

FELIPE TAKAO STEDILE FUJIMOTO

**LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE DE FÓSFORO PARA O CULTIVO DA  
CENOURA E EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR SOBRE A  
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa – campus Rio Paranaíba como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

RIO PARANAÍBA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca da Universidade Federal  
de Viçosa - Câmpus Rio Paranaíba**

T

F9611  
2019 Fujimoto, Felipe Takao Stedile, 1987-  
Localização de uma fonte de fósforo para o cultivo da  
cenoura e efeito da aplicação de Biochar sobre a disponibilidade  
de fósforo no solo / Felipe Takao Stedile Fujimoto. – Rio  
Paranaíba, MG, 2019.  
vii, 49f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Roberto Ferreira de Novais.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Localização de fósforo. 2. P-disponível. 3. Condicionador  
de solo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Solos. Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal (Campus  
CRP). II. Título.

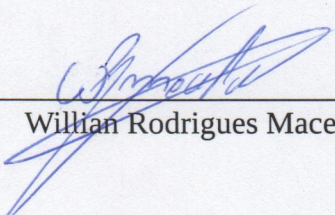
635.13

FELIPE TAKAO STEDILE FUJIMOTO

**LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE DE FÓSFORO PARA O CULTIVO DA  
CENOURA E EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR SOBRE A  
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO**

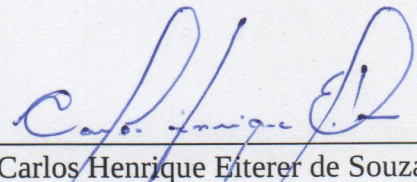
Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2019.



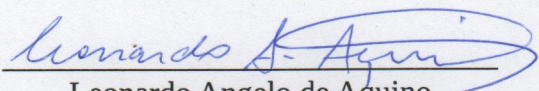
---

William Rodrigues Macedo



---

Carlos Henrique Eiterer de Souza



---

Leonardo Angelo de Aquino  
(Coorientador)



---

Roberto Ferreira Novais  
(Orientador)

Aos meus pais Takao e Beatriz pelo exemplo e educação.

Aos meus irmãos Thiago e Thais pelo companheirismo.

À minha esposa Mariana pelo amor, paciência e inspiração.

À Universidade Federal de Viçosa na figura do Professor Roberto Novais pela oportunidade de realizar minha formação acadêmica e por tudo que aprendi.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, tenho que agradecer aos meus pais por me educarem e mostrarem o exemplo a ser seguido; o caminho é mais seguro com suas palavras.

À Mariana, por sempre estar ao meu lado, apoio incondicional e amor. É confortante estar ao seu lado.

Aos meus familiares, aos familiares de minha esposa e amigos pelo carinho e apoio.

À Universidade Federal de Viçosa onde tive a oportunidade de aprender e viver. Aos professores da pós-graduação que compartilharam seus conhecimentos comigo, e em especial ao Professor Roberto Novais que sempre foi uma referência em meus estudos e desde a graduação me estimulou para meu aprofundamento no conhecimento, foi paciente e respeitoso, um excelente orientador.

Aos professores e coorientadores André Mundstock Xavier de Carvalho, Leonardo Angelo de Aquino e Willian Rodrigues Macedo que sempre estiveram disponíveis, disponibilizaram material e tempo para me ajudar durante o curso.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), na figura do professor e amigo Carlos Henrique Eiterer de Souza, que disponibilizou o laboratório para as análises dos experimentos. Ao pessoal do laboratório CEFERT do UNIPAM (Mateus, Pedro, Vitor e a todos os demais estagiários) que foram os braços fortes de todo o trabalho.

Aos parceiros da Escola Agrícola Afonso Queiroz, aos vigias Reginaldo e Chico, aos responsáveis pelo ambiente protegido Antonio e Luiz e à coordenadora Mara, que foram pacientes e dispostos inclusive durante os finais de semana.

À Embrapa Florestas, em nome da pesquisadora Claudia Maia e a SLB do Brasil em nome de Henrique Glovacki, pessoas que forneceram parte do material desse trabalho.

Aos sócios, funcionários, clientes e amigos da Porteira Rural e Agrojapão, em especial ao Luiz Gustavo que entenderam minhas ausências e me ajudaram a concluir esta etapa.

Aos colegas da pós-graduação que compartilharam comigo muitas experiências e conhecimentos.

Muito obrigado.

## **BIOGRAFIA**

Felipe Takao Stedile Fujimoto, filho de Takao Enardo Fujimoto e Beatriz Helena Stedile Fujimoto, nasceu em São Paulo - SP em 23 de março de 1987.

Iniciou o curso de graduação em Agronomia na Universidade Federal de Viçosa em 2005, onde atuou na Empresa Junior de Agronomia (AgroPlan-UFV), como Gerente de Consultoria, Gerente Administrativo e Diretor de Projetos. Graduiu-se em janeiro de 2010. Em março de 2010, iniciou o programa de estágio no exterior TOP (The Ohio Program) na área de paisagismo; morou na cidade de Columbus-OH até dezembro de 2010. Em 2011 inaugurou seu primeiro empreendimento, a Porteira Rural Agropecuária, dedicada ao público rural e urbano. Em agosto de 2016, iniciou como aluno especial no curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Federal do Viçosa *Campus* Rio Paranaíba, sendo aprovado como aluno regular em março de 2017 na área de fertilidade de solo e nutrição de plantas. A defesa da dissertação ocorreu em 26 de fevereiro de 2019, em Rio Paranaíba.

## SUMÁRIO

Resumo .....	vi
Abstract.....	vii
Introdução Geral.....	1
Referências .....	3
<b>CAPÍTULO I – LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE UMA FONTE SOLÚVEL DE FÓSFORO PARA O CULTIVO DA CENOURA .....</b>	<b>5</b>
Resumo.....	5
Abstract .....	6
Introdução .....	7
Material e Métodos .....	11
Resultados e Discussão .....	15
Conclusões .....	23
Referências.....	24
<b>CAPÍTULO II – EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR SOBRE A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO.....</b>	<b>29</b>
Resumo.....	29
Abstract .....	30
Introdução .....	31
Material e Métodos .....	34
Resultados e Discussão .....	38
Conclusões .....	43
Referências.....	44
Conclusões Gerais .....	49

## RESUMO

FUJIMOTO, Felipe Takao Stedile, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba, fevereiro de 2019. **Localização ótima de uma fonte solúvel de fósforo para o cultivo da cenoura e efeito da aplicação de biochar sobre a disponibilidade de fósforo no solo.** Orientador: Roberto Ferreira Novais. Coorientadores: André Mundstock Xavier de Carvalho e Leonardo Angelo de Aquino.

Para se aprofundar na compreensão da dinâmica de fósforo (P) no solo e planta, esta dissertação teve como objetivo identificar formas mais eficientes de uso de fertilizante fosfatado solúvel. No primeiro capítulo deste trabalho, avaliou-se a localização do fertilizante fosfatado para a otimização do crescimento e desenvolvimento da cenoura, em vasos, em casa de vegetação. Foram utilizadas doses de P de modo a obter a eficiência agrônômica para diferentes localizações da fonte de P. Para a aplicação localizada do P, foram utilizadas doses homogêneas em volumes de solo, relativos a tubos com diâmetros de 40, 100 e 200 mm, posicionados no centro do vaso (diâmetro de 200 mm). A aplicação mais localizada do P possibilitou a maior disponibilidade deste nutriente no solo, no final do período de cultivo. Com o aumento nas doses de P houve aumento da produção de cenoura, embora com a diminuição da eficiência agrônômica do nutriente. Concluiu-se que a localização do fertilizante fosfatado em menor volume de solo, para a cultura da cenoura, é uma alternativa economicamente viável, possibilitando a redução de dose ótima. A localização correspondente a 100 mm demonstrou ser mais efetiva por apresentar maior produção de matéria fresca de raiz e, conseqüentemente, maior eficiência agrônômica. No segundo capítulo desse trabalho, avaliaram-se épocas diferentes de aplicação de biochar e de uma fonte solúvel de P, com doses de 250 e 500 mg dm<sup>-3</sup> e de biochar correspondente a 10, 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> utilizando milho como planta indicadora. O biochar possui cargas predominantemente negativas, assim como o fosfato; portanto, atua como concorrente à adsorção de P pelo solo, formando ligações com as argilas do solo e favorecendo a disponibilidade de P para a planta. A dose de biochar, de forma geral, não influenciou os resultados das variáveis estudadas. Todavia, na dose de 500 mg dm<sup>-3</sup> de P não foi encontrada diferença significativa de matéria seca para a época de aplicação do biochar. Concluiu-se que dentre as épocas de aplicação de biochar em relação a de P, a aplicação prévia de biochar favorece a disponibilidade de P no solo para a planta.

## ABSTRACT

FUJIMOTO, Felipe Takao Stedile, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba, February, 2019. **Optimum placement of a soluble source of phosphorus for carrot cultivation and effect of biochar application on the availability of phosphorus in the soil.** Adviser: Roberto Ferreira Novais. Co-advisers: André Mundstock Xavier de Carvalho and Leonardo Angelo de Aquino.

In order to deepen understanding the phosphorus (P) dynamics in soil and plant, this dissertation aimed to identify more efficient forms for soluble phosphate fertilizer use. In the first chapter of this work, the placement of the phosphate fertilizer for the optimization of the growth and development of carrots in pots under greenhouse conditions. P doses were used in order to obtain the agronomic efficiency for different locations of the source of P. For the localized application of P, homogenized doses were used in soil volumes, in pipes with diameters of 40, 100 and 200 mm, positioned in the center of the pot (200 mm diameter). The more localized application of P allowed the greater availability of this nutrient in the soil at the end of the growing period. The increase of P doses increased carrot production, although with the decrease of the agronomic efficiency of the nutrient. It was concluded that the placement of the phosphate fertilizer in a lower volume of soil, for the carrot crop, is an economically viable alternative, allowing the optimal dose reduction. The location corresponding to 100 mm was shown to be more effective because it presented higher production of fresh root matter and, consequently, greater agronomic efficiency. In the second chapter of this work, different times of biochar application and a soluble source of P, with doses of 250 and 500 mg dm<sup>-3</sup> and biochar corresponding to 10, 20 and 40 t ha<sup>-1</sup> were evaluated, using maize as indicator plant. Biochar has predominantly negative charges, as does phosphate; therefore, it acts as a competitor to the adsorption of P by the soil, forming bonds with the soil clays and favoring the availability of P to the plant. The dose of biochar, in general, did not influence the results of the studied variables. However, at the dose of 500 mg dm<sup>-3</sup> of P, no significant dry matter difference was found for the biochar application period. It was concluded that among the times of biochar application in relation to P, the previous application of biochar favors the availability of P in the soil for the plant.

## Introdução Geral

O crescimento e desenvolvimento das plantas dependem de um balanço adequado de nutrientes disponíveis. Dentre os elementos essenciais o fósforo (P) apresenta papel importante nos processos energéticos da planta e componente de moléculas importantes como ácidos-nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, fosfolipídeos, ATP, etc (Taiz & Zieger, et al. 2017). A importância deste nutriente na fertilidade do solo ocorre, de modo particular, em solos tropicais mais intemperizados, dada sua elevada adsorção e baixa reversibilidade do adsorvido (Novais et al., 2007).

Problemas relacionados ao uso de P para a agricultura se dão pelo fato de o uso em excesso deste nutriente em solos pouco intemperizados, com alta CTC causar eutrofização de águas (Yao et al., 2013) e em solos com alto poder tampão deste nutriente, doses baixas de P fazem com que este nutriente não fique adequadamente disponível para a planta. Em solos muito intemperizados, como de modo geral ocorrem do Brasil, os solos agricultáveis em sua maioria são Latossolos, com altos teores de óxi-hidroxidos de Fe e Al que possuem alta afinidade para com o íon fosfato, com as quais forma ligação covalente de alta estabilidade fixando-o no solo (Novais e Smyth, 1999). Dada a elevada afinidade do P com os Latossolos, agricultores têm adotado grandes doses de fontes de P para alcançarem altas produtividades, o que por vezes representa a diminuição da eficiência agronômica do nutriente.

