 2017/2018 e 2018/2019, apresentaram maior produção de grãos maduro e total, resultando em maior produtividade dos grãos beneficiados (C1, Tabela 2). Esses resultados podem estar relacionados aos revestimentos dos fertilizantes fosfatados, que podem ter diminuído as perdas de P por adsorção, promovendo assim maior disponibilidade deste nutriente, e assim, ter favorecido maior produtividade.

A maior eficiência dos fertilizantes com proteção integrada, como o POL e o ORG, pode ser atribuída ao revestimento dos grânulos desses fertilizantes, que impede o contato direto do P com os colóides do solo, reduzindo a intensidade de adsorção de P (Erro et al., 2012; Figueiredo et al., 2012), e com isso, pode ter aumentado a disponibilidade de P para o cafeeiro.

As produtividades médias dos grãos beneficiados nas safras 2017/2018 e 2018/2019 em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) foram de 84,46 e 100,08 sc ha⁻¹, enquanto a aplicação do CONV foi de 79,09 e 89,66 sc ha⁻¹, respectivamente. Isso demonstra que os fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) frente ao CONV aumentaram a produtividade em 6,79 e 11,62 % nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente.

Tabela 2. Contrastes ortogonais (C) da produção de grãos boia, verde, maduro e total (kg planta⁻¹) e produtividade dos grãos beneficiados (sc ha⁻¹), considerando os fertilizantes fosfatados independente das quantidades dos fertilizantes fosfatados e dos fertilizantes nitrogenados

C	Grãos boia	Grãos verde	Grãos maduro	Grãos total	Produtividade
----- Safra 2017/2018 -----					
C1	0,019 ^{ns}	-0,085 ^{ns}	0,674 [*]	0,572 [*]	5,368 [*]
C2	-0,006 ^{ns}	0,109 ^{ns}	-0,054 ^{ns}	0,124 ^{ns}	1,099 ^{ns}
----- Safra 2018/2019 -----					
C1	0,083 ^{ns}	0,264 [°]	0,542 [*]	0,888 [*]	10,418 [*]
C2	0,003 ^{ns}	-0,021 ^{ns}	0,223 ^{ns}	0,204 ^{ns}	2,749 ^{ns}

C1: CONV vs POL + ORG (2-, ++); C2: POL vs ORG (-, +); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente, e ^{ns} não significativo; CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

Os resultados encontrados corroboram os observados por Pelá et al. (2019) para as culturas do milho e da soja. Os autores observaram que o fosfato monoamônico revestido com polímeros comparado ao fosfato monoamônico sem revestimento proporcionou aumento de 30,2 % (11.367 kg ha⁻¹) e de 21,1 % (3.595 kg ha⁻¹) na produtividade da cultura do milho e da soja, respectivamente.

Avaliando a produtividade de grãos de milho em resposta à adubação fosfatada, Grohskopf et al. (2019) também encontraram aumento na produtividade com a aplicação de fertilizante fosfatado com proteção integrada. Os autores observaram que o fosfato monoamônico misturado com cama de aves proporcionou maior produtividade de milho nos três anos de cultivo, apresentando eficiência agrônômica 20 % superior ao do fertilizante convencional.

Ao comparar os fertilizantes fosfatados com proteção integrada entre si nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, nota-se que não houve diferenças estatísticas entre o POL e o ORG para as variáveis analisadas (C2, Tabela 2). Mesmo não apresentando diferenças entre si, a aplicação desses fertilizantes proporcionou elevadas produtividades em relação à produtividade média para o café conilon no Estado do Espírito Santo nas safras 2017/2018 e 2018/2019 (Conab, 2019).

Alguns trabalhos também apresentaram resultados positivos sobre a utilização dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada em culturas como milho (Almeida et al., 2016), soja (Guareschi et al., 2011), cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2014), cevada (Pauly et al., 2002) e alface (Chagas et al., 2015).

As quantidades dos fertilizantes fosfatados foram avaliadas pelo contraste C3 (Tabela 3). Dentro do CONV, na primeira (2017/2018) e na segunda (2018/2019) safra, o aumento da quantidade do fertilizante fosfatado (Q150) proporcionou valores superiores de produção de grãos (maduro e total) e de produtividade em relação à menor quantidade do fertilizante fosfatado (Q100). Isso representou aumentos na produtividade de 14,1 % na safra 2017/2018 e de 20,3 % na safra 2018/2019 quando aplicado a Q150 (Tabela 1).

Avaliando a produtividade do cafeeiro em resposta a aplicações anuais de superfosfato triplo (0, 50, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅), Reis et al. (2011) também verificaram incremento na produtividade do cafeeiro com o aumento das doses de P. Os autores observaram aumento de 138 % na produtividade (125,7 sacas ha⁻¹) com a aplicação da dose de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em comparação ao controle sem P (50,7 sacas ha⁻¹).

