

Difusão de fósforo no solo a partir de fertilizantes fosfatados coganulados com óxido de grafeno

Phosphorus Diffusion in Soil from Phosphate Fertilizers Co-Granulated with Graphene Oxide

PEDRO PAULO ANDRADE DE SOUZA MELO

Discente de Agronomia (UNIPAM)
pedropasmelo@unipam.edu.br

VICTOR GUSTAVO SOARES RIBEIRO

Bacharel em Agronomia
victorgustavo.sr@gmail.com

SANDRA LÚCIA NOGUEIRA

Professora orientadora (UNIPAM)
sandrln@unipam.edu.br

Resumo: Na agricultura, a produtividade das culturas é afetada por doenças, mudanças climáticas, baixa eficiência dos fertilizantes e da fertilidade do solo. Um dos principais desafios no cerrado brasileiro é a baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos, que são altamente intemperizados e possuem baixa fertilidade natural. Assim, tecnologias emergentes têm sido exploradas para aumentar a eficiência da adubação, como o uso de polímeros associados. Nanocompósitos de carbono, como o grafeno e o óxido de grafeno (OG), estão sendo estudados visto sua alta capacidade de sorção e de carrear nutrientes, além de conferir dureza aos grânulos de fertilizante. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a zona de difusão de fertilizantes fosfatados coganulados com óxido de grafeno em Latossolo Vermelho Argiloso, utilizando o método do papel filtro impregnado com óxido de Fe. O experimento foi montado em DBC. Foram formulados fertilizantes que continham 0, 0,5, 1,0, 1,5 e 0,06% de óxido de grafeno. O fertilizante com 0,06% de OG recebeu a mesma porcentagem do polímero Avail®. Após tratados e colocados em contato com a placa de petri, de acordo com cada avaliação (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias), os papéis foram imersos em solução de molibdato de amônio 10 g L⁻¹ e molibdato de amônio + HNO₃ 1 mol L⁻¹. Posteriormente, 1,5 mL da solução de verde-malaquita 4 g L⁻¹ em HCl 1 mol L⁻¹ foi adicionado sobre a superfície do papel e depois foram imersos em H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ para melhorar a visão da zona de difusão. Posteriormente, foram submetidos ao teste Tukey a 5% de probabilidade para fontes dos fertilizantes e ajuste ao modelo de regressão para as doses e tempos de avaliação. Por fim, foi possível observar que, para as fontes dos fertilizantes, o tratamento com 0,06% de OG e Avail® apresentou o melhor desempenho comparando as médias; para doses e tempos de avaliação, não foram observadas diferenças significativas. Concluiu-se que o tratamento com Avail® apresentou maior incremento em relação à zona de difusão de fósforo.

Palavras-chaves: latossolo; nanocompósitos; polímeros.

Abstract: In agriculture, crop productivity is affected by diseases, climate change, low fertilizer efficiency, and poor soil fertility. One of the main challenges in the Brazilian Cerrado is the low

availability of phosphorus (P) in highly weathered soils with naturally low fertility. Emerging technologies, such as the use of polymer-associated fertilizers, have been explored to improve fertilization efficiency. Carbon nanocomposites, such as graphene and graphene oxide (GO), are being studied due to their high sorption capacity and ability to carry nutrients, in addition to enhancing the hardness of fertilizer granules. The objective of this study was to evaluate the diffusion zone of phosphate fertilizers co-granulated with graphene oxide in clayey Red Latosol, using the filter paper method impregnated with iron oxide. The experiment was conducted in a randomized block design (RBD). Fertilizers were formulated with 0, 0.5, 1.0, 1.5, and 0.06% of graphene oxide. The fertilizer with 0.06% GO also contained the same percentage of the polymer Avail®. After treatment and contact with the Petri dish, at each evaluation interval (2, 7, 14, 21, 32, and 60 days), the papers were immersed in a 10 g L⁻¹ ammonium molybdate solution and then in ammonium molybdate + 1 mol L⁻¹ HNO₃. Subsequently, 1.5 mL of a 4 g L⁻¹ malachite green solution in 1 mol L⁻¹ HCl was added to the surface of the paper, followed by immersion in 1 mol L⁻¹ H₂SO₄ to improve visualization of the diffusion zone. Data were analyzed using Tukey's test at 5% probability for fertilizer sources and regression analysis for doses and evaluation times. Results showed that the treatment with 0.06% GO and Avail® had the best performance among the sources, while no significant differences were observed for doses and times. It was concluded that the Avail® treatment resulted in a greater increase in the phosphorus diffusion zone.