Com o alto consumo de P para a produção agrícola em condições de elevada fixação de P, surgiram questionamentos da sustentabilidade do seu uso, pois de acordo com trabalhos científicos, as reservas mundiais estariam se esgotando nos próximos 50 a 90 anos (Vance et al., 2003, Fixen, 2009, Leghari et al., 2016). Assim, estudos científicos têm sido realizados com o objetivo de aumentar a eficiência agrícola de uso de P, utilizando estratégias como: o selecionamento de plantas que utilizam o P em menor quantidade (Vance et al., 2003, Dhillon et al., 2017), plantas que desenvolvem raízes mais eficientes na absorção do P, utilização de microrganismos capazes de, em simbiose, otimizar a sua absorção pela planta (Smith et al., 2000, Verma et al., 2017), aumento da matéria orgânica e CTC do solo (Andrade et al, 2003), conservação da estrutura do solo, localização ótima do fertilizante para o cultivo de plantas, utilização de fertilizantes organominerais ou com aditivos para permitir sua liberação controlada (Kiehl, 2008,

Stauffer, 2016), utilização de material vegetal pirolisado (biochar) como adsorvente de P de águas eutróficas para o reúso do P (Yao et al., 2013, Novais, 2018).

A localização do fertilizante é estratégia comum em algumas culturas de uso intensivo como soja, milho, feijão, cana, café, eucalipto, etc.; todavia não é adotada em cultivos de olerícolas cuja aplicação de P envolve a prática da fosfatagem. A localização da adubação fosfatada permite menores perdas por fixação de P e facilita o seu transporte difusivo de P no solo para a raiz (Novais e Smyth, 1999, Fink et al., 2016, Oliveira et al., 2017).

Para diminuir a fixação de P no solo têm-se utilizado estratégias químicas para que ele fique mais disponível para planta, como o uso de matéria orgânica que, como o íon fosfato, possui cargas negativas e quando aplicado antecipadamente ao P compete pelos sítios de ligação dos óxi-hidroxidos de Fe e Al, permitindo maior disponibilidade de P (Andrade et al., 2003, Gonzaga et al. 2018). Em substituição a matéria orgânica, tem-se o biochar como condicionador químico do solo, devido ao possível baixo custo de produção desse material, por se tratar, geralmente, de pirólise de materiais de descarte, como resíduos vegetais, lodo de esgoto, resíduos orgânicos de lixo urbano e serragem (Novotny et a., 2015; Novais, 2018).

Neste contexto, este trabalho objetivou verificar a influência da localização da adubação fosfatada para a produção de cenoura e a melhor estratégia de época da aplicação de biochar em relação ao fertilizante fosfatado sobre a disponibilidade de P no solo.

## Referências

- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1003–1011, 2003.
- DHILLON, J.; TORRES, G.; DRIVER, E.; FIGUEIREDO, B.; RAUN, W. R.; World phosphorus use efficiency in cereal crops. **Agronomy Journal**. v.109, n. 4, 2017.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; SÁNCHEZ-RODRIGÉZ, A. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corns seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Biology and Fertility of Soils**. v. 52, p. 203-201, 2016.
- FIXEN, P. E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**. v. 126, p. 8-14, 2009.
- GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; ALMEIDA, A. Q.; CARVALHO JUNIOR, J. I. T.; ANDRADE, K. R. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. **Catena**, v. 162, p. 414–420, 2018.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais**. 2.ed. Piracicaba. Degaspari. 2008
- LEGHARI, S. J.; BURIRO, M.; JOGI, Q.; KANDHRO, M. N.; LEGHARI, A. J. Depletion of phosphorus reserve, a big threat to agriculture: challenges and opportunities. **Sci Int (Lahore)**, v.28 (3), p.2697-2702, 2016.
- NOVAIS, S.V. **Biochars in the mitigation of greenhouse gases and on phosphorus removal and reuse**. 2018. Tese (Doutorado solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solos e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 399p. 1999.
- NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. & NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. &

NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015.

OLIVEIRA, P. M.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I. Localized application of monoammonium phosphate favors the availability of P in the soil and its absorption. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 12–19, 2017.

SMITH, F. A.; JAKOBSEN, I.; SMITH, S. E. Spatial differences in acquisitions of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Mendicago trumcatula*. **New Phytologist**. v. 147, p. 357-366, 2000.

STAUFFER, E. **Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo**. 2016. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for a securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**. v. 157, p. 423-447, 2003.

VERMA, A. K.; YADAV, B.; KUMAWAT, C. Rhizosphere management strategies for enhance phosphorus utilization by crops: An overview. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. v. 6, n. 4, p. 446–452, 2017.

YAO, Y.; GAO, B.; CHEN, J.; YANG, L. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. **Environmental Science e Technology**. v. 47, p. 8700-8708, 2013.

# CAPÍTULO I – LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE UMA FONTE SOLÚVEL DE FÓSFORO PARA O CULTIVO DA CENOURA

## Resumo

O uso de insumos agrícolas, principalmente dos fertilizantes fosfatados, é intenso nos cultivos de cenoura, devido à baixa eficiência de recuperação do nutriente por esta cultura. A aplicação localizada de P é uma estratégia adotada para diversas culturas, por permitir menor distância do contato da raiz com o nutriente, uma vez que o P tem mobilidade restrita no solo. O objetivo desse trabalho foi avaliar a localização ótima de uma fonte solúvel de P no cultivo de cenoura em vasos. O experimento constituiu-se em um esquema fatorial  $4 \times 3 + 1$ , sendo quatro doses de P (75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup> de P), três localizações da fonte de P (40, 100 e 200 mm) e um controle, com cinco repetições em um delineamento inteiramente casualizado, em casa de vegetação. Para realizar a localização da fonte de P, foram utilizados tubos de PVC, nos diâmetros de 40, 100 e 200 mm, posicionados no centro do vaso (tubo de 200 mm), retirados após o preenchimento de cada tubo do vaso principal (200 mm). Foram avaliadas as seguintes características na colheita: comprimento e diâmetro da raiz, matéria de raízes frescas, matéria de folhas e de raiz secas, teores de P, Cu, Zn, Mn e Fe na folha e na raiz, eficiência agrônômica, eficiência de recuperação de P e seu teor disponível no solo. Os teores de P na folha e raiz tiveram acréscimos à medida que houve aumento de dose de P. O aumento na dose de P proporcionou maior produção de matéria fresca da raiz quando estas foram aplicadas mais localizadamente. O P-disponível foi significativamente maior após o cultivo para a localização de 40 mm. A localização de 100 mm foi a que apresentou maior produção de matéria fresca e, portanto, obteve a melhor eficiência agrônômica.

**Palavras-chave:** localizações de fósforo, eficiência agrônômica, P-disponível.

## **Abstract**

The use of agricultural inputs, mainly phosphate fertilizers, is intensively used in carrot crops, due to the low recovery efficiency of this crop. The localized application of P is a well adopted strategy for other crops, because it allows short distance from the root contact with the nutrient, since the P has restricted mobility in the soil. The objective of this work was to evaluate the optimal location of soluble source of P in carrot cultivated in pots. The experiment consisted of a 4 x 3 + 1 factorial scheme with four P doses (75, 150, 300 and 600 mg dm<sup>-3</sup> of P), three phosphate fertilizer locations (40, 100 and 200 mm) and one control, with five replications in a completely randomized design, under greenhouse conditions. In order to locate the source of P, PVC pipes were used, in the diameters of 40, 100 and 200 mm, positioned in the center of the pot, which were removed after filling the pot with soil. The following characteristics were evaluated at the harvest: root length and diameter, fresh root mass, leaf and root dry mass, P, Cu, Zn, Mn and Fe contents in leaf and root, agronomic efficiency, recovery efficiency of P and available phosphorus in the soil. The levels of P in the leaf and root increased as increased P dose. The production of fresh matter behaved exponentially for all the treatments of location. The P-available was significantly higher after cultivation in the 40 mm location. The location of 100 mm was the one with the highest fresh matter production and, therefore, the best agronomic efficiency.

**Key words:** phosphorus location, agronomic efficiency, P-available.

## Introdução

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma das hortaliças mais cultivadas no Alto Paranaíba (MG), região que tem demonstrado grande potencial para a produção de hortaliças. Esta região possui características edafoclimáticas favoráveis para essa cultura, com altas produtividades, resultado do uso de insumos agrícolas, em especial de fertilizantes. As altas doses de fertilizantes atualmente utilizadas na cultura divergem das recomendadas pela CFSEMG (1999), uma vez que as produtividades atuais são maiores que as obtidas há mais de 15 anos; adicionalmente, o alto consumo de fertilizantes justifica-se pelo alto valor econômico da cenoura no mercado.

Dentre os macronutrientes absorvidos pela cenoura, o fósforo (P) e o potássio (K) são acumulados preferencialmente na raiz (Dezordi, et al., 2015, Gonçalves, et al., 2017), sendo que o P é o quarto nutriente de maior presença e 86,1% do total na planta encontra-se na raiz (Cecílio Filho & Peixoto, 2013). Além disso, segundo esses autores, para uma população de 590.000 plantas ha<sup>-1</sup> acumularam-se apenas 51,6 kg ha<sup>-1</sup> de P na planta, o que indica baixa eficiência na absorção do nutriente. Segundo Assunção et al. (2016), a eficiência de recuperação de P foi de 2,33% para a cultivar 'Juliana' e de 5,61% para a 'Nayarit'. A baixa taxa de recuperação deve-se, dentre outros fatos, à grande concorrência entre a planta e solo pelo P aplicado. Nesses dois estudos a adubação de P foi realizada por meio da fosfatagem com incorporação do fertilizante.

De modo geral, os solos brasileiros são altamente intemperizados e com altos teores de óxi-hidróxidos de Fe e Al, o que favorece a fixação de P (Novais et al., 2007). Além disso, é um nutriente de baixa mobilidade no solo, o que dificulta ainda mais o seu acesso à raiz (Novais e Smyth, 1999). Dessa forma, a correta utilização de fertilizantes fosfatados, como a fertilização localizada, seria uma medida para melhorar a eficiência de absorção deste nutriente pela planta (Santos et. al. 2008). A importância de se usar corretamente o P se dá por ele ser um nutriente de reservas finitas e, desta forma, deve ser utilizado de maneira mais eficiente e responsável, pois com as jazidas disponíveis atualmente estima-se haver reservas mundiais para apenas mais 50 a 90 anos, com seu pico de utilização entre os anos de 2030 e 2033 (Vance, 2001, Fixen, 2009, Leghari et al., 2016, Dhillon et al., 2017).

O P no sistema solo-planta apresenta atributos que, em geral, dificultam sua presença na solução do solo. O P-solução está em equilíbrio com o P-lábil, forma que, posteriormente, sofrerá fixação transformando-se em P-não-lábil, forma a qual a planta possui muito restrito acesso (Novais et al., 2007, Morales et al., 2013), dada a formação de ligações covalentes do fosfato com os óxi-hidróxidos de Fe e Al. Apesar de ser uma reação lenta, esta propriedade dos solos é a principal “concorrente” da planta para com o P dos fertilizantes fosfatados.

Solos com maiores teores de óxi-hidroxidos de Fe e Al possuem capacidade de adsorver P em grandes quantidades, tornando o solo um dreno muito forte deste nutriente (Fink et al., 2014). A capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em solos cultivados durante mais de 18 anos ultrapassa valores de  $4.500 \text{ mg kg}^{-1}$  na camada 0-20cm (Fink et al., 2014), o que corresponde a  $103,5 \text{ t ha}^{-1}$  de superfosfato simples.