Tabela 3. Contraste ortogonal (C) da produção de grãos boia, verde, maduro e total (kg planta⁻¹) e da produtividade dos grãos beneficiados (sc ha⁻¹), considerando as quantidades dos fertilizantes fosfatados dentro dos fertilizantes fosfatados, independente dos fertilizantes nitrogenados

C	Fertilizante fosfatado	Grãos boia	Grãos verde	Grãos maduro	Grãos total	Produtividade
----- Safra 2017/2018 -----						
C3	CONV	-0,014 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,945 [*]	0,953 [*]	10,376 [*]
	POL	-0,023 ^{ns}	-0,045 ^{ns}	0,738 [°]	0,838 [*]	11,153 [*]
	ORG	-0,046 ^{ns}	0,398 [*]	0,472 ^{ns}	0,807 [*]	9,170 [*]
----- Safra 2018/2019 -----						
C3	CONV	0,052 ^{ns}	-0,054 ^{ns}	1,501 [*]	1,499 [*]	16,504 [*]
	POL	-0,027 ^{ns}	0,421 [°]	0,206 ^{ns}	0,600 [°]	5,835 ^{ns}
	ORG	-0,213 [°]	0,104 ^{ns}	0,064 ^{ns}	-0,045 ^{ns}	2,407 ^{ns}

C3: 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado vs 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado /fertilizante fosfatado (-, +); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente, e ^{ns} não significativo; CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

Comparando as quantidades dos fertilizantes fosfatados aplicados (Q150 vs Q100) no POL e no ORG na primeira safra (2017/2018), a Q150 resultou em maior produtividade para ambos os fertilizantes (C3, Tabela 3). No entanto, na safra seguinte (2018/2019) não ocorreram diferenças nas produtividades entre as quantidades dos fertilizantes fosfatados no POL e no ORG (C3, Tabela 3). Isso pode estar relacionado às tecnologias aplicadas nesses fertilizantes, que podem ter proporcionado aproveitamento de P pelas plantas do cafeeiro semelhante para as duas quantidades dos fertilizantes fosfatados aplicadas na segunda safra. Assim, a aplicação desses fertilizantes durante várias safras pode resultar em produtividades satisfatórias mesmo com a menor quantidade desses fertilizantes.

Avaliando o crescimento inicial de cafeeiro, Chagas et al. (2016) notaram que o incremento das doses de P utilizando superfosfato triplo convencional resultaram em maior área foliar, porém, a maior dose do superfosfato triplo revestido com polímero não proporcionou o maior valor de área foliar. Esse comportamento ocorreu para a produção de grãos (maduro e total) e de produtividade neste trabalho, em que, a maior quantidade do CONV aplicada aumentou essas variáveis nas duas safras avaliadas, e para o POL e o ORG, a maior quantidade desses fertilizantes resultou em aumento dessas variáveis

apenas na primeira safra, mostrando que a liberação de P dos fertilizantes com proteção integrada influenciou nas variáveis analisadas.

Analisando as tecnologias dos fertilizantes nitrogenados entre si pelo contraste C4 (Tabela 4) dentro de cada fertilizante fosfatado, verifica-se, de modo geral, que o uso da UP combinada com os fertilizantes fosfatados proporcionou valores superiores para a produção total de grãos e produtividade em relação a UC na safra 2017/2018. Na safra seguinte (2018/2019), a UP proporcionou aumento percentual na produção total de grãos (6,14 %) e na produtividade (5,54 %) em relação a UC (Tabela 1), no entanto, os resultados não apresentaram diferenças estatísticas (C4, Tabela 4).

Tabela 4. Contraste ortogonal (C) da produção de grãos boia, verde, maduro e total (kg planta⁻¹) e da produtividade dos grãos beneficiados (sc ha⁻¹), considerando os fertilizantes nitrogenados dentro dos fertilizantes fosfatados e das quantidades dos fertilizantes fosfatados