Keywords: Latosol; nanocomposites; polymers.

1 INTRODUÇÃO

Na agricultura atual, existem algumas ameaças que interferem na produtividade final das culturas, como doenças, mudanças climáticas globais, baixa eficiência dos fertilizantes e diminuição da fertilidade do solo (Pereira *et al.*, 2021). Estimativas mostram que a população mundial será 10 bilhões de pessoas até o ano de 2050, e isso significa incremento de 25 a 70% na demanda de alimentos em relação ao que é produzido atualmente (Scott *et al.*, 2018), ou seja, será necessário produzir mais alimentos para suprir a necessidade mundial.

A adubação fosfatada figura entre as principais etapas do processo produtivo das culturas/alimentos principalmente em regiões de clima tropical (bioma Cerrado), onde há o predomínio da classe de solo denominada de latossolo. Estes, por sua vez, possuem baixa fertilidade natural e baixos teores de fósforo (P) no solo disponível para as plantas (Santos *et al.*, 2018). O P desempenha funções como desenvolvimento das plantas, constituinte de ácidos nucleicos, proteínas, ATP, material genético, armazenamento e transferência de energia, fotossíntese, regulação de processos enzimáticos, desenvolvimento radicular e formação de sementes (Malavolta, 2006; Zambolim, 2001; Dechen; Nachtigall, 2007).

Os latossolos são solos altamente intemperizados, nos quais o P é considerado o nutriente mais limitante na produção de biomassa vegetal (Novais, 1999). Possuem predominantemente argilominerais do tipo 1:1 e óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsite), fatores que regem as reações de adsorção/fixação de P (Stauffer, 2016), contribuindo para a baixa concentração do nutriente na solução do solo (Fink *et al.*, 2014) e interferindo negativamente no fluxo difusivo de P (FDP). Hopkins (2015) diz

que a capacidade de recuperação do P aplicado via fertilizante em solos tropicais varia entre 0,1 a 30%, dependendo do pH e tipo de argila.

Portanto, alternativas para elevar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados em solos de Cerrado é de suma importância quando pensamos em sustentabilidade da agricultura e produção de alimentos em escala mundial. Entre essas alternativas se encontram os polímeros de revestimento ou tecnologias associadas (aditivos) a fertilizantes fosfatados e os fertilizantes organominerais. As tecnologias associadas podem ser de liberação gradual ou controlada (Machado; Souza, 2012); polímeros com alta densidade de cargas negativas que sequestram cátions di ou trivalentes interferentes (Dunn; Stevens, 2008), ou uso de ácidos orgânicos (SAS *et al.*, 2001), que são constituintes dos fertilizantes organominerais.

As tecnologias têm por finalidade atenuar a interferência de cátions e do tipo de argila na disponibilidade e difusão do P no solo, visando à elevação de P disponível na solução do solo para posterior absorção das plantas. Além dessas tecnologias, na atualidade, o uso de nanocompósitos de carbono, principalmente o Grafeno e Óxido de Grafeno, vem sendo estudado na agricultura para fins de produção de fertilizantes mais eficientes, tendo como principais objetivos elevar a absorção de nutrientes e produtividade das culturas (Solanki *et al.*, 2015; Abdel-Aziz *et al.*, 2021).

Tendo em vista todos os benefícios e potencialidades dos nanocompostos de carbono aplicados em fertilizantes, eles foram incluídos no Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) do Governo Federal Brasileiro (2021) como produtos de cadeias emergentes. Uma meta importante do PNF é a de reduzir em 70 a 90% a quantidade de macronutrientes exigidos pela lavoura com a utilização de nanotecnologia associada a fertilizantes. O óxido de grafeno possui característica hidrofílica e apresenta alta densidade de grupos funcionais oxigenados (carboxílico, hidroxílico, carbonílico e epóxi) na sua estrutura laminar. A alta densidade de grupos funcionais oxigenados, elevada superfície específica, resistência mecânica e física confere ao óxido de grafeno características desejáveis quando se fala em fertilidade do solo e fertilizantes, como elevada capacidade de sorção, carreador de nutrientes do solo para plantas, dureza/resistência aos grânulos e controle da liberação do nutriente dos fertilizantes (Kabiri *et al.*, 2017, Abdel-Aziz *et al.*, 2021).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a zona de difusão de fertilizantes fosfatados coganulados com óxido de grafeno ao longo do tempo em Latossolo Vermelho Argiloso, utilizando o método do papel filtro impregnado com óxido de Fe.