Com a utilização de altas doses de P na cultura da cenoura podem ocorrer fatores negativos relacionados à dinâmica do nutriente no solo e à resposta da planta a altas doses. Araújo et al. (2004) demonstraram, por exemplo, que altas doses de P estão associadas à maior perda de matéria seca de cenoura após a colheita. O aumento de doses de P também pode diminuir os teores de Zn nos tecidos das plantas e aumentar a ocorrência da deficiência deste micronutriente (Carneiro et al., 2008; Muner et al., 2011), sintoma este que pode ocorrer pela formação de precipitados de fosfato de Zn. Por isso, faz-se necessário realizar a adubação de P em doses adequadas e de forma estratégica, a fim de não prejudicar a absorção de micronutrientes e diminuir as perdas para o solo na forma de P-não-lábil.

As plantas possuem dois principais mecanismos para se adaptar a baixa disponibilidade de P: processos que aumentam a absorção de P e processos que visam à eficiência de uso (Vance et al., 2003). De forma geral, as plantas têm como característica principal o aumento da absorção de P. Isso faz com que as estratégias mais adotadas pelas plantas para absorver P sejam aumentar volume de raiz, secretar ácidos orgânicos e estabelecer associação simbiótica com micorrizas (Smith et al., 2000, Verma et al., 2017).

O suprimento de P para a planta ocorre por meio de fluxo difusivo, de mobilidade restrita particularmente nos solos mais intemperizados com altos teores de óxi-hidróxidos de Fe e Al. O fluxo difusivo sofre influência do tipo de solo e de sua estruturação, sendo que solos com maior capacidade de adsorver P apresentam menor difusão (Fink et al.,

2016, Nascimento, 2016). Assim, estratégias de localização de P são ainda mais promissoras em solos argilosos e altamente intemperizados. Ainda existem outros fatores que influenciam o fluxo difusivo de P, como: a umidade e pH do solo, a quantidade e a fonte deste elemento (Novais e Smyth, 1999). A fonte do fertilizante fosfatado exerce sua importância no fluxo difusivo a depender o cátion acompanhante do ânion fosfato, sendo que os cátions de maior mobilidade resultam em maior difusão de P no solo (Novais e Smyth, 1999, Nascimento, 2016).

A difusão de elementos no solo é modelada pela Lei de Fick e dada pela seguinte equação (Barber, 1995; Novais et al.1999):

$$F = - D A (\delta c / \delta x)$$

Em que, F é o fluxo difusivo do elemento ( $\text{mol s}^{-1}$ ), resultado do produto do coeficiente de difusão (D) do elemento ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ), da superfície (A) de ocorrência da difusão ( $\text{cm}^2$ ) e da relação entre a diferencial ( $\delta c / \delta x$ ) da concentração do elemento ( $\text{mol cm}^{-3}$ ) e da distância de transporte (cm). A diferencial  $\delta c / \delta x$  representa o gradiente de concentração ao longo espaço que o elemento é transportado. O sinal negativo da equação se dá pela diminuição do  $\delta c$  à medida que se aumenta o  $\delta x$ . O coeficiente de difusão (D) é dado pela seguinte equação:

$$D = D_i \theta f (\delta I / \delta Q)$$

Em que, D ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) é resultado do produto do coeficiente de difusão do elemento em água ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ), teor de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), fator de impedância (adimensional) e da relação entre a diferencial do fator intensidade do elemento na solução do solo e do fator quantidade do elemento no solo (P-lábil). O valor de  $\delta I / \delta Q$  é o inverso do poder tampão do solo ( $\delta Q / \delta I$ ) ou fator capacidade, e representa o quanto do elemento na solução do solo está em equilíbrio com o P-lábil de modo a contribuir com o fluxo difusivo. Dessa forma, pode-se entender que quanto menor a distância de transporte através do fluxo difusivo, diminuindo o  $\delta x$ , maior será o fluxo difusivo do elemento, podendo aumentar a eficiência agrônômica e a recuperação do nutriente pela planta. O mesmo ocorre ao se aumentar a dose do elemento, aumenta-se o gradiente de concentração ( $\delta c / \delta x$ ) que possibilitará o maior transporte difusivo e, portanto, maior a eficiência agrônômica e de recuperação do nutriente.

Em experimento realizado por Costa et al. (2006), avaliou-se o fluxo difusivo ou difusão de P em amostras de cinco solos, submetidos a oito níveis de umidade e cinco doses de P. Os resultados corroboram com a equação da Lei de Fick, mostrando que o fluxo difusivo sofre influência da umidade do solo e da dose de P e de atributos do solo. A umidade maior do solo e doses mais elevadas de P mostraram-se mais eficientes para o fluxo difusivo.

O fluxo difusivo pode ser utilizado para calcular a extensão de depleção do nutriente, ou seja, qual a distância linear que este nutriente pode percorrer em um determinado tempo. Os valores de fluxo difusivo de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  são da ordem de  $2 \cdot 10^{-11} \text{ mol s}^{-1}$  (Novais e Smyth, 1999), que aplicados para o cálculo da extensão de depleção ( $\Delta x = (2 D t)^{1/2}$ ) encontram-se valores de  $0,013 \text{ mm dia}^{-1}$ . A distância que o P pode percorrer em um dia pode chegar a valores máximos de  $1 \text{ mm dia}^{-1}$  e não mais proporcional ao tempo em dias sucessivos (Heidari et al., 2016). Assim, a fonte de P que se encontrar aplicada a maiores distâncias da raiz não será acessada.

Portanto, a grandeza da dose de P aplicada para a cultura da cenoura e sua localização no solo tornam-se fatores fundamentais para a correta utilização do nutriente de forma sustentável, de modo aumentar a eficácia da adubação fosfatada (Miyazawa et al., 2011). O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de doses de uma fonte solúvel de P e de sua localização ótima para a cultura da cenoura, estimar a eficiência agronômica e a eficiência de recuperação de P pela cultura da cenoura como variável da dose aplicada e de sua interação com a localização da fonte de P.

## Material e Métodos

Neste trabalho foi utilizada a cultivar híbrida Maestro, recomendada para o cultivo de inverno na região do Alto Paranaíba. O solo utilizado no experimento foi uma amostra de um Latossolo Vermelho-Amarelo, previamente caracterizado química e fisicamente (pH água 4,86; P-rem 4,14 mg L<sup>-1</sup>; P-Mehlich-1 0,26 mg dm<sup>-3</sup>; K 45,00 mg dm<sup>-3</sup>; Ca 0,14 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg 0,15 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al 0,50 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; t 0,91 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; T 6,24 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V 6,49%; Argila 52,4%; Silte 17,0%; Areia 30,6%). A calagem foi realizada para atingir 75% de saturação por bases segundo recomendação de Trani et al. (2006), foram utilizados sacos plásticos preenchidos com o volume de solo correspondente ao vaso utilizado, em seguida o calcário foi misturado ao solo e aplicado água para atingir a capacidade de campo, em seguida o saco foi fechado e posicionado de cabeça para baixo, de modo a não perder o volume de água. Após 30 dias de incubação do calcário, o saco foi aberto para a evaporação da água. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Escola Estadual Agrotécnica Afonso Queiroz no espaço administrado pelo UNIPAM (Centro Universitário Patos de Minas), em Patos de Minas, MG. A irrigação foi realizada por aspersores, diariamente, durante o período experimental.

Os tratamentos constituíram de quatro doses de P, três localizações do fertilizante fosfatado e um controle, com cinco repetições, em um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 4x3+1. As doses utilizadas foram de 75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup> de P, o que corresponde a 1,62; 3,24; 6,47; 12,94 g vaso<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Como fonte de P foi utilizado o superfosfato-tríplo (ST), moído e passado em peneira de malha de 0,5 mm. O vaso principal utilizado no experimento foi feito de tubo de PVC com 200 mm de diâmetro e 500 mm de altura (15,70 L). O fundo do vaso foi fechado com placa de isopor e tela plástica, para permitir trocas gasosas e passagem do excesso de água. Para as diferentes localizações de P foram utilizados vasos secundários constituídos de tubos de PVC de 40, 100 e 200 mm de diâmetro e 300 mm de altura, que correspondem respectivamente aos volumes de 0,38; 2,36; 9,42 L e referem-se a 4, 25 e 100% do solo, posicionados no centro do vaso principal para acondicionar o solo que recebeu as diferentes doses de P (a localização de 200 mm de diâmetro foi constituído apenas do vaso principal). As diferentes doses de P foram colocadas dentro dos vasos secundários

que determinaram o tratamento de localização, conforme a figura 1. O solo tratado com a fonte de P teve sua localização definida pelo Volume 2 e o solo sem tratamento foi colocado no Volume 1, com a exceção do tratamento de localização de 200 mm de diâmetro, no qual teve-se apenas o vaso principal, em que, o solo sem tratamento foi colocado no fundo do vaso e o solo tratado com fonte de P foi colocado nos 300 mm superficiais.

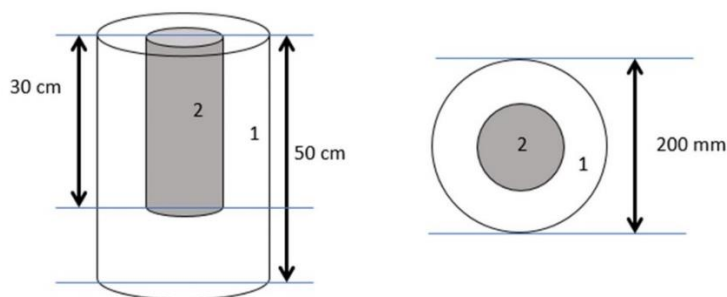


Figura 1 – Volume 1: vaso de tubo de PVC de 200 mm de diâmetro com 500 mm de comprimento (vaso principal). Volume 2 (vaso secundário) refere-se ao volume de solo que recebeu o tratamento com fertilizante fosfatado.

Após colocado o solo tratado no Volume 2, dentro do Volume 1, foi retirado o tubo, para permitir o crescimento das raízes e a aeração. Assim, o vaso secundário teve como objetivo apenas estabelecer a localização da fonte de P em volumes variáveis de solo dentro do vaso principal.

Foram colocadas para germinar seis sementes de cenoura por vaso e após a emergência realizou-se o raleio para que restassem apenas duas plantas. Para o suprimento adequado dos demais nutrientes a adubação de plantio contou com o equivalente a 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (0,475 g vaso<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 33% N) e 200 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (1,047 g vaso<sup>-1</sup> de KCl, 60% K<sub>2</sub>O). Esta adubação foi realizada nos 30 cm superficiais em cada vaso principal (15,70 L) separadamente. A adubação de cobertura foi feita aos 20, 30, 40, 50 e 60 dias após a semeadura, superficialmente em área total do vaso, com o equivalente a 70 kg ha<sup>-1</sup> de N (0,666 g vaso<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 33% N) e 300 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (1,570 g vaso<sup>-1</sup> de KCl, 60% K<sub>2</sub>O), divididos igualmente em cada aplicação. A fonte de N e K<sub>2</sub>O foram o nitrato de amônio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) e o cloreto de potássio (KCl) respectivamente. A adubação com micronutrientes contou com 1

mg dm<sup>-3</sup> de Cu, 1 mg dm<sup>-3</sup> de B e 3 mg dm<sup>-3</sup> de Zn, nas fontes sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>), bórax (Na<sub>2</sub>[B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>]·8H<sub>2</sub>O) e sulfato de zinco (ZnSO<sub>4</sub>).

Cada unidade experimental foi constituída da combinação de cada vaso secundário dentro do vaso principal. Foram avaliadas as seguintes características: comprimento e diâmetro da raiz, matéria de raízes frescas, matéria de folhas e de raiz secas, teores de P, Cu, Zn, Mn e Fe na folha e na raiz, eficiência agronômica e eficiência de recuperação de P.