C	Fertilizante fosfatado	Quantidade fertilizante fosfatado	Grãos (kg planta ⁻¹)				Prod.
			Boia	Verde	Maduro	Total	
			----- Safra 2017/2018 -----				
CONV		Q100	-0,002 ^{ns}	0,439 [°]	0,486 ^{ns}	0,923 [*]	10,934 [°]
		Q150	0,024 ^{ns}	0,422 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	0,342 ^{ns}	4,638 ^{ns}
POL		Q100	0,043 ^{ns}	0,452 [°]	-0,130 ^{ns}	0,698 ^{ns}	6,663 [°]
		Q150	0,054 ^{ns}	-0,596 [*]	1,995 [*]	1,453 [*]	14,206 [*]
ORG		Q100	0,182 [*]	-0,046 ^{ns}	1,150 [*]	1,286 [*]	14,951 [*]
		Q150	-0,044 ^{ns}	0,508 [°]	0,680 ^{ns}	1,177 [*]	14,792 [*]
C4			----- Safra 2018/2019 -----				
CONV		Q100	-0,078 ^{ns}	0,330 ^{ns}	0,584 ^{ns}	0,837 [°]	8,807 [°]
		Q150	0,050 ^{ns}	0,267 ^{ns}	0,678 ^{ns}	0,996 [*]	8,144 ^{ns}
POL		Q100	0,008 ^{ns}	0,263 ^{ns}	-0,024 ^{ns}	0,247 ^{ns}	2,173 ^{ns}
		Q150	-0,329 [°]	0,075 ^{ns}	0,538 ^{ns}	0,284 ^{ns}	3,320 ^{ns}
ORG		Q100	0,183 ^{ns}	-0,217 ^{ns}	0,532 ^{ns}	0,498 ^{ns}	5,364 ^{ns}
		Q150	0,015 ^{ns}	-0,042 ^{ns}	0,321 ^{ns}	0,293 ^{ns}	3,449 ^{ns}

C4: Ureia convencional vs ureia convencional recoberta com polímero /fertilizante fosfatado/Quantidade do fertilizante fosfatado (-, +); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente, e ^{ns} não significativo; CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; Q100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; Q150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado.

As maiores produtividades observadas pelo uso da UP podem estar relacionadas ao uso de polímeros como revestimento de grânulos de ureia, que reduz o contato da ureia no interior do grânulo revestido com a umidade do solo, proporcionando diminuição na dissolução e nas perdas por volatilização (Nascimento et al., 2013; Chagas et al., 2016b), e com isso, pode ter favorecido as maiores produtividades do cafeeiro.

Avaliando a produtividade de grãos de milho, Martins et al. (2014) verificaram que a aplicação da ureia revestida por polímeros comparada a ureia sem revestimento proporcionou maior produtividade de grãos quando aplicada à superfície do solo em período de veranico. No entanto, quando aplicada à superfície do solo em período com chuvas, a ureia revestida por polímeros não apresentou diferenças em relação a ureia sem revestimento.

3.2. Nutrição do cafeeiro conilon

Os teores foliares de P e N obtidos em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados e nitrogenados durante as duas safras do cafeeiro variaram, respectivamente, de 0,77 a 1,54 g kg⁻¹ e de 21,93 a 31,45 g kg⁻¹ (Tabela 5). De maneira geral, esses valores estão próximos dos considerados adequados para o cafeeiro em produção, conforme os autores Malavolta et al. (1997), Raij et al. (1996) e Prezotti et al. (2007). Para esses autores, os teores adequados de P e N nas folhas do cafeeiro em produção variam de 1,2 a 2,0 g kg⁻¹ e de 26 a 32 g kg⁻¹, respectivamente.

A aplicação dos fertilizantes fosfatados com proteção integrada (POL + ORG) quando comparada ao CONV resultou em maiores teores foliares de P nas fases fenológicas de repouso e senescência na safra 2017/2018 e de chumbinho e granação na safra 2018/2019 (C1, Tabela 6). Para os teores foliares de N, não ocorreram diferenças do POL + ORG em relação ao CONV (C1, Tabela 6).

Os melhores resultados dos teores foliares de P obtidos com os fertilizantes fosfatados com proteção integrada podem estar associados à sua maior eficiência, devido à redução no contato direto do P desses fertilizantes com os colóides do solo, reduzindo a adsorção de P (Machado et al., 2011). Dessa forma, esse nutriente foi melhor aproveitado pelas plantas do cafeeiro, resultando em maiores teores foliares de P.

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada comparados pelo contraste 2 (Tabela 6) nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, não apresentaram diferenças estatísticas para os teores foliares de P e N.

Tabela 5. Teores foliares médios (g kg^{-1}) de fósforo (P) e nitrogênio (N) do cafeeiro conilon nas fases fenológicas nas safras 2017/2018 e 2018/2019 em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados (FP) e nitrogenados (FN) e da quantidade do fertilizante fosfatado (QP)