2 METODOLOGIA

O óxido de grafeno foi sintetizado no Laboratório de Química Analítica do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), de acordo com o método da esfoliação química do grafite (Nogueira; Xavier, 2019).

O experimento foi instalado no Laboratório de Engenharia Química, no UNIPAM. O solo para utilização no experimento foi coletado em barranco na fazenda Aragão, em Patos de Minas (MG), na profundidade de 0 - 20 cm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho. Foi submetido à análise para caracterização química e física.

Tabela 1: Análise física e química do solo

pH	P rem	M.O	P meh	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC(t)	CTC (T)	V	m
H ₂ O	mg/L	dag/Kg	mg/dm ³			cmol/dm ³						%	
5,80	9,77	3,63	5,22	80,94	3,48	1,01	0,03	4,08	4,70	4,73	8,78	53,53	0,63
			Areia	Silte	Argila	COT							
			g/Kg		dag/kg								
			200,00		250,00		550,00		2,11				

P, K: Extrator Mehlich I

Ca, Mg, Al: Extrator KCl 1 mol/L

H+Al: Extrator SMP

CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0

V: Saturação por Bases

P-rem.: Fósforo remanescente, concentração de P da solução de equilíbrio após agitar durante 1h a TFSA com solução de CaCl₂ 10 mmol/L, contendo 60 mg/L de P, na relação 1:10 S: Extrator Fosfato monocálcico em ácido acético

Mat. Org.: Oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N

COT: Carbono orgânico Total - Oxidação Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Após a coleta, o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2,0 mm (TFSA). A análise de densidade do solo e capacidade de campo (CC) foram realizadas pelo método da proveta.

O experimento foi montado em esquema fatorial 5 x 6, sendo cinco aditivos e seis tempos de avaliação, seguindo o delineamento experimental blocos casualizados (DBC). Foram utilizados dois aditivos (Óxido de Grafeno (GO) e Avail T5®), sendo que os tratamentos apresentaram concentrações de 0, 0,5, 1,0, 1,5, 0,06% respectivamente do OG, e, no quinto tratamento, foi utilizado o aditivo Avail T5® também com 0,06% de concentração, seguindo a dose recomendada pelo fabricante do produto. Para a montagem do experimento, foram considerados sete tempos de incubação (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias). Na formulação dos fertilizantes, foi utilizado como matriz fosfato monoamônio (MAP) e cloreto de potássio (KCl). A dose de P e K utilizada (132 mg dm⁻³ de P e 15,12 mg dm⁻³ de K) foi padrão para todos os tratamentos e o fechamento de fórmula dos fertilizantes foi feito com material inerte (Tabela 1).

O primeiro passo para a produção dos fertilizantes foi padronizar a umidade das matérias-primas (MAP e KCl); para isso, elas foram colocadas em estufa de secagem a 65 °C durante o período de 24 horas. Feito isso, as matérias-primas foram submetidas à moagem em moinho multiuso modelo 630/1 e passadas em peneira com malha de 425 µm, com a finalidade de padronizar as partículas na forma de pó. Em seguida, as matérias-primas foram misturadas de acordo com as proporções (massa massa-1) apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2: Descrição das concentrações (%) de aditivos utilizados para cada tratamento

Tratamentos	OG	Avail ® %	Inerte
1	0	-	1,5
2	0,5	-	1
3	1	-	0,5
4	1,5	-	0
5	0,06	0,06	1,38