A colheita foi realizada aos 95 dias após o plantio. O comprimento da raiz foi medido do ombro até a ponta, e o diâmetro foi verificado em paquímetro na porção mais larga da raiz. A matéria das raízes fresca foi determinada um dia após a colheita e lavagem para retirar o todo o solo. Para a lavagem da parte aérea e da raiz, foi utilizado apenas água corrente. Para a obtenção da matéria seca das folhas e da raiz foi realizada a secagem em estufa de circulação forçada de ar a temperatura de 70 °C durante 96 h. As amostras secas foram moídas em moinhos tipo Willey e, posteriormente, determinado os teores de P, Cu, Zn, Mn e Fe conforme método descrito pelo manual de análises do LASA UFV-CRP (Laboratório de Análise de Solo e Alimentos UFV-CRP) adaptado de Malavolta et al. (1997).

A eficiência agronômica (EA) (Eq. 1) e a eficiência de recuperação (ER) (Eq.2) de P foram calculadas segundo descrito por Fageria (2009). A eficiência agronômica representa o ganho de produção em relação ao controle por unidade de P aplicado, e a eficiência de recuperação de P representa a quantidade de P que a planta recupera em proporção ao P aplicado no solo. O cálculo desses índices foi realizado para cada unidade experimental em relação à média do tratamento controle.

$$EA = (P_{CAAd} - P_{SAd}) / Q_{Ap} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

EA = Eficiência Agronômica (g g<sup>-1</sup>)

P<sub>CAAd</sub> = Produtividade na parcela com adubação (g vaso<sup>-1</sup>)

P<sub>SAd</sub> = Produtividade na parcela sem adubação (g vaso<sup>-1</sup>)

Q<sub>Ap</sub> = Quantidade de nutriente aplicado no solo (g vaso<sup>-1</sup>)

$$ER = ((Q_{Ad} - Q_{NAd}) / Q_{Ap}) \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

ER = Eficiência de recuperação pela planta do fósforo aplicado via fertilizante (%)

$Q_{Ad}$  = Quantidade do nutriente absorvido pela planta na parcela adubada ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

$Q_{NAd}$  = Quantidade do nutriente absorvido pela planta na parcela não adubada ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

$Q_{Ap}$  = Quantidade de nutriente aplicado no solo ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

Após a colheita, foi feita análise de solo para determinar o teor de P disponível em cada tratamento, utilizando o extrator Mehlich-1. A amostra de solo de cada tratamento foi coletada o mais próximo do centro do vaso, e de profundidade 0 - 30 cm, de modo a amostrar a região que recebeu o tratamento com fertilizante fosfatado.

Os dados foram submetidos aos testes de Levene modificado por Brown & Forsythe (1974) e Jarque & Bera (1987) para avaliação das condições de homocedasticidade e normalidade, submetidos à análise de variância e, em seguida, à análise de variância da regressão para os modelos linear, quadrático, raiz e Mitscherlich. O efeito da localização do fertilizante fosfatado, em cada dose, foi comparado pelo teste SNK a 5% de probabilidade de erro. O programa utilizado para a análise estatística foi o SPEED Stat 1.0 (Carvalho et al., 2017).

## Resultados e Discussão

A matéria fresca da raiz (MF Raiz) apresentou diferenças estatísticas entre as doses e entre as localizações de P (Tabela 1). As maiores doses de P proporcionaram maior produção de MF Raiz quando estas foram aplicadas localizadamente, sendo aquela que apresentou a maior produção foi a de 100 mm. Observou-se que para o aumento na dose de P aplicado para a localização de 200 mm não houve incremento de produção, diferentemente do ocorrido com as localizações de 40 e 100 mm, em que com o aumento da dose de P houve incremento na MF Raiz (Tabela 2). A produção de matéria seca da raiz (MS Raiz) apresentou valores similares para todas as localizações em cada dose de P. Não foi possível obter modelo de regressão para a localização de 200 mm (Tabela 2). Observa-se que com a localização de 100 mm é possível atingir o valor máximo de MS Raiz em doses menores que nas demais localizações.

As matérias secas da parte aérea (MS PA) nas localizações de 40 e 200 mm não apresentaram diferenças significativas em resposta ao aumento da dose de P acima de 75 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O aumento da dose de P apenas conferiu aumento significativo da MS PA na localização de 100 mm (Tabela 2). Na maior dose de P a única localização que se destacou significativamente para a MS PA foi a de 100 mm (Tabela 2).

O comprimento e diâmetro da raiz apresentaram pequena resposta à dose acima de 150 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. (Tabela 2), já para a localização observou-se que aquela de 200 mm foi a que apresentou o menor valor em relação as localizações de 40 e 100 mm (Tabela 2), demonstrando o efeito positivo da menor localização da fonte de P para ganho de produtivo.

O teor de P na folha apresentou aumento linear com o aumento da dose de P, para a localização de 40 mm; para as outras localizações foram ajustados o modelo exponencial (Tabela 3). Entre as localizações testadas não houve diferença significativa para o teor de P na folha. Os teores foliares de Mn, Fe e Cu não foram alterados pela dose de P; entretanto, para as localizações utilizadas foi encontrado menor de teor foliar de Mn (Tabela 3) na localização de 200 mm. O teor foliar de Fe não foi influenciado pelos tratamentos. Diferente do esperado, o teor foliar de Zn não foi menor na localização de 40 mm (Tabela 3), pois esperava-se um efeito interativo negativo do teor foliar de Zn com o P aplicado no solo, uma vez que altas concentrações de P induzem a deficiência deste

nutriente (Sumner et al., 1986; Ova et al., 2015). O teor foliar de Cu foi maior na localização de 200 mm e menor na de 40 mm (Tabela 3), mostrando efeito interativo negativo da absorção desse micronutriente em relação ao aumento na concentração de P no solo, o que ocorreu com a localização da fonte de P em menor volume de solo (Shahid et al. 2016). Apesar das interações desses nutrientes com a dose de P, os teores foliares de Cu, Mn, Fe e Zn encontrados em todas as parcelas encontram-se dentro ou acima das faixas ótimas sugeridas pelo método DRIS e CND na colheita para a cenoura cultivada no Alto Paranaíba (Dezordi et al., 2016, Gonçalves et al., 2017).

Tabela 1: Análise de variância com a apresentação do teste F das variáveis analisadas. Fatores de variação (FV) e coeficiente de variação (C.V.).

FV	MF Raiz	MS Raiz	MS PA	Compr	Diâmetro	P Raiz	P Folha	Efi Rec	Efi Agro
Localização	10,58**	5,8**	5,27**	11,11**	13,74**	0,61 <sup>Ns</sup>	2,43 <sup>Ns</sup>	1,29 <sup>Ns</sup>	6,72**
Dose P	12,34**	4,84**	7,08**	10,88**	6,04**	7,44**	16,03**	116,29**	273,92**
Interação	1,39~	0,72 <sup>Ns</sup>	1,57~	3,67**	0,88 <sup>Ns</sup>	0,43 <sup>Ns</sup>	1,16 <sup>Ns</sup>	0,27 <sup>Ns</sup>	0,5 <sup>Ns</sup>
C.V.(%)	16,45	44,79	11,2	4,95	9,86	20,29	7,81	21,96	6,07

FV	Meh-1	Mn Folha	Fe Folha	Zn Folha	Cu Foha	Mn Raiz	Fe Raiz	Zn Raiz	Cu Raiz
Localização	480,27**	4,83*	0,17 <sup>Ns</sup>	3,98*	14,67**	5,51**	4,95*	0,07 <sup>Ns</sup>	4,05*
Dose P	187,04**	2,34 <sup>Ns</sup>	2,11 <sup>Ns</sup>	3,91*	1,37 <sup>Ns</sup>	5,41**	2,8*	2,53 <sup>Ns</sup>	3,43*
Interação	3,88**	1,34 <sup>Ns</sup>	1,21 <sup>Ns</sup>	1,55~	1,39~	5,72**	0,75 <sup>Ns</sup>	0,59 <sup>Ns</sup>	0,43 <sup>Ns</sup>
C.V.(%)	10,36	13,51	38,43	17,38	9,93	20,68	23,05	14,98	18,41

Matéria fresca da raiz (MF Raiz), matéria seca raiz (MS Raiz) transformação Rank, matéria seca da parte aérea (MS PA), comprimento da raiz (Compr) transformação raiz(x), diâmetro da raiz (Diâmetro), teor de P na raiz (P Raiz), teor foliar de P (P Folha) transformação raiz(x), eficiência de recuperação (Efi Rec) transformação Rank, eficiência agrônômica (Efi Agro) transformação raiz cúbica (x), fósforo disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 (Mehlich-1) transformação Rank, teor foliar de Mn (Mn Folha) transformação raiz(x), teor foliar de Fe (Fe Folha), teor foliar de Zn (Zn Folha), teor foliar de Cu (Cu Folha), teor de Mn na raiz (Mn Raiz) transformação Box-Cox (x+1),  $\lambda=1,5$ , teor de Fe na raiz (Fe Raiz), teor de Zn na raiz (Zn Raiz) e teor de Cu na raiz (Cu Raiz). Ns: não significativo. ~, °, \*, \*\* significativos ao nível de 25, 10, 5 e 1% pelo teste F.

Tabela 2: Valores de médias da matéria fresca da raiz (MF Raiz), matéria seca da parte aérea (MS PA), matéria seca da raiz (MS Raiz), comprimento e diâmetro de cenoura em função das doses (75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup>) e localizações da fonte de P em diâmetro (40, 100 e 200 mm) de um cilindro no meio do vaso principal (200 mm) e modelos ajustados para os resultados transformados.

MF Raiz							
Localização (diâmetro)	Dose de P (mg dm <sup>-3</sup> )					Modelo	R <sup>2</sup>
	0	75	150	300	600		
mm	g/vaso						
40	11,12	157,25 a	188,85 ab	163,78 a	230,24 a	$\hat{y} = 11,43 + 207,3x / (34,03 + x)$	0,9367**
100		161,56 a	219,30 a	198,07 a	243,24 a	$\hat{y} = 10,95 + 237x / (38,31 + x)$	0,9692*
200		153,38 a	170,44 b	157,56 a	176,50 b	$\hat{y} = 11,09 + 157,3[1 - e^{-(0,03181x)}]$	0,9898**
MS PA							
mm	g/vaso						
40	9,31	16,10 a	17,54 a	15,96 a	19,12 b	$\hat{y} = 9,316 + 9,079x / (26,58 + x)$	0,9221**
100		16,74 a	19,24 a	18,64 a	22,14 a	$\hat{y} = 9,339 + 13,02x / (58,95 + x)$	0,9602**
200		18,55 a	17,26 a	17,75 a	19,12 b	$\hat{y} = 9,308 + 8,936x / (1,334 + x)$	0,9686**
MS Raiz							
mm	g/vaso						
40	9,20	25,37 a	27,25 a	25,98 a	32,23 a	$\hat{y} = 9,239 + 21,72x / (30,6 + x)$	0,9514**
100		25,88 a	31,30 a	28,02 a	32,76 a	$\hat{y} = 9,157 + 21,72[1 - e^{-(0,0209x)}]$	0,9622**
200		23,49 a	27,61 a	22,82 a	25,28 a	$\hat{y} = 9,184 + 15,96[1 - e^{-(0,03389x)}]$	0,9416**
Comprimento							
mm	cm						
40	4,62	21,15 a	22,07 a	21,20 a	23,08 a	$\hat{y} = 4,62 + 17,52[1 - e^{-(0,03834x)}]$	0,9927**
100		19,72 a	22,45 a	20,88 a	24,53 a	$\hat{y} = 4,62 + 18,17[1 - e^{-(0,02381x)}]$	0,9736**
200		17,01 b	23,81 a	17,79 b	19,03 b	$\hat{y} = 4,554 + 15,42[1 - e^{-(0,02768x)}]$	0,8848*
Diâmetro							
mm	cm						
40	0,55	2,99 a	3,18 ab	2,97 a	3,44 a	$\hat{y} = 0,5501 + 2,653[1 - e^{-(0,03355x)}]$	0,98**
100		2,99 a	3,35 a	3,27 a	3,31 ab	$\hat{y} = 0,5492 + 2,768[1 - e^{-(0,0291x)}]$	0,9988**
200		2,46 b	2,85 b	2,89 a	2,96 b	$\hat{y} = 0,5497 + 2,38[1 - e^{-(0,02175x)}]$	0,9995**

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5% de probabilidade. Dose 0 se refere ao controle. \*, \*\*: modelos de regressão significativos associados a falta de ajuste não significativo a 1 e 5 %; n.a. não ajuste de modelo de regressão pelo teste F, seguindo variáveis transformadas da Tabela 1.