FP	QP	FN	Fases fenológicas							
			Repouso e senescência		Chumbinho e expansão		Granação dos frutos		Maturação dos frutos	
			P	N	P	N	P	N	P	N
			Ago/2017		Nov/2017		Fev/2018		Mai/2018	
CONV	100	UC	0,78	23,43	1,26	29,12	1,11	30,24	1,23	22,03
		UP	0,77	24,20	1,19	31,45	1,18	30,99	1,25	24,73
	150	UC	0,79	24,45	1,20	30,05	1,18	29,87	1,30	22,12
		UP	0,86	24,08	1,27	30,63	1,14	30,96	1,37	23,33
POL	100	UC	0,95	23,43	1,04	27,53	1,14	28,47	1,29	23,71
		UP	0,94	24,22	1,26	29,68	1,16	30,43	1,30	25,20
	150	UC	0,90	23,85	1,23	30,05	1,23	29,40	1,22	22,87
		UP	0,95	24,27	1,33	29,49	1,20	30,99	1,32	23,61
ORG	100	UC	0,82	23,75	1,08	28,93	1,23	29,87	1,21	22,49
		UP	0,85	24,45	1,16	29,96	1,17	29,49	1,22	23,71
	150	UC	0,96	24,83	1,22	30,33	1,21	30,99	1,21	23,24
		UP	1,03	24,73	1,29	30,61	1,24	30,15	1,37	21,93
			Ago/2018		Nov/2018		Fev/2019		Mai/2019	
CONV	100	UC	1,11	24,55	1,19	28,28	0,98	26,88	1,16	27,16
		UP	1,09	26,41	1,19	29,21	1,09	26,97	1,18	28,09
	150	UC	1,28	25,29	1,35	28,75	1,05	25,20	1,16	26,69
		UP	1,16	27,07	1,41	30,05	1,04	25,76	1,19	27,25
POL	100	UC	1,02	25,20	1,31	28,47	1,08	26,32	1,20	26,79
		UP	1,11	27,44	1,40	29,68	1,00	26,23	1,19	28,47
	150	UC	1,11	26,23	1,25	30,61	0,95	25,20	1,16	26,41
		UP	1,15	26,97	1,47	31,45	1,01	26,32	1,19	27,53
ORG	100	UC	1,06	25,48	1,37	29,49	0,97	25,01	1,19	25,95
		UP	1,17	25,76	1,31	29,21	1,01	26,88	1,15	27,63
	150	UC	1,21	25,85	1,41	28,93	1,02	27,07	1,16	27,25
		UP	1,15	26,32	1,54	29,87	1,04	27,35	1,20	26,60

CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; UC = Ureia convencional; UP = ureia convencional recoberta com polímero; QP100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; QP150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado.

Tabela 6. Contrastes ortogonais (C) dos teores foliares (g kg^{-1}) de fósforo (P) e nitrogênio (N) do cafeeiro conilon nas fases fenológicas, considerando os fertilizantes fosfatados independente da quantidade do fertilizante fosfatado e dos fertilizantes nitrogenados

C	Fases fenológicas							
	Repouso e senescência		Chumbinho e expansão		Granação dos frutos		Maturação dos frutos	
	P	N	P	N	P	N	P	N
	Ago/2017		Nov/2017		Fev/2018		Mai/2018	
C1	0,124*	0,151 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,738 ^{ns}	0,046 ^{ns}	-0,542 ^{ns}	-0,022 ^{ns}	0,291 ^{ns}
C2	-0,020 ^{ns}	0,502 ^{ns}	-0,026 ^{ns}	0,770 ^{ns}	0,030 ^{ns}	0,303 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-1,003 ^{ns}
	Ago/2018		Nov/2018		Fev/2019		Mai/2019	
	C1	-0,037 ^{ns}	0,327 ^{ns}	0,093*	0,642 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	0,093 ^{ns}	0,006 ^{ns}
C2	0,052 ^{ns}	-0,607 ^{ns}	0,049 ^{ns}	-0,678 ^{ns}	-0,003 ^{ns}	0,560 ^{ns}	-0,011 ^{ns}	-0,443 ^{ns}

C1: CONV vs POL + ORG (2-, ++); C2: POL vs ORG (-, +); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente; e ^{ns} não significativo. CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro.

Analisando quantidades dos fertilizantes fosfatados pelo contraste C3 (Tabela 7), observa-se que a maior quantidade do CONV, do POL e do ORG resultou em maiores teores foliares de P em algumas coletas de folhas do cafeeiro comparada a menor quantidade desses fertilizantes. Esse comportamento corrobora com os resultados encontrados por Reis et al. (2013) e Dias et al. (2015) na cultura do cafeeiro, que observaram maiores teores foliares de P com o aumento das doses de P.

Comparando-se as tecnologias dos fertilizantes nitrogenados (UC vs UP) dentro de cada fertilizante fosfatado e da quantidade do fertilizante fosfatado (C4, Tabela 8), nota-se que o uso da UP combinada com os fertilizantes fosfatados proporcionou valores superiores dos teores foliares de N e P em algumas coletas.

Maiores teores foliares de N com a aplicação de ureia revestida com polímeros também foram observadas por Frazão et al. (2014) em experimento com a cultura do milho. No entanto, Valderrama et al. (2011) e Maestrello et al. (2014), comparando ureia convencional e revestida com polímeros não observaram diferenças nos teores foliares de N na cultura do milho.