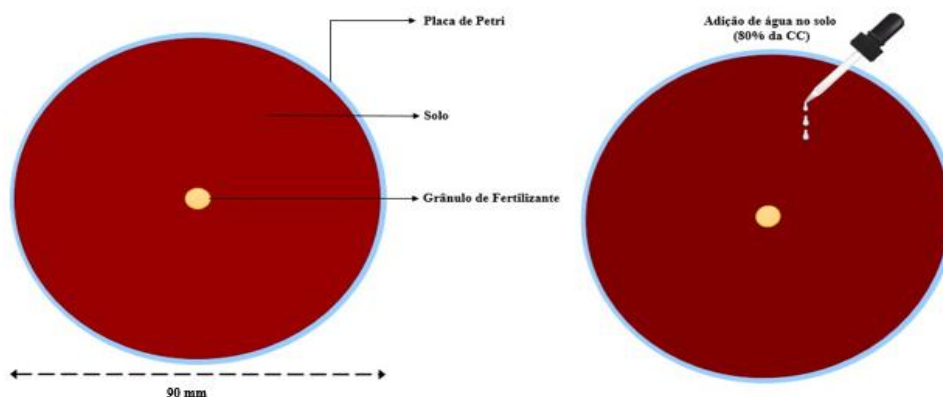
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A homogeneização das misturas ocorreu por via úmida; adicionou-se uma solução de goma arábica 2% misturando até a formação de uma massa. A granulação dos fertilizantes foi realizada em tableteiro com diâmetro de furos de 2 mm. Os grânulos foram secos em estufa a 40 °C por 24 horas e classificados por tamanho em peneira de 2 mm.

O experimento de incubação em placas de petri foi realizado seguindo a metodologia proposta por Lombi *et al.* (2004). Foram utilizadas placas de petri com dimensões de 9,0 cm de diâmetro e 1,2 cm de altura, adicionando um total de 80 g de solo seco, por placa, na tentativa de alcançar uma densidade de 1,3 g cm³ de solo. O solo foi mantido em 80% da capacidade de campo.

Posteriormente, as placas de petri foram tampadas, vedadas com plástico filme e embrulhadas com papel alumínio para uma pré-incubação por 24 horas. A pré-incubação tem como finalidade certificar a uniformidade da distribuição da água nas amostras de solo. Feito isso, foram abertas as placas e foi adicionado um grânulo dos fertilizantes avaliados no centro da placa, cuidadosamente colocado entre a superfície e o fundo da placa (César, 2016). Para padronizar o tamanho dos grânulos dos fertilizantes, eles foram passados em uma peneira de 2 mm e foram selecionados apenas os grânulos que transpassaram (Figura 1).

Figura 1: Esquema de montagem das placas de petri para visualização da zona de difusão de P



Fonte: elaboração dos autores, 2024.

Finalmente as placas foram devidamente identificadas, novamente vedadas com plástico filme e papel alumínio e incubadas em ambiente por 2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias. No final de cada tempo de incubação, as placas de petri foram abertas para a visualização da zona de difusão, empregando o método não destrutivo, proposto por Degryse e McLaughlin (2014), que consiste na utilização da mesma amostra para a quantificação da área ao longo do experimento, sem descartes após a avaliação. O método tem como princípio fazer uma espécie de “impressão digital” da difusão de P do fertilizante por meio da sua captura em papel filtro impregnado com óxido de ferro colocado sobre a superfície do solo.

Uma das principais vantagens desse método é ser não destrutivo, ou seja, permite avaliar a difusão do P ao longo dos tempos de incubação na mesma placa de petri. De acordo com esses autores (Degryse; McLaughlin, 2014), o método tem como princípio capturar o P do fluxo difusivo por meio de um papel filtro impregnado com óxido de ferro, que foi colocado sobre a superfície do solo e posteriormente feito a coloração para a visualização da zona de difusão.

No procedimento, foram utilizados papéis filtros do tipo Whatman® n.1 de 9,0 cm de diâmetro, inicialmente submersos em solução de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0,37 mol L⁻¹, por 15 minutos. Posteriormente, foram retirados da solução, removido o excesso e adicionados em uma solução de NH_4OH 2,7 mol L⁻¹, fazendo com que cada face do papel filtro ficasse em contato com a solução por 15 segundos. No final, o excesso da solução foi retirado dos papéis com jatos suaves de água deionizada, secos (ao ar) e armazenados.

Ao final de cada tempo de incubação, as placas foram abertas e o papel filtro impregnado com Fe colocado sobre o solo, assegurando um completo contato do papel com o solo. O tempo de contato do papel filtro com o solo variou de acordo com o tempo de incubação, sendo assim:

- tempos 2 e 7 dias: 5 minutos de contato;
- tempos 14, 21 dias: 10 minutos de contato;
- tempos 32 e 60 dias: 30 minutos de contato.