O teor de P na raiz não sofreu alterações significativas com a localização; entretanto, foi observado que o aumento da dose de P influenciou, positivamente, o teor de P na raiz, com aumento linear, para a localização de 200 mm (Tabela 4). O teor de Zn na raiz não apresentou diferença estatística entre os tratamentos de localização (Tabela 1). Por outro lado, o teor de Mn na raiz apresentou comportamento linear para a

localização de 40 mm e exponencial negativo para a localização de 200 mm (Tabela 4). O aumento na dose de P influenciou positivamente os teores de Mn e Fe na raiz para a localização de 40 mm, já os teores de Zn e Cu na raiz não foram influenciados pelo aumento na dose de P (Tabela 4). Esperava-se encontrar maiores teores de P na folha e raiz com na localização de 40 mm, devido ao aumento a relação entre o diferencial da concentração do elemento pela distância de transporte ( $\delta c/\delta x$ ), já que a concentração do nutriente no volume de solo próximo a planta é maior e este encontra-se mais próximo da raiz, o que facilita a difusão de P e, conseqüentemente, sua maior absorção pela planta (Barber, 1995; Novais et al.1999).

Para o teor de P disponível pelo Mehlich-1 (Tabela 5) foi observado que tanto as doses como as localizações alteraram significativamente seus valores. A localização da fonte de P influenciou de forma positiva os teores de P disponível no solo, para as localizações mais restritas do fertilizante maior foi a concentração deste nutriente no solo. A dose do fertilizante aumentou de forma exponencial o P disponível após o cultivo. Semelhantemente, a localização da fonte solúvel permitiu o aumento do teor deste nutriente em menor volume de solo, diminuindo a capacidade do poder tampão do solo em transformar a fonte solúvel (P-lábil) em P-não-lábil, mantendo-o disponível mesmo após o término do cultivo. Quando a mesma dose da fonte solúvel foi aplicada em maior volume de solo (200 mm), este permitiu maior ação dos óxi-hidroxidos de Fe e Al e favoreceu a fixação de P, diminuindo o teor de P-disponível, uma vez que a baixa disponibilidade inicial de P (P-Mehlich 0,26 mg dm<sup>-3</sup>) contribuiu para o efeito tampão no solo (Novais et al., 2017; Morales et al., 2013).

A utilização de uma fonte solúvel de P facilita a difusão (Novais & Smyth, 1999), diferente da utilização de fosfatos polimerizados ou organominerais, que apresentam menores valores de fluxo difusivo (Stauffer, 2016). O fato de se ter utilizado uma fonte solúvel poderia ter diminuído o efeito de localização do P; entretanto, o efeito de localização foi observado, uma vez que, a distância que o P pode percorrer em um dia chega a valores máximos de 1 mm (Heidari et al., 2016).

Tabela 3 - Valores de médias dos teores foliares de P, Cu, Fe, Mn, e Zn de cenoura em função das doses (75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup>) e localizações da fonte de P em diâmetro (40, 100 e 200 mm) de um cilindro no meio do vaso principal (200 mm) e modelos ajustados para os resultados transformados.

P Folha							
Localização (diâmetro)	Dose de P (mg dm <sup>-3</sup> )					Modelo	R <sup>2</sup>
	0	75	150	300	600		
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	2,22	2,04 a	2,02 a	2,57 a	2,62 a	$\hat{y} = 2,074 + 0,000975x$	0,6512**
100		2,06 a	1,93 a	2,09 a	2,93 a	$\hat{y} = 2,195 - 0,00226x + 0,000006x^2$	0,9904**
200		2,04 a	2,26 a	2,60 a	3,08 a	$\hat{y} = 2,187 + 0,00271x - 0,02867x^{0,5}$	0,9688**
Cu Folha							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	0,38	0,33 a	0,30 b	0,27 b	0,28 b	$\hat{y} = 0,2776 + 0,1053e^{(-0,01027x)}$	0,9869**
100		0,31 a	0,34 ab	0,32 ab	0,32 b	$\hat{y} = 0,3782 + 0,000212x - 0,00738x^{0,5}$	0,7823**
200		0,34 a	0,36 a	0,34 a	0,37 a	$\hat{y} = 0,3807 + 0,000167x - 0,00477x^{0,5}$	0,6270
Fe Folha							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	40,24	31,53 a	32,57 a	40,27 a	39,75 a	$\hat{y} = 39,16 + 0,04181x - 0,9323x^{0,5}$	0,5462
100		40,47 a	32,00 a	35,60 a	41,29 a	$\hat{y} = 40,69 - 0,0454x + 0,000078x^2$	0,6349
200		22,26 a	37,54 a	29,65 a	49,59 a	$\hat{y} = 39,49 + 0,1044x - 2,161x^{0,5}$	0,6927*
Mn Folha							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	6,72	13,25 a	18,84 a	14,13 a	17,83 a	$\hat{y} = 6,596 + 10,22[1 - e^{(-0,01901x)}]$	0,8235**
100		16,71 a	18,40 a	16,31 a	25,40 a	$\hat{y} = 7,607 - 0,00847x + 0,8775x^{0,5}$	0,8615**
200		14,61 a	17,04 a	12,63 a	10,91 b	$\hat{y} = 7,044 - 0,04511x + 1,235x^{0,5}$	0,8611**
Zn Folha							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	0,78	0,74 a	0,73 a	0,54 a	0,58 b	$\hat{y} = 0,7565 - 0,000365x$	0,6865*
100		0,70 a	0,79 a	0,65 a	0,83 a	$\hat{y} = 0,8313 - 0,000788x + 0,000001x^2$	0,4711
200		0,77 a	0,84 a	0,70 a	0,68 ab	$\hat{y} = 0,7934 - 0,000129x^2$	0,5748

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5% de probabilidade. Dose 0 se refere ao controle. \*, \*\*: modelos de regressão significativos associados a falta de ajuste não significativo a 1 e 5 %; n.a. não ajuste de modelo de regressão pelo teste F, seguindo variáveis transformadas da Tabela 1.

Tabela 4 – Valores de médias dos teores de P, Cu, Fe, Mn e Zn na raiz de cenoura em função das doses (75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup>) e localizações da fonte de P em diâmetro (40, 100 e 200 mm) de um cilindro no meio do vaso principal (200 mm) e modelos ajustados para os resultados transformados.

P Raiz							
Localização (diâmetro)	Dose de P (mg dm <sup>-3</sup> )					Modelo	R <sup>2</sup>
	0	75	150	300	600		
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	4,43	3,96 a	4,74 a	4,58 a	5,27 a	$\hat{y} = 4,379 + 0,00299x - 0,03627x^{0,5}$	0,7347
100		3,98 a	4,22 a	4,71 a	5,79 a	$\hat{y} = 4,409 + 0,0061x - 0,0919x^{0,5}$	0,9929**
200		4,29 a	4,34 a	5,27 a	5,89 a	$\hat{y} = 4,386 + 0,00437x - 0,04179x^{0,5}$	0,9294
Cu Raiz							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	0,35	0,28 a	0,31 a	0,37 a	0,28 a	$\hat{y} = 0,3111 + 0,000207x - 0x^2$	0,2332
100		0,31 a	0,33 a	0,33 a	0,27 a	$\hat{y} = 0,3197 + 0,000344x - 0,000001x^2$	0,5510
200		0,34 a	0,37 a	0,38 a	0,33 a	$\hat{y} = 0,4212 - 0,00144x + 0,02915x^{0,5}$	0,2834
Fe Raiz							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	7,13	4,22 a	5,42 a	5,37 a	6,06 ab	$\hat{y} = 6,92 + 0,01139x - 0,3064x^{0,5}$	0,7137*
100		4,92 a	5,76 a	6,54 a	5,24 b	$\hat{y} = 6,821 + 0,00363x - 0,1371x^{0,5}$	0,3262
200		5,88 a	6,13 a	6,84 a	7,46 a	$\hat{y} = 7,03 + 0,00769x - 0,1651x^{0,5}$	0,8566*
Mn Raiz							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	10,88	11,23 b	14,72 a	13,57 a	15,99 a	$\hat{y} = 10,72 + 7,651x / (309,2 + x)$	0,7879
100		11,92 ab	16,69 a	14,89 a	17,78 a	$\hat{y} = 10,7 + 6,817[1 - e^{-(0,00587x)}]0,7794^{**}$	0,7794**
200		16,87 a	14,58 a	13,14 a	10,80 b	$\hat{y} = 11,36 - 0,02977x + 0,685x^{0,5}$	0,7886**
Zn Raiz							
mm	mg g <sup>-1</sup>						
40	0,77	0,75 a	0,83 a	0,87 a	0,79 a	$\hat{y} = 0,7478 + 0,000655x - 0,000001x^2$	0,7486
100		0,80 a	0,89 a	0,81 a	0,79 a	$\hat{y} = 0,7689 - 0,000399x + 0,01064x^{0,5}$	0,4985
200		0,80 a	0,93 a	0,83 a	0,73 a	$\hat{y} = 0,8897 - 0,00285x + 0,05872x^{0,5}$	0,3797

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5% de probabilidade. Dose 0 se refere ao controle. \*, \*\*: modelos de regressão significativos associados a falta de ajuste não significativo a 1 e 5 %; n.a. não ajuste de modelo de regressão pelo teste F, seguindo variáveis transformadas da Tabela 1.

Tabela 5 - Valores de médias do P-disponível pelo extrator Mehlich-1 (P-Mehlich-1), eficiência agrônômica e de recuperação de P da cenoura em função das doses (75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup>) e localizações da fonte de P em diâmetro (40, 100 e 200 mm) de um cilindro no meio do vaso principal (200 mm) e modelos ajustados para os resultados transformados.

P-Mehlich-1							
Localização (diâmetro)	Dose de P (mg dm <sup>-3</sup> )					Modelo	R <sup>2</sup>
mm	0	75	150	300	600		
40	0,13	1,06 a	4,27 a	12,44 a	26,20 a	$\hat{y} = -0,0529 + 0,05735x - 0,3213x^{0,5}$	0,9976
100		0,39 b	0,93 b	2,89 b	10,99 b	$\hat{y} = 0,1639 + 0,000409x + 0,000029x^2$	0,9999**
200		0,13 c	0,30 c	0,39 c	0,88 c	$\hat{y} = -0,4034 + 0,5184e^{(0,0015x)}$	0,9862**
Eficiência Agrônômica							
mm	g g <sup>-1</sup>						
40		90,20 a	54,86 ab	23,59 a	16,93 a	$\hat{y} = 220,9 + 0,427x - 18,79x^{0,5}$	1**
100		92,87 a	64,25 a	28,89 a	17,94 a	$\hat{y} = 124,2 - 0,4623x + 0,000476x^2$	0,9993**
200		87,81 a	49,17 b	22,63 a	12,78 a	$\hat{y} = 12,7 + 151,5e^{(-0,00939x)}$	0,9996**
Eficiência de Recuperação							
mm	%						
40		5,91 a	3,93 a	1,88 a	1,36 a	$\hat{y} = 13,55 + 0,024x - 1,086x^{0,5}$	0,9991**
100		6,18 a	4,06 a	2,06 a	1,64 a	$\hat{y} = 14,21 + 0,026x - 1,15x^{0,5}$	0,9998**
200		6,28 a	3,72 a	1,95 a	1,31 a	$\hat{y} = 1,299 + 10,03e^{(-0,00938x)}$	0,9997**

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5% de probabilidade. Dose 0 se refere ao controle. \*, \*\*: modelos de regressão significativos associados a falta de ajuste não significativo a 1 e 5 %; n.a. não ajuste de modelo de regressão pelo teste F, seguindo variáveis transformadas da Tabela 1.