Tabela 7. Contraste ortogonal (C) dos teores foliares (g kg⁻¹) de fósforo (P) e nitrogênio (N) do cafeeiro conilon nas fases fenológicas, considerando a quantidade do fertilizante fosfatado dentro dos fertilizantes fosfatados

Fases fenológicas	C3					
	CONV		POL		ORG	
	P	N	P	N	P	N
Ago/2017 ¹	0,050 ^{ns}	0,453 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	0,233 ^{ns}	0,162*	0,677 ^{ns}
Nov/2017 ²	0,012 ^{ns}	0,053 ^{ns}	0,132*	1,167 ^{ns}	0,133*	1,027 ^{ns}
Fev/2018 ³	0,018 ^{ns}	-0,200 ^{ns}	0,070 ^{ns}	0,747 ^{ns}	0,030 ^{ns}	0,887 ^{ns}
Mai/2018 ⁴	0,093 ^{ns}	-0,653 ^{ns}	-0,022 ^{ns}	-1,213 ^{ns}	0,072 ^{ns}	-0,513 ^{ns}
Ago/2018 ¹	0,120°	0,700 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,280 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,474 ^{ns}
Nov/2018 ²	0,193*	0,653 ^{ns}	0,003 ^{ns}	1,960*	0,132*	0,047 ^{ns}
Fev/2019 ³	0,010 ^{ns}	-1,447°	-0,057 ^{ns}	-0,513 ^{ns}	0,037 ^{ns}	1,260 ^{ns}
Mai/2019 ⁴	0,002 ^{ns}	-0,653 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,653 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,140 ^{ns}

C3: 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado vs 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado /fertilizante fosfatado (-, +); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente e ^{ns} não significativo; CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; ¹Repouso e senescência, ²Chumbinho e expansão, ³Granação dos frutos e ⁴Maturação dos frutos.

Tabela 8. Contraste ortogonal (C) dos teores foliares (g kg⁻¹) de fósforo (P) e nitrogênio (N) do cafeeiro conilon nas fases fenológicas, considerando os fertilizantes nitrogenados dentro dos fertilizantes fosfatados e das quantidades do fertilizante fosfatado (QP)

C	Fases fenológicas	QP	CONV		POL		ORG	
			P	N	P	N	P	N
C4	Ago/2017 ¹	100 %	0,003 ^{ns}	-0,773 ^{ns}	0,017 ^{ns}	-0,793 ^{ns}	-0,033 ^{ns}	-0,700 ^{ns}
		150 %	-0,070 ^{ns}	0,373 ^{ns}	-0,047 ^{ns}	-0,420 ^{ns}	-0,077 ^{ns}	0,093 ^{ns}
	Nov/2017 ²	100 %	0,080 ^{ns}	-2,333°	-0,223*	-2,147°	-0,083 ^{ns}	-1,027 ^{ns}
		150 %	-0,063 ^{ns}	-0,573 ^{ns}	-0,100 ^{ns}	0,560 ^{ns}	-0,077 ^{ns}	-0,280 ^{ns}
	Fev/2018 ³	100 %	-0,073 ^{ns}	-0,747 ^{ns}	-0,017 ^{ns}	-1,960 ^{ns}	0,057 ^{ns}	0,373 ^{ns}
		150 %	0,037 ^{ns}	-1,093 ^{ns}	0,037 ^{ns}	-1,587 ^{ns}	-0,030 ^{ns}	0,840 ^{ns}
	Mai/2018 ⁴	100 %	-0,027 ^{ns}	-2,707*	-0,013 ^{ns}	-1,493 ^{ns}	-0,010 ^{ns}	-1,213 ^{ns}
		150 %	-0,067 ^{ns}	-1,213 ^{ns}	-0,103 ^{ns}	-0,747 ^{ns}	-0,153°	1,307 ^{ns}
	Ago/2018 ¹	100 %	0,023 ^{ns}	-1,867 ^{ns}	-0,093 ^{ns}	-2,240°	-0,103 ^{ns}	-0,280 ^{ns}
		150 %	0,110 ^{ns}	-1,773 ^{ns}	-0,050 ^{ns}	-0,747 ^{ns}	0,060 ^{ns}	-0,467 ^{ns}
	Nov/2018 ²	100 %	0,007 ^{ns}	-0,933 ^{ns}	-0,093 ^{ns}	-1,213 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,280 ^{ns}
		150 %	-0,060 ^{ns}	-1,307 ^{ns}	-0,220*	-0,840 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,933 ^{ns}
	Fev/2019 ³	100 %	-0,110 ^{ns}	-0,093 ^{ns}	0,077 ^{ns}	0,093 ^{ns}	-0,037 ^{ns}	-1,867 ^{ns}
		150 %	0,010 ^{ns}	-0,560 ^{ns}	-0,057 ^{ns}	-1,120 ^{ns}	-0,017 ^{ns}	-0,280 ^{ns}
	Mai/2019 ⁴	100 %	-0,013 ^{ns}	-0,933 ^{ns}	0,013 ^{ns}	-1,680 ^{ns}	0,043 ^{ns}	-1,680 ^{ns}
		150 %	-0,037 ^{ns}	-0,560 ^{ns}	-0,023 ^{ns}	-1,120 ^{ns}	-0,040 ^{ns}	0,653 ^{ns}