Encerrado o tempo de contato do papel filtro de cada tempo de incubação, esses foram retirados das placas de petri, e as partículas de solo excedentes retiradas com jatos suaves de água deionizada. Para coloração da zona de difusão do P capturado pelos papéis, eles foram submersos em solução de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 10 g L⁻¹ por 30 minutos. Depois transferidos para a solução ácida de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 10 g L⁻¹ + HNO_3 1 mol L⁻¹ por 15 minutos. O excesso de solução foi retirado dos papéis e colocados equidistantes em uma bandeja limpa com a parte que ficou em contato com o solo voltada para cima.

Posteriormente foi adicionado sobre a superfície de cada papel 1,5 mL da solução de verde-malaquita 4 g L⁻¹ em HCl 1 mol L⁻¹, garantindo uma distribuição uniforme. Os papéis foram deixados para reagir durante 15 minutos. O excesso da solução verde-malaquita foi lavado usando jatos suaves de água deionizada e os papéis transferidos para a solução de H_2SO_4 1 mol L⁻¹ e deixados em contato por um período entre 7 a 15 minutos, com a finalidade de dissolver todo o Fe contido no papel e melhorar a visibilidade da zona de difusão. Por fim, os papéis foram lavados com água deionizada para retirar o excesso de ácido e colocados para secar.

Para a quantificação da zona de difusão de P, os papéis foram escaneados utilizando o software AutoCAD, e a área de difusão medida pelo processamento das imagens. Após o processamento das imagens, a área da zona de difusão foi transformada para diâmetro utilizando a equação (César, 2016):

$$\frac{\sqrt{A} \times 2}{\pi}$$

Onde:

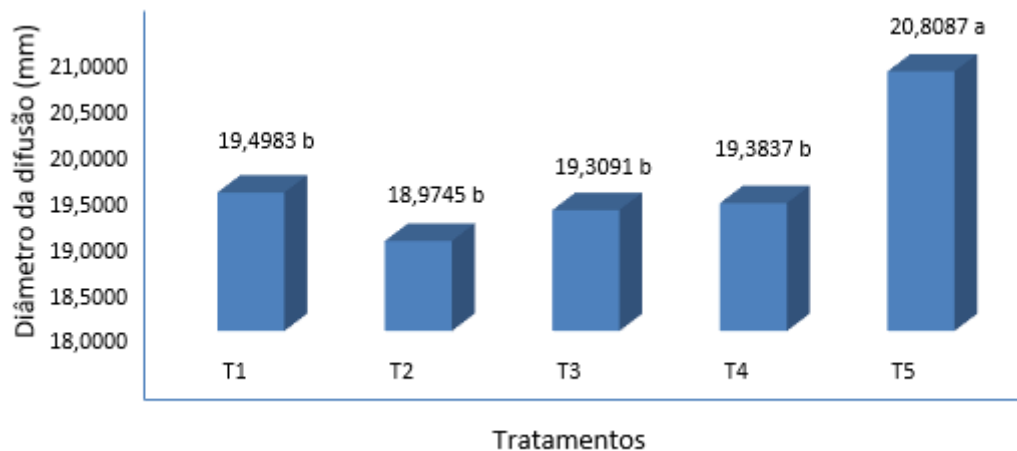
- A é área difusão de P gerada pelo software

As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para os fertilizantes utilizados, e regressão para doses e tempos de incubação, utilizando o software Sisvar (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a coleta, tabulação e submissão dos dados aos testes estatísticos, os resultados obtidos foram dispostos em modelo gráfico para auxiliar a visualização. Os gráficos gerados representam a média da difusão das fontes dos fertilizantes utilizados (Gráfico 1) e a variação da zona para doses em função dos tempos avaliados (Gráfico 2).