A eficiência agrônômica (EA) demonstrou ser mais alta nas menores doses. Nas doses mais altas ela se torna menor, devido a não compensação de incremento de produção para a dose de P nesta condição. Cabe destacar que a EA atinge os valores mais baixos a partir de doses acima de 300 mg dm<sup>-3</sup> de P (Tabela 5). Ainda assim, há ganho de crescimento com o aumento da dose. Na localização de 100 mm obtiveram-se as maiores produções de MF Raiz e o melhor ganho por unidade de P aplicado; portanto, esta torna-se a localização ótima da fonte solúvel de P para a cenoura. Esta localização destaca-se por possuir em seu volume de solo a maior parte de raízes ativas para absorção de P, água e de outros nutrientes. A localização de 40 mm foi ocupada preferencialmente pela própria raiz tuberosa da cenoura, que obteve diâmetro médio de 30,5 mm, o que justifica a menor eficiência desta localização em relação a de 100 mm. Já na localização de 200 mm a difusão de P é dificultada pela menor concentração do nutriente no volume

de solo e pela maior distância necessária para a difusão de P para absorção das raízes, sendo necessárias altas doses de P para que este tenha ganhos maiores de produção.

A eficiência de recuperação (ER) possui comportamento similar à EA para as doses de fertilizante. O aumento da dose de P influencia negativamente a ER (Tabela 5). Os valores obtidos da ER variaram de 1,31 a 6,28 %, similares ao valor mínimo de 1,99 % encontrado por Gonçalves (2018), e máximo de 5,61 % encontrado por Assunção et al. (2016) para diferentes cultivares. Este trabalho corroborou para a afirmação, de que a cenoura possui baixa eficiência de recuperação do P aplicado no solo, diferente da planta de milho que recupera de 32 a 38 % em solo argiloso e em mais de 60 % em solo arenoso (Sá et al. 2017). Diferente da EA, para a ER não houve significância no efeito de localização da fonte de P, provavelmente pela baixa ER apresentada pela cultura da cenoura. Este resultado semelhante foi encontrado por Gonçalves (2018).

O aumento na dose de P no maior volume de solo (200 mm) não apresentou ganhos de produção de MF e MS de raiz; entretanto, para as localizações de 40 e 100 mm o aumento da dose de P foi influenciado positivamente. Dentre as localizações testadas, a intermediária (100mm) apresentou os maiores incrementos de produção.

## **Conclusões**

O aumento de doses de P incrementa a produção de cenoura e diminui a eficiência agronômica e de recuperação de P. A aplicação mais localizada da fonte solúvel de P não influenciou no teor foliar e na raiz desse nutriente, mas aumenta o teor de P-disponível no solo.

A aplicação mais localizada de fonte solúvel de P é uma alternativa viável para diminuição das doses utilizadas, destacando que a melhor localização da fonte solúvel de P é a de 100 mm para a cultura da cenoura, por obter maior produção de MF Raiz e conferir maior EA para o uso do fertilizante.

## Referências

- ARAÚJO, C.; ZÁRATE, N. A. H.; VIEIRA, M. C. Produção e perda de massa pós-colheita de cenoura 'Brasília', considerando doses de fósforo e de cama de frango semidecomposta. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 26, n. 2, p. 131-138, Maringá, PR, 2004.
- ASSUNÇÃO, N. S.; CLEMENTE, J. M.; AQUINO, L. A.; DEZORDI, L. R.; SANTOS, L. P. D. Carrot yield and recovery efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium. **Revista Caatinga**. v. 29, n. 4, p. 859-865, Mossoró, RN, 2016.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. p.330-338.
- BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust tests for the equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, v.69, n.346, p. 364-367, 1974.
- CARNEIRO, L. F.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L; LAGO, F. J. Fontes, doses e modo de aplicação de fósforo na interação fósforo-zinco em milho. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, MG, v.32, n.4, p.1133-1141, 2008.
- CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q. SPEED Stat: a minimalist and intuitive spreadsheet program for classical experimental statistics. **Anais da 62ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria**, 333pp. 2017.
- CECILIO FILHO, A. B.; PEIXOTO, F. C. Acúmulo e exportação de nutrientes em cenoura 'Forto'. **Revista Caatinga**. v. 26, n. 1, p.64-70, Mossoró, 2013.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H., Editores **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, 1999. 359p.
- COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.10, n.4, p.828-835, 2006.

DEZORDI, L. R.; AQUINO, L. A.; NOVAIS, R. F.; AQUINO, P. M.; SANTOS, L. P. D. Nutrient recommendation model for carrot crop – FERTICALC Carrot. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1714-1722, 2015.

DHILLON, J.; TORRES, G.; DRIVER, E.; FIGUEIREDO, B.; RAUN, W. R.; World phosphorus use efficiency in cereal crops. **Agronomy Journal**. v.109, n. 4, 2017.

FAGERIA, N. K. **The use of nutrients in crop plants**. Florida. Taylor & Francis Group. 2009. 430p.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; SÁNCHEZ-RODRIGÉZ, A. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corns seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Biology and Fertility of Soils**. v. 52, p. 203-201, 2016.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAYER, C.; TORRENT, J. BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems, **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá. v.36, n.3, p. 379-387, 2014.

FIXEN, P. E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**, n. 126, p 8-14. 2009.

GONCALVES, F. A. R.; AQUINO, L. A.; DEZORDI, L. R.; CLEMENTE, J. M.; NOVAIS, R. F. DRIS indices in three phenological stages of the carrot crop. **Pesquisa Agropecuaria Tropical (Online)**, v. 47, p. 31-40, 2017.

GONÇALVES, F. A. R. **Modos de aplicação de fósforo na cultura da cenoura e adsorção iônica em biochar de batata**. 2018. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba, Rio Paranaíba.

HEIDARI, S. REYHANITABAR, A.; OUSTAN, S. The comparison of Olsen, DMT-HFO, and DGT methods for assessment of plant available phosphorus in soils. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**. v.6, n.1, 2016.

JARQUE, C. M.; BERA, A. K. A test for normality of observations and regression residuals. **International Statistical Review**, v. 55(2), p. 163-172, 1987.

LEGHARI, S. J.; BURIRO, M.; JOGI, Q.; KANDHRO, M. N.; LEGHARI, A. J. Depletion of phosphorus reserve, a big threat to agriculture: challenges and opportunities. **Sci Int (Lahore)**, v.28 (3), p.2697-2702, 2016.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ed. Piracicaba. Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo – Potafos. 1997. 319p.

MIYASAWA, K.; TAKEDA, M.; MARAYAMA, T.; WATANABE, K. Combining pre-transplanting phosphorus application and green manure incorporation: a trial for reducing fertilizer input. **Soil Science & Plant Nutrition**. n. 57, p.128-137, 2011.

MUNER, L. H.; RUIZ, H. A.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S. Disponibilidade de zinco para milho em resposta à localização de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.15, n.1, p.29-36, 2011.

NASCIMENTO, C. A. C. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MORALES, M. M.; COMERFORD, N.; GUERRINI, I. A.; FALCÃO N. P. S.; REEVES, J. B. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar-soil mixtures. **Soil Use and Management**, v. 29, n. 3, p. 306–314, 2013.

NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. & NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. **Fósforo em solos e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OVA, E. A.; KUTMAN, U. B.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. **Plant and Soil**, v. 393, n. 1–2, p. 147–162, 2015.

SÁ, J. M.; JANTALIA, C. P.; TEIXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. M.; ARAÚJO, A. P. Agronomic and P recovery efficiency of organomineral phosphate fertilizer from poultry litter in sandy and clayey soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 9, p. 786–793, 2017.

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.32, no.2, p.705-714. ISSN 0100-0683. 2008.

SMITH, F. A.; JAKOBSEN, I.; SMITH, S. E. Spatial differences in acquisitions of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Mendicago trumcatula*. **New Phytologist**. v. 147, p. 357-366, 2000.

SHAHID, M.; SHUKLA, A. K.; BHATTACHARYYA, P.; TRIPATHI, R.; MOHANTY, S.; KUMAR, A.; LAL, B.; GAUTAN, P.; RAJA, R.; PANDA, B. B.; DAS, B.; NAYAK, A. K. Micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu) balance under long-term application of fertilizer and manure in a tropical rice-rice system. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, n. 3, p. 737–747, 2016.

STAUFFER, E. **Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo**. 2016. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

SUMNER, M. E., FARINA M. P. W. **Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems**. In: STEWART, B. A. (editor) *Advances in Soil Science*. v. 5. Springer, New York, NY, 1986.

TRANI, P. E.; MINAMI, K.; RAIJ, B. V.; SAKAI, E.; MELLO, S. C.; TIVELLI, S. W.; Calagem em cultivos sucessivos de cenoura e alface. **Horticultura Brasileira**. v. 24, n. 1, 2006.

VANCE, P. C. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition on a world of declining renewable resources. **Plant Physiology**, v. 127, p. 390-397, 2001.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for a securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**. v. 157, p.423-447, 2003.

VERMA, A. K.; YADAV, B.; KUMAWAT, C. Rhizosphere management strategies for enhance phosphorus utilization by crops: An overview. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. v. 6, n. 4, p. 446–452, 2017.

## **CAPÍTULO II – EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR SOBRE A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO.**

### **Resumo**

Biocarvão ou biochar é o resultado da pirólise de materiais orgânicos. O biochar pode ser utilizado como adsorvente de poluentes no ar e na água e como condicionador químico, físico e microbiano do solo. O tipo de solo e o material de origem do biochar influenciam na sua eficiência quando utilizado. O biochar, geralmente, possui em sua maioria cargas negativas e, portanto, atua como concorrente da adsorção do fosfato com o solo, podendo influenciar na disponibilidade de P para a planta. O objetivo deste trabalho foi estudar o crescimento de uma planta indicadora, o milho, em resposta a épocas diferentes de aplicação de biochar em relação ao fosfato. O experimento foi estruturado em um esquema fatorial  $3 \times 5 \times 2 + 1$  sendo três doses do biochar (10, 20 e 40 t  $ha^{-1}$ ), cinco épocas de aplicação biochar (28B - aplicação de biochar 28 dias antes do plantio e aplicação de P no dia do plantio; 14B - aplicação de biochar 14 dias antes do plantio e P no dia do plantio; 0PB - aplicação de biochar e P no dia do plantio; 14P - aplicação de P 14 dias antes do plantio e biochar no dia do plantio e 28P - aplicação de P 28 dias antes do plantio e biochar no dia do plantio), e duas doses de P (250 e 500  $mg\ dm^{-3}$  de P), mais um controle, sem a aplicação de biochar e de P, com quatro repetições em um delineamento inteiramente casualizado, em casa de vegetação. Não houve efeito significativo da aplicação das doses de biochar para a maioria das variáveis estudadas. Os conteúdos foliares de P, Mn e Cu não foram influenciados pela época de aplicação do biochar. A disponibilidade de P no solo, após o cultivo por 35 dias, foi maior quando mais próximo do plantio o P foi aplicado. A aplicação antecipada da fonte de P ou em conjunto com o biochar aumentou a disponibilidade deste nutriente no solo.