C4: UC vs UP /fertilizante fosfatado/quantidade do fertilizante fosfatado (+,-); * e ° significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente; e ^{ns} não significativo. UC = Ureia convencional; UP = ureia convencional recoberta com polímero; CONV = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico convencional revestido com polímero; ORG = fosfato monoamônico convencional peletizado com torta de filtro; QP100 = 100 % da quantidade do fertilizante fosfatado; QP150 = 150 % da quantidade do fertilizante fosfatado; ¹Repouso e senescência, ²Chumbinho e expansão, ³Granação dos frutos e ⁴Maturação dos frutos.

4. CONCLUSÃO

Os fertilizantes fosfatados com proteção integrada foram eficientes no aumento da produtividade do cafeeiro quando comparados ao fosfato monoamônico convencional. Em geral, também resultou em maiores teores foliares de P.

O aumento na quantidade dos fertilizantes fosfatados aplicados, em geral, proporcionou maior produção de grãos (maduro e total), de produtividade de grãos beneficiados e nos teores foliares de P.

O uso da ureia revestida com polímeros combinada com os fertilizantes fosfatados resultou em maior produção total e produtividade de grãos no cafeeiro, bem como em aumento nos teores foliares de N.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida T, Pocojeski E, Nesi CN, Oliveira JPM, Silva LS. Eficiência de fertilizante fosfatado protegido na cultura do milho. *Scientia Agraria*. 2016;17:29–35.
- Alvarez V VH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*; 2006.
- Bragança SM, Prezotti LC, Lani JA. Nutrição do Cafeeiro Conilon. In: Ferrão RG, Fonseca AFA, Ferrão MAG, Muner LH (org). *Café Conilon*. 2ª. Vitória: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, 2017. p. 326-345
- Chagas WFT, Emrich EB, Guelfi DR, Caputo ALC, Faquin V. Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. *Revista Ciência Agronômica*. 2015;46:266–276.
- Chagas WFT, Guelfi DR, Caputo ALC, Dominghetti AW, Faquin V, Lopes RM, Chagas RMR. Eficiência agronômica do superfosfato triplo por polímeros no crescimento inicial do cafeeiro. *Coffee Science*. 2016a;11:426–434.
- Chagas WFT, Guelfi DR, Caputo ALC, Souza TL, Andrade AB, Faquin V. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. *Ciência e Agrotecnologia*. 2016b;40:497–509.
- Companhia Nacional de abastecimento – Conab. Acompanhamento da safra brasileira: café, v.5 – Safra 2019, n. 4 – quarto levantamento, Brasília, dez. 2019. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>. Acesso em: 02 jan. 2020.
- Corrêa JC, Grohskopf MA, Nicoloso RS, Lourenço KS, Martini R. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. *Pesqui Agropecuária Bras*. 2016;51:916–924.
- Dias KGL, Furtini Neto AE, Guimarães PTG, Reis THP, Oliveira CHC. Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels. *Ciência e Agrotecnologia*. 2015;39:110–120.
- Erro J, Urrutia O, Baigorri R, Aparicio-Tejo P, Irigoyen I, Storino F, Mandado M, Yvin JC, Garcia-Mina JM. Organic Complexed Superphosphates (CSP): Physicochemical characterization and agronomical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60:2008–2017.
- Fageria NK, Baligar VC. Macronutrient-use efficiency and changes in chemical properties of an Oxisol as influenced by phosphorus fertilization and tropical

- cover crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014;45:1227–1246.
- Ferrão RG, Fonseca AFA, Ferrão MAG, Muner LH. *Café Conilon*. 2. ed. Vitória, ES: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural; 2017.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43:446–452.
- Frazão JJ, Silva AR, Silva VL, Oliveira VA, Corrêa RS. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2014;18:1262–1267.
- Grohskopf MA, Corrêa JC, Fernandes DM, Benites VM, Teixeira PC, Cruz CV. Phosphate fertilization with organomineral fertilizer on corn crops on a Rhodic Khandiudox with a high phosphorus content. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2019;54:e00434.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011;35:643–648.
- Ladha JK, Pathak H, Krupnik TJ, Six J, Van Kessel C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*. 2005;87:85–156.
- Machado VJ, Souza CHE, Andrade BB, Lana RMQ, Korndorfer GH. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. *Bioscience Journal*. 2011;27:70–76.
- Maestrello PR, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Garcia CMP, Rodrigues MAC, Lino ACM, Andreotti M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência Agrária*. 2014;9:192–199.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Fosfato, 1997.
- Martins IS, Cazetta JO, Fukuda AJF. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2014;44:271–279.