Gráfico 1: Médias de difusão (mm) dos tratamentos
em função dos fertilizantes utilizados



DMS: 1,06

CV(%): 5,88

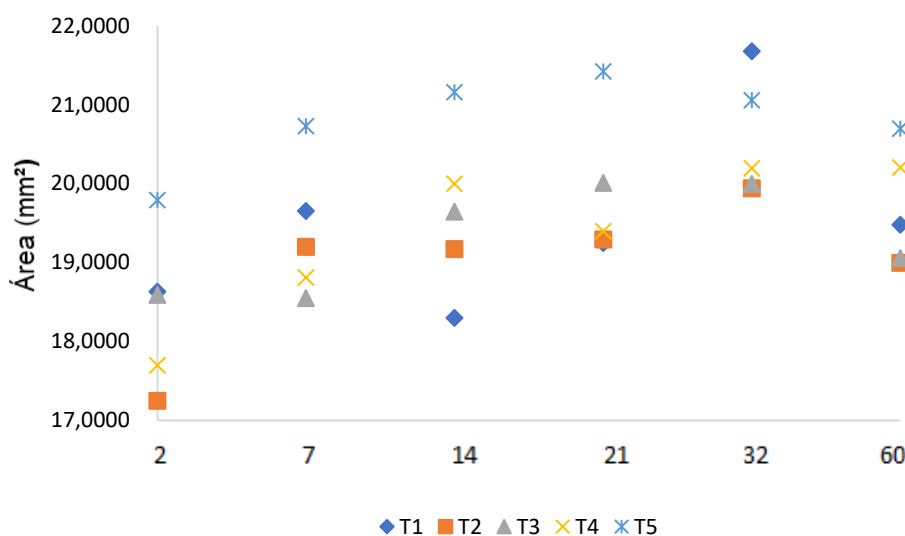
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Observando-se os valores médios dos tratamentos comparando os fertilizantes utilizados em cada um, nota-se que o tratamento cinco (T5) obteve raio de difusão 8% maior em relação aos demais. Embora o tratamento também contenha OG em sua composição, a sua associação ao polímero trouxe efeito significativo. Esse comportamento pode ser fundamentado em função da fonte utilizada na formulação do fertilizante, o qual foi o único tratamento que recebeu o polímero Avail®.

Nesse tratamento, foi utilizada a dose recomendada pelo fabricante, e a mesma dose associada de OG. O polímero Avail® é uma macromolécula compostas por subunidades repetitivas altamente ativas, e deste modo age como um escudo capturando os cátions que fixam o nutriente no solo e assim tornando-o disponível em solução e consequentemente gerando um aumento na difusão (Verdesian Life Sciences, 2015).

Gráfico 2: Área (mm) das doses dos fertilizantes em função das avaliações (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias)



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Analisando-se o gráfico, nota-se que, para a zona de difusão dos fertilizantes em função dos tempos de avaliação, não houve ajuste dos valores ao modelo de regressão. A hipótese para o ocorrido pode estar relacionada à heterogeneidade do fluxo difusivo em alguns tempos de avaliação. Notou-se que logo na primeira avaliação a difusão de todos os tratamentos atingiram entre 80% e 95% do total observado nas outras avaliações. Resultados semelhantes foram encontrados por César (2016) — a primeira avaliação aconteceu com 24 horas após a montagem do experimento e nesse período a zona atingiu 70 % a 80 % do máximo alcançado ao final do experimento.

Quanto à área total atingida, os resultados corroboram os de Andelkovic *et al.* (2018), os quais utilizaram MAP associado ou não ao OG. As fontes que não receberam óxido de grafeno em sua formulação difundiram por toda área da placa de petri a partir do primeiro dia, enquanto a fonte contendo OG teve liberação gradual alcançando em torno de 36% da área no mesmo intervalo de tempo.

Entre os principais fatores que podem afetar a difusão de P no solo estão: o teor de água no solo, a quantidade do elemento adicionado via fertilizantes que permanece na forma lábil após as reações químicas e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (Lehr *et al.* 1959; Degryse; McLaughlin, 2014). Outro fator que também afeta a difusão de P, porém em menor proporção, é a granulometria das partículas do solo, pois, quanto menor forem as partículas do solo, maior será a tortuosidade dos poros. Visto isso, espera-se que a difusão de um solo argiloso seja menor quando comparado a um arenoso, considerando o parâmetro de tamanho das partículas (Lombi *et al.* 2004; César, 2016). Esse também é um possível fator que pode ter influenciado na zona de difusão, pois o solo trabalhado possui teor de argila de 55%.

Em relação ao fator de disponibilidade de água, McBeath *et al.* (2012), em seu trabalho, avaliou disponibilidade e difusão de P e zinco (Zn) de fertilizantes líquidos e

granulados, comparando aplicação em solo seco e úmido, com 80% da capacidade de campo. Embora não tenha alterado a disponibilidade dos nutrientes, a zona de difusão foi reduzida no solo seco. Outra hipótese para os resultados de difusão é a umidade do solo, pois, no período de condução do experimento (junho a agosto), a umidade relativa do ar foi quantificada, usando-se um termo-igroanemômetro Omega modelo HHF81, variando de 24,2 e 55,2%.