**Palavras-chave:** condicionador de solo, milho, conteúdo foliar de P.

## **Abstract**

Biochar is the result of organic materials pyrolysis. Biochar can be used as an adsorbent for pollutants in air and water and as a chemical, physical and microbial soil conditioner. The type of soil and the biochar material origin influence its efficiency when used. The biochar usually has negative charges and therefore acts as a competitor of the adsorption of phosphate with the soil, and may influence the availability of P to the plant. The objective of this work was to study the growth of an indicator plant, maize, in response to different times of biochar application in relation to phosphate. The experiment was structured in a  $3 \times 5 \times 2 + 1$  factorial scheme with three biochar doses (10, 20 and 40 t  $\text{ha}^{-1}$ ), five biochar application times (28B - application of biochar 28 days before planting and application of P on planting day; 14B - application of biochar 14 days before planting and P on planting day; 0PB - application of biochar and P on planting day; 14P - application of P 14 days before planting and biochar on planting day; and 28P - application of P 28 days before planting and biochar on planting day), and two doses of P (250 and 500  $\text{mg dm}^{-3}$  de P), plus one control, without biochar and P application, with four replicates in a completely randomized design in greenhouse. There was no significant effect of applying the biochar doses to most of the studied variables on plant growth. The leaf contents of P, Mn, Cu and Zn were not influenced by the biochar application time. The P availability in the soil, after cultivation of 35 days, was higher when nearer to the planting the P was applied. Early application of the source of P or in conjunction with biochar increased the availability of this nutrient in the soil.

**Keywords:** soil conditioner, corn, leaf content of P.

## Introdução

O biochar ou biocarvão é um material resultante do processo de pirólise de resíduos vegetal ou animal, sob atmosfera de  $N_2$ , em ambiente hipóxico (Lehman e Joseph, 2015). O biochar possui variados usos como adsorvente de poluentes do ar e água e, como condicionador de solo (Cha et al., 2016). Recentemente tem-se observado aumento nos estudos sobre este resíduo (Novotny et al., 2015; Novais, 2018).

Compostos orgânicos como os ácidos cítrico, oxálico, húmico, salicílico, têm sido estudados para utilização na agricultura em conjunto com fosfato para diminuir o efeito de adsorção de fósforo (P). Andrade et al (2003) chegaram à conclusão que estes ácidos orgânicos competem pelos sítios de adsorção de P ou bloqueiam a superfície destes, aumentando a disponibilidade de P. Este fato é mais evidente quando ácidos orgânicos são adicionados em doses maiores em relação ao P aplicado no solo e quando são aplicados anteriormente à aplicação do fosfato. Os ácidos orgânicos quando aplicados após o fosfato não foram capazes diminuir a adsorção de P, indicando que a energia de ligação do P com óxi-hidroxidos de Fe e Al do solo, por exemplo, são mais estáveis que a formação de complexos ácido orgânico/fosfato (Andrade et al., 2003; Lehman e Joseph, 2015). Entretanto, se forem aplicados em conjunto ácido orgânico e fosfato podem diminuir, embora de maneira menos efetiva, a adsorção de P pelo solo.

Tem-se observado diferentes efeitos do uso de biochar no solo; entre eles a capacidade de retenção de água, aumento da porosidade do solo, aumento do teor de matéria orgânica, diminuição da acidez do solo, aumento da CTC do solo, aumento de produção vegetal, aumento da atividade microbiana, adsorção de produtos químicos e diminuição na emissão de  $N_2O$  (Novotny et al., 2015; Tan et al., 2017; Novais et al., 2018). Estes efeitos positivos dependem da quantidade de argila do solo (Carvalho, 2015), do material de origem e do processo de pirólise (Cha et al., 2016; Nobrega, 2011). Biochar produzidos em altas temperaturas (550 °C) possuem maior fração de carbono estável, e conseqüentemente, os biochar produzidos em baixa temperatura (350 °C) possuem estruturas mais lábeis e cadeias aromáticas de baixa recalcitrância, responsáveis pela sua maior reatividade no solo (Alho et al., 2013; Novais, 2018). Em solos muito argilosos, o uso do biochar diminui a densidade do solo, o que é benéfico para a penetração de raízes; entretanto, estes solos podem não sofrer influência na porosidade, na capacidade de

campo e no estoque de água disponível (Obia et al., 2018). Solos que permitem maior crescimento de raízes condicionam melhor absorção de nutrientes e, solos de menor densidade são, em sua maioria, menos compactados que, por sua vez, permitem maior difusão do P (Novais e Smyth, 1999; Zhang et al., 2016). A difusão facilitada de P contribui para o maior acúmulo desse nutriente nas plantas (Novais et al., 2007; Stauffer, 2016).

O biochar tem demonstrado efeitos positivos em plantas de milho induzidas a condições de estresse hídrico, apresentando ganhos de biomassa de até 200 % (Pandit et al., 2018). Esses resultados são obtidos graças ao aumento na capacidade de campo que o biochar confere ao solo (Pandit et al., 2018). Outro efeito positivo encontrado com o uso do biochar é o aumento do uso eficiente da água, que é mais notado em solos arenosos (Lima et al., 2018). Isto se justificaria pelo fato de os solos arenosos possuírem menor quantidade de microporos e conseqüentemente menor capacidade de retenção de água, já com o biochar teriam capacidade de retenção de água similar a dos solos argilosos. A consequência na melhoria das condições de disponibilidade de água do solo permite, por exemplo melhor uso de N e de P (Lima et al., 2018). O P é um macronutriente essencial requerido pelas plantas, tem importância principal na armazenagem e transporte de energia (ATP) e como componente em ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, etc (Taiz & Zieger, et al., 2017). A disponibilidade ou a falta de P na planta implica diretamente na fotossíntese, pois no processo a presença de P para a formação do ATP é fundamental. Logo plantas com baixa disponibilidade de P terão seu crescimento alterado e, conseqüentemente, menor fotossíntese (Longstreth et al., 1980; Reich et al., 2009; Timlin et al., 2017).

Em estudos recentes a interação do biochar com o P aplicado no solo foi observada. A adsorção de P pelo solo é mais eficiente que a adsorção de P pelo biochar (Dari et al., 2016), entretanto por esta adsorção de P pelo biochar ser menor, este poderia estar mais disponível para as plantas ao longo do tempo. Ainda, segundo Hale et al. (2013), não houve adsorção de P antes do biochar ser “lavado” após sua produção, eliminando cinzas e elementos solúveis, mas após a lavagem a adsorção pode ocorrer, o que indica que o biochar possui cargas possíveis de realizarem ligações com P, mas que as mesmas não podem estar bloqueadas. Entretanto, o mesmo não acontece com o N ( $\text{NO}_3^-$ ), que pode ser adsorvido fracamente pelo biochar não lavado, provavelmente por uma troca iônica na superfície do biochar (Hale et al., 2013).

Estes elementos ligados aos sítios de adsorção do biochar podem ser nutrientes ou metais pesados. Geralmente, o nutriente mais característico presente no biochar é o K e, a presença do mesmo pode elevar os teores deste nutriente no solo (Silva, 2011). Solos que receberam baixa ou nenhuma dose de fertilizantes, quando tratados com biochar podem incrementar a produção de milho em até 363 % (Pandit et al., 2018), o que comprova a presença de nutrientes na composição destes materiais.

O processo de adsorção de P pelo biochar depende da concentração deste elemento na solução do solo e, possivelmente, essa adsorção ocorre de duas formas distintas. A primeira é mais fraca e rápida e é chamada de quimissorção, que seria a ligação na superfície do biochar e, a segunda, mais lenta e resistente, ocorre pela difusão do P para o interior dos poros do biochar. Esta segunda forma de adsorção de P apenas ocorreria após a saturação dos sítios superficiais de adsorção (Zhang et al., 2016). De todo o P adsorvido no biochar, até 55 % pode estar disponível para a planta e, solos tratados com biochar, podem reter até 16 % mais fósforo, disponibilizando-o lentamente para a planta (Zhang et al., 2016).

Em estudos de campo, Peixoto et al. (2018) encontraram efeitos sinérgicos do uso de biochar com fertilizante comercial; mesmo a aplicação de biochar sendo realizada um mês antes do plantio e 45 dias antes da primeira adubação para o eucalipto. Foi possível observar neste estudo que a altura da planta com a menor dose de fertilizante associada ao uso do biochar foi a mesma que o tratamento com apenas a maior dose do fertilizante e sem uso do biochar, indicando possível diminuição da adsorção de P pelo solo, quando se aplicou, antecipadamente, o biochar. Resultados semelhantes foram encontrados por Gonzaga et al. (2018) utilizando-se biochar de casca de coco incorporado no solo duas semanas antes do plantio e da adubação para o cultivo de milho.

O objetivo deste estudo foi avaliar a relação da época de aplicação do biochar com P, no desenvolvimento das plantas de milho e na disponibilidade de P.

## Material e Métodos

Neste trabalho foi utilizado um biochar produzido a partir de pequenos cavacos de eucalipto, pirolisado por 8 h a temperatura de 450 °C, resultando em 8,34 % de cinzas (base seca), 3,63 % de umidade, 27,75 % de material volátil e pH CaCl<sub>2</sub> de 6,1. Foi realizada difração de raios X (LabX, XRD-6000, Shimadzu X-ray diffractometer), a radiação utilizada foi de Cu-K $\alpha$ <sub>1</sub> com  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ . O potencial e a corrente da fonte foram de 40 kV e 40 mA, respectivamente. O difratograma foi obtido em uma faixa de varredura (2 $\theta$ ) de 4 a 70°, com um passo de 0,02° a cada segundo.

No difratograma de raios X (Figura 1) é possível notar a presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>), cujos picos de difração referentes a esta fase são identificados com o símbolo •. Também é possível observar um pico referente a presença de MgO, cujo pico de difração referente a esta fase está identificado com o símbolo \*. Os picos identificados com o símbolo □ são referentes a presença de alumínio metálico proveniente do porta-amostras do equipamento.

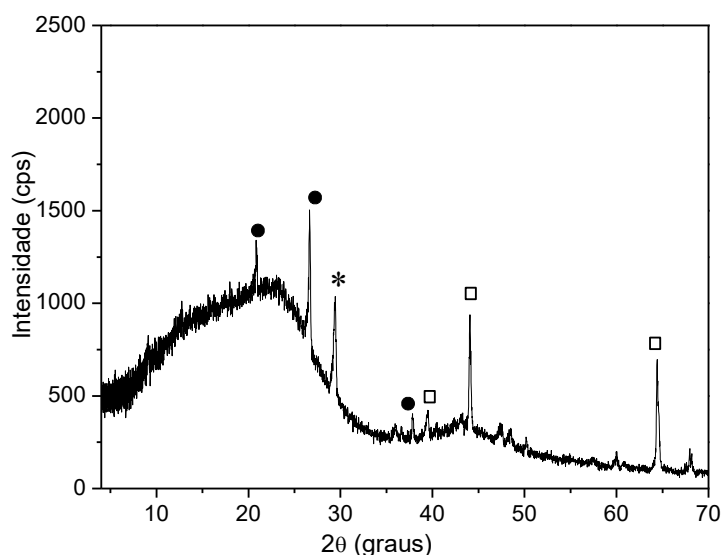


Figura 1: Difratograma de raios X de biochar de cavaco de eucalipto. • SiO<sub>2</sub>, \* MgO, □ Al

Também foi realizada espectroscopia na região do infravermelho (ATR/ FTIR-4100, Jasco Fourier Transform Infrared Spectrometer). Todos os espectros foram obtidos com 60 varreduras, sendo a faixa de comprimento de onda variando de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 2). A banda na região de 2300  $\text{cm}^{-1}$  é referente ao estiramento das ligações C-O presentes no  $\text{CO}_2$  atmosférico. A ausência de outras bandas neste espectro indica que não há grupos funcionais, como, por exemplo, C=O, C-O, aromáticos, O-H, que normalmente são encontrados em biocarvões produzidos a partir de outras biomassas (Novais, 2018).

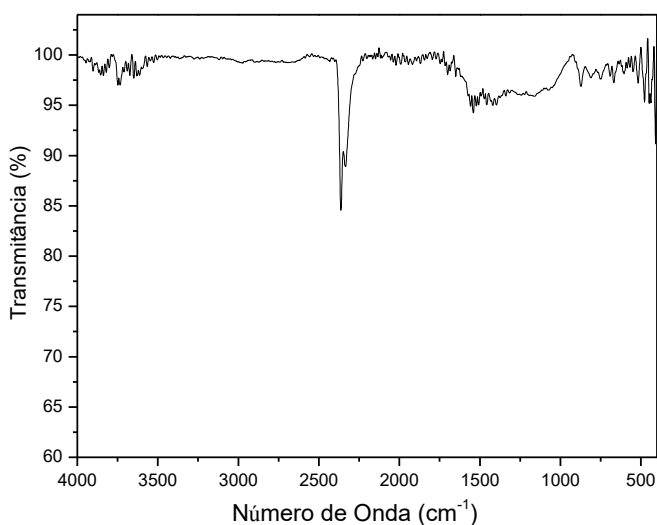


Figura 2: Espectro de infravermelho de biochar de cavaco de eucalipto

Como planta indicadora neste trabalho utilizou-se a cultivar de milho híbrido AG1051 recomendada para a região do Alto Paranaíba, localizada a 1.100 m de altitude e clima predominante Cwa, segundo a classificação Köppea-Geiger. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo, previamente caracterizado química e fisicamente (pH água 6,51; P-rem 5,22  $\text{mg L}^{-1}$ ; P-Mehlich-1 0,38  $\text{mg dm}^{-3}$ ; K 142,45  $\text{mg dm}^{-3}$ ; Ca 2,3  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; Mg 1,3  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; Al 0,07  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; t 4,03  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; T 7,96  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; V 49,78%; Argila 51,92%; Silte 29,54%; Areia 18,54%). A calagem foi realizada para atingir 60% da saturação por bases, foram utilizados sacos plásticos preenchidos com o volume de solo correspondente ao vaso utilizado, em seguida o calcário foi misturado ao solo e aplicado água para atingir a capacidade de campo, em seguida o saco foi fechado e posicionado de cabeça para baixo, de modo a não perder o volume de água. Após 30 dias de incubação do calcário, o saco foi aberto para a

evaporação da água. O experimento realizou-se na casa de vegetação do UNIPAM (Centro Universitário de Patos de Minas), em Patos de Minas, MG. Utilizou-se irrigação via aspersores durante os 35 dias após o plantio do experimento.

O experimento foi estruturado em esquema fatorial  $3 \times 5 \times 2 + 1$  sendo três doses do biochar, cinco épocas de aplicação de sua aplicação e duas doses de P, e um tratamento controle, sem aplicação de biochar e de P, com quatro repetições, em um delineamento inteiramente casualizado. As doses de biochar foram de 6,5; 13; 26 g/vaso (vaso de 1,3 L), o que corresponde a 10, 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> de biochar. As cinco épocas de aplicação do biochar foram: a- aplicação de biochar 28 dias antes do plantio e P no dia do plantio (28B); b- aplicação de biochar 14 dias antes do plantio e P no dia do plantio (14B); c- aplicação de biochar e P no dia do plantio (0PB); d- aplicação de P 14 dias antes do plantio e biochar no dia do plantio (14P) e e - aplicação de P 28 dias antes do plantio e biochar no dia do plantio (28P)

As doses de P foram 250 e 500 mg dm<sup>-3</sup> de P, que correspondem a 1,62 e 3,24 g/vaso de superfosfato-triplo (ST). Como fonte de P foi utilizado o superfosfato-triplo (ST), moído e passado em peneira de malha de 0,5 mm. O vaso utilizado tinha capacidade para 1,3 L. As doses de biochar e de P foram homogeneizadas com todo volume de solo do vaso.

Foram colocadas para germinar quatro sementes de milho por vaso e após a emergência foi realizado o raleio para apenas três plantas. Para o suprimento adequado dos demais nutrientes a adubação de plantio contou com 100 mg dm<sup>-3</sup> de N, 100 mg dm<sup>-3</sup> de K<sub>2</sub>O, 5 mg dm<sup>-3</sup> de Zn e 5 mg dm<sup>-3</sup> de B. A adubação de N, K e micronutrientes foi incorporada em todo volume de solo do vaso e as fontes utilizadas foram: sulfato de amônio [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>], cloreto de potássio (KCl), sulfato de zinco (ZnSO<sub>4</sub>) e bórax {Na<sub>2</sub>[B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>]·8H<sub>2</sub>O}. A adubação de cobertura foi realizada semanalmente, durante as cinco semanas de cultivo, com 50 mg dm<sup>-3</sup> de N, aplicada superficialmente, em área total do vaso. A fonte de N utilizada na cobertura foi nitrato de amônio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>).

Cada unidade experimental foi constituída de um vaso com três plantas. Foram avaliadas os seguintes atributos: matéria fresca da parte aérea, matéria seca da parte aérea, conteúdo de P, Cu, Zn, Mn e Fe na folha e P disponível no solo pelo extrator Mehlich-1.

No dia da colheita foi utilizado o analisador de trocas gasosas por infravermelho (IRGA - modelo Li-cor 6400 XT), entre 9 e 12 h com o céu sem nuvens, com o objetivo de avaliar trocas gasosas e condutância estomática como variáveis dos tratamentos. A planta encontrava-se em estágio fenológico V6. A folha escolhida para a leitura foi a última completamente expandida, realizada no terço médio do limbo, evitando que a nervura central obstruísse a câmara de leitura. A colheita foi feita aos 35 dias após o plantio. Para a obtenção da matéria seca da parte aérea, utilizou-se estufa de circulação forçada de ar a 70 °C por 72 h. Para a determinação do conteúdo de nutrientes na folha, as amostras secas foram moídas em moinhos tipo Willey e, posteriormente, determinados os teores de P, Cu, Zn, Mn e Fe conforme método descrito pelo manual de análises do LASA UFV-CRP (Laboratório de Análise de Solo e Alimentos UFV-CRP) adaptado de Malavolta et al. (1997).

Os dados foram submetidos aos testes de Lavene modificado por Brown & Forsythe (1974) e Jarque & Bera (1987) para avaliação das condições de homocedasticidade e normalidade. Quando necessário os dados foram transformados para serem atendidos as pressuposições, em sequência submetidos à análise de variância e, em seguida, à comparação de médias pelo teste Student-Newman-Keuls (SNK) a 5 % de probabilidade de erro. O programa utilizado para a análise estatística foi o SPEED Stat 1.0 (Carvalho et al., 2017).

## Resultados e Discussão

A matéria fresca da parte aérea do milho (MF) não sofreu interação entre a época de aplicação, dose de P e de biochar (Tabela 1). Entretanto, foi observada diferença estatística para dose de P e época de aplicação do biochar. O biochar aplicado 28 dias antes do P (28B) aumentou a produção de MF, contrariamente ao observado para o efeito do P aplicado 28 dias antes do biochar (28P) que apresentou menor produção de MF (Tabela 2).

Para a matéria seca da parte aérea (MS), não houveram resultados similares àqueles da MF. Destaca-se apenas que na dose de 6,5 g/vaso de biochar e de 250 mg dm<sup>-3</sup> de P foi observado valor menor para o tratamento 28P (Tabela 2).

Para a fotossíntese não houve efeito isolado da dose de biochar ou de P. Observou-se que não houve relação entre as plantas com maiores valores de fotossíntese e aquelas com os maiores valores de produção de MF, contrariando informações de que o aumento da fotossíntese causa maior produção da MF. O tratamento em que o biochar e o P foram aplicados no dia do plantio (0PB) apresentou os maiores valores de fotossíntese e a 28B os menores (Tabela 3). A eficiência de uso da água (EUA) que é a fotossíntese por quantidade de água transpirada foi menor nos tratamentos 28B e 0PB (Tabela 3), o que indica que a planta necessitou de mais água para cada molécula de CO<sub>2</sub> fixado na planta nesta condição. Partindo do pressuposto que as plantas não estavam com escassez de água, pois a irrigação ocorreu de forma regular e uniforme, pode-se considerar que as plantas que cresceram primeiro aumentaram o estresse com o aumento da área foliar em relação ao volume de solo explorado. A condutância estomática não teve efeito isolado da dose de biochar ou da dose de P. Para o efeito de época de aplicação, a época 28B apresentou condutância estomática mais baixo que outros tratamentos (Tabela 3), o que corrobora com um possível stress hídrico na planta (Oliveira et al., 2005; Bianchi et al. 2007; Timlin et al., 2017), causado pelo crescimento da planta maior que o suporte de solo do vaso de 1,3L.

Tabela 1 – Resultado do teste F da análise de variância das variáveis analisadas pelos fatores de variação (FV) (época, dose de biochar, dose de P, interação época x dose de biochar, interação época x dose P, interação dose de biochar x dose P, interação tripla época, dose de biochar x dose de P) e coeficiente de variação (C.V.).

F.V.	MF	MS	Fotossíntese	Condutancia	Conc. Int	Transp	EUA	EAE	Melich-1	P folha	Cu folha	Zn Folha	Fe Folha	Mn Folha
Época	7,81**	4,98**	27,26**	34,04**	28,58**	32,61**	16,59**	26,09**	25,07**	4,1**	0,07 <sup>ns</sup>	6,05**	3,08*	4,87**
Dose Biochar	1,75 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	2,55 <sup>ns</sup>	2,24 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	4,41*	2,81 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	19,08**	0,61 <sup>ns</sup>	2,93 <sup>ns</sup>	4,97**	1,85 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>
Dose P	161,99**	66,56**	0,11 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	1354,63**	179,37**	11,15**	16,64**	1,57 <sup>ns</sup>	2,28 <sup>ns</sup>
Época x Dose Biochar	1,14 <sup>ns</sup>	1,43 <sup>~</sup>	1,92 <sup>o</sup>	1,84 <sup>o</sup>	1,95 <sup>o</sup>	1,62 <sup>~</sup>	2,88**	1,88 <sup>o</sup>	2,66*	0,81 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	2,99**	2,25*	1,56 <sup>~</sup>
Época x Dose P	1,17 <sup>ns</sup>	3,42*	2,83*	3,14*	0,26 <sup>ns</sup>	2,95*	0,28 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	2,22 <sup>o</sup>	3,15*	1,92 <sup>~</sup>	7,59**	0,19 <sup>ns</sup>	1,76 <sup>~</sup>
Dose Biochar x Dose P	1,34 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>	2,72 <sup>o</sup>	2,04 <sup>~</sup>	3,4*	2,25 <sup>~</sup>	3,92*	3,17*	3,19*	0,26 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	3,56*	0,69 <sup>ns</sup>
Interação tripla	1,01 <sup>ns</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	2,65*	2,02 <sup>o</sup>	2,49*	2,06*	2,3*	2,33*	1,01 <sup>ns</sup>	1,72 <sup>~</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	2,42*	1,4 <sup>~</sup>	1,75 <sup>o</sup>
Tratamentos	12,08**	7,02**	6,32**	6,76**	5,44**	6,33**	4,69**	5,01**	65,65**	10,83**	2,43**	5,06**	2,21**	2,28**
C.V.(%)	12,67	8,43	19,67	37,08	39,84	18,37	41,71	40,9	5,64	5,1	14,19	11,65	21,26	14,13

Matéria fresca (MF), matéria seca (MS), fotossíntese (Box-Cox (x+1),  $\lambda= 0,7$ ), condutância (Rank), concentração interna (Conc. Int.) (Rank), transpiração (Transp.) (log (x)), eficiência de uso da água (EUA) (Rank), eficiência