- Nascimento CAC, Vitti GC, Faria LA, Luz PHC, Mendes FL. Ammonia volatilization from coated urea forms. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2013;37:1057–1063.
- Partelli FL, Espindula MC, Marré WB, Vieira HD. Dry matter and macronutrient accumulation in fruits of Conilon coffee with different ripening cycles. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014;38:214–222.
- Pauly DG, Nyborg M, Malhi SS. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. *Canadian Journal of Soil Science*. 2002;82:201–210.
- Pelá A, Bento RU, Crispim LBR, Reis Junior RA. Enhanced efficiency of phosphorus fertilizer in soybean and maize. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13:1638–1642.
- Prezotti LC, 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, 2007.
- Raij B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, 1996.
- R Core Team. A language and environment for statistical computing. 2018.
- Reis THP, Furtini Neto AE, Guimarães PTG, Guerra AF, Oliveira CHC. Estado nutricional e frações foliares de P no cafeeiro em função da adubação fosfatada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48:765–773.
- Reis THP, Guimarães PTG, Furtini Neto AE, Guerra AF, Curi N. Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2011;35:503–515.
- Silva FC. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.
- Teixeira PC, Donagemma, Guilherme Kangussu, Fontana A, Teixeira, Wenceslau Geraldes. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª ed. Embrapa Solos; 2017.
- Teixeira RS, Silva IR, Sousa RN, Mattiello EM, Soares EMB. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16:1097–1112.
- Teixeira WG, Sousa RTX, Korndörfer GH. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. *Bioscience Journal*. 2014;30:1729–1736.

Trenkel ME. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. 2nd ed. Paris: International fertilizer industry association (IFA); 2010.

Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Teixeira Filho MCM. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. Pesquisa Agropecuária Tropical. 2011;41:254-263.

APÊNDICE

Tabela 1A. Análise de variância dos grãos boia (GB), verde (GV), maduro (GM), total (GT) e produtividade (Prod) em função da aplicação de fertilizantes fosfatados considerando as quantidades dos fertilizantes fosfatados e os fertilizantes nitrogenados

Fonte de variação	GL	Quadrado médio									
		GB	GV	GM	GT	Prod	GB	GV	GM	GT	Prod
		Safrá 2017/2018					Safrá 2018/2019				
FP	2	0,001	0,064	1,823*	1,355*	118,899°	0,027	0,280	1,324°	3,280*	456,819
QP/FP1	1	0,001	0,005	2,676*	2,724*	322,974*	0,008	0,009	6,671*	6,740*	817,097*
QP/FP2	1	0,002	0,006	1,635°	2,104*	373,168*	0,002	0,532°	0,127	1,079°	102,136
QP/FP3	1	0,006	0,474*	0,668	1,955*	252,248*	0,136°	0,033	0,013	0,006	17,386
FN/FP1/QP1	1	0,000	0,289	0,354	1,277*	179,318°	0,009	0,164	0,512	1,051°	116,354°
FN/FP1/QP2	1	0,001	0,267	0,031	0,176	32,267	0,004	0,107	0,690	1,488°	99,479
FN/FP2/QP1	1	0,003	0,306°	0,025	0,732	66,593	0,000	0,104	0,001	0,092	7,081
FN/FP2/QP2	1	0,004	0,533*	5,970*	3,168*	302,701*	0,163°	0,009	0,434	0,121	16,537
FN/FP3/QP1	1	0,050*	0,003	1,984*	2,481*	335,299*	0,050	0,070	0,424	0,372	43,159
FN/FP3/QP2	1	0,003	0,387°	0,694	2,077*	328,190*	0,000	0,003	0,154	0,129	17,847
Resíduo	22	0,006	0,095	0,454	0,294	42,684	0,045	0,153	0,414	0,348	37,132
CV (%)		31,88	32,81	10,52	7,19	7,90	42,38	42,12	8,63	6,63	6,31

FP = fertilizante fosfatado; QP = quantidades dos fertilizantes fosfatados; FN = fertilizantes nitrogenados; * e ° significativo a 5 e 10 % pelo teste F, respectivamente.

Tabela 2A. Análise de variância dos teores foliares de P e N nas fases fenológicas do cafeeiro em função da aplicação de fertilizantes fosfatados considerando as quantidades dos fertilizantes fosfatados e os fertilizantes nitrogenados

Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		Safrá 2017/2018		Safrá 2018/2019	
		P	N	P	N
FP/Coleta folhas 1	2	0,062*	0,8460	0,0134	1,5310
FP/Coleta folhas 2	2	0,0051	3,9592	0,0418*	3,0206
FP/Coleta folhas 3	2	0,0111	1,4496	0,0032	0,9756
FP/Coleta folhas 4	2	0,0043	3,3603	0,0005	0,7862
QP/FP1/Coleta folhas 1	1	0,0075	0,6165	0,0432°	1,4700
QP/FP1/Coleta folhas 2	1	0,0004	0,0085	0,1121*	1,2805
QP/FP1/Coleta folhas 3	1	0,0010	0,1200	0,0003	6,2785°
QP/FP1/Coleta folhas 4	1	0,0261	1,2805	0,0000	1,2805
QP/FP2/Coleta folhas 1	1	0,0024	0,1633	0,0127	0,2352
QP/FP2/Coleta folhas 2	1	0,0520*	4,0833	0,0000	11,5248*
QP/FP2/Coleta folhas 3	1	0,0147	1,6725	0,0096	0,7905
QP/FP2/Coleta folhas 4	1	0,0014	4,4165	0,0024	1,2805
QP/FP3/Coleta folhas 1	1	0,0784*	1,3736	0,0127	0,6533
QP/FP3/Coleta folhas 2	1	0,0533*	3,1621	0,0520*	0,0065
QP/FP3/Coleta folhas 3	1	0,0027	2,3585	0,0040	4,7628
QP/FP3/Coleta folhas 4	1	0,0154	0,7905	0,0001	0,0588
FN/FP1/QP1/Coleta folhas 1	1	0,0000	0,8971	0,0008	5,2267
FN/FP1/QP1/Coleta folhas 2	1	0,0096	8,1667°	0,0001	1,3067
FN/FP1/QP1/Coleta folhas 3	1	0,0081	0,8363	0,0182	0,0131
FN/FP1/QP1/Coleta folhas 4	1	0,0011	10,9891*	0,0003	1,3067
FN/FP1/QP2/Coleta folhas 1	1	0,0074	0,2091	0,0182	4,7171
FN/FP1/QP2/Coleta folhas 2	1	0,0061	0,4931	0,0054	2,5611
FN/FP1/QP2/Coleta folhas 3	1	0,0020	1,7931	0,0002	0,4704
FN/FP1/QP2/Coleta folhas 4	1	0,0067	2,2083	0,0020	0,4704
FN/FP2/QP1/Coleta folhas 1	1	0,0004	0,9441	0,0131	7,5264°
FN/FP2/QP1/Coleta folhas 2	1	0,0748*	6,9123°	0,0131	2,2083
FN/FP2/QP1/Coleta folhas 3	1	0,0004	5,7624	0,0088	0,0131
FN/FP2/QP1/Coleta folhas 4	1	0,0003	3,3451	0,0003	4,2336
FN/FP2/QP2/Coleta folhas 1	1	0,0033	0,2646	0,0038	0,8363
FN/FP2/QP2/Coleta folhas 2	1	0,0150	0,4704	0,0726*	1,0584
FN/FP2/QP2/Coleta folhas 3	1	0,0020	3,7763	0,0048	1,8816
FN/FP2/QP2/Coleta folhas 4	1	0,0160	0,8363	0,0008	1,8816
FN/FP3/QP1/Coleta folhas 1	1	0,0017	0,7350	0,0160	0,1176
FN/FP3/QP1/Coleta folhas 2	1	0,0104	1,5811	0,0060	0,1176
FN/FP3/QP1/Coleta folhas 3	1	0,0048	0,2091	0,0020	5,2267
FN/FP3/QP1/Coleta folhas 4	1	0,0002	2,2083	0,0028	4,2336
FN/FP3/QP2/Coleta folhas 1	1	0,0088	0,0131	0,0054	0,326667
FN/FP3/QP2/Coleta folhas 2	1	0,0088	0,1176	0,0267	1,3067
FN/FP3/QP2/Coleta folhas 3	1	0,0014	1,0584	0,0004	0,117600
FN/FP3/QP2/Coleta folhas 4	1	0,0353	2,5611	0,0024	0,6403
Resíduo	94	0,0096	2,3944	0,0131	1,9676
CV (%)		8,59	5,77	9,77	5,15

FP = fertilizante fosfatado; QP = quantidades dos fertilizantes fosfatados; FN = fertilizantes nitrogenados; Coleta folhas 1 = Repouso e senescência; Coleta folhas 2 = Chumbinho e expansão; Coleta folhas 3 = Granação dos frutos; Coleta folhas 4 = Maturação dos frutos* e ° significativo a 5 e 10 % pelo teste F, respectivamente.