4 CONCLUSÃO

O tratamento com Avail® apresentou maior incremento comparando as médias de fontes dos fertilizantes utilizados. Na comparação das doses e tempos de avaliação, não houve diferença significativa.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, H. M. M.; SOLIMAN, M. I.; AL-SAOUD, A. M. A.; EL-SHERBENY, G. A. Waste-derived NPK Nanofertilizers Enhances Growth and Productivity of capsicum annuum L. **Plants**, 10, 1144, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10061144>.
- ANDELKOVIC, I. B.; KABIRI, S.; TAVAKKOLI, E.; KIRBY, J. K.; MCLAUGHLIN, M. J.; LOSIC, D. Graphene oxide-Fe (III) composite containing phosphate—A novel slow release fertilizer for improved agriculture management. **Journal of cleaner production**, 185, p. 97-104, 2018.
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. Brasília: SAE, 2021.
- CÉSAR, Fábio Ricardo Coutinho Fontes. **Eficiência agrônômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 03, p. 91-132.
- DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualizations, chemical measurements, and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, p. 832-842, 2014.
- DUNN, D. J.; STEVENS, A. N. D. G. Response of rice yields to phosphorus fertilizer rates and polymer coating. **Crop Management**, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/CM-2008-0610-01-RS>.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Editores Técnicos: TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema de análise estatística computacional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, dez. 2011.

FINK J. R.; INDA A. V.; TORRENT J.; BARRÓN V.; Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Sci Agron.**, 2014.

HOPKINS, B. G. Phosphorus in plant nutrition. *In*: PILBEAM, D. J.; BARKER, A. V. **Plant nutrition handbook**. 2nd ed., ch. 3, 65-26. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2015.

KABIRI, Shervin *et al.* Óxido de grafeno: um novo veículo para liberação lenta de micronutrientes vegetais. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n. 49, p. 43325-43335, 2017.

LEHR, J. R.; BROWN, W. E.; BROWN, E. H. Chemical Behavior of monocalcium phosphate monohydrate in soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 23, n. 1, p. 3- 7, 1959.

LOMBI, E., McLAUGHLIN, M. J., JOHNSTON, C., ARMSRONG, R. D., HOLLOWAY, R. E. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. **Plant and Soil**. The Hague, v. 269, p. 25-34, 2004.

MACHADO, V. J. E.; SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 1-7, 2012.

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

MCBEATH, T. M. *et al.* The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. **Plant and Soil**, v. 358, p. 337-348, 2012.

NOGUEIRA, S. L., XAVIER, A. S. Obtenção, caracterização e funcionalização de nanolâminas de grafeno para remoção de turbidez de efluente têxtil. **Brazilian Journal of Development**, 2019. DOI:10.34117/bjdv5n10-234.

NOVAIS, Roberto Ferreira de. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, 1999.

- PEREIRA, E. S. do; OLIVEIRA, H. C.; FRACETO, L. F.; SANTELLA, C. Nanotechnology Potential in Seed Priming for Sustainable Agriculture. **Nanomaterials**, 11, 267, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11020267>.
- RAGHOTAMA K. O.; KARTHIKEYAN A. S. Phosphate acquisition. **Plant Soil**, 2005.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B., CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, EMBRAPA, 2018.
- SAS, L.; RENGEL, Z.; TANG, C. Excess cation uptake and extrusion of próton and organic acid anions in *Lupinus albus* under P deficiency. **Plant Science**, 2001.
- SCOTT, N.R.; CHEN, H.; CUI, H. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. **J. Agric. Food Chem**, 2018, 66, 6451-6456.
- SOLANKI, P.; BHARGAVA, A.; CHHIPA, H.; JAIN, N.; PANWAR, J. Nano-fertilizers and Their smart delivery system. nanotechnologies in food and agrocultrual. **Springer International Publishing Switzerland**, 2015.
- STAUFFER, E. **Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- VERDESIAN Life Sciences. **AVAIL phosphorus fertilizer booster**, 2015.
- ZAMBOLIM, L. **Tecnologias de produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV, 2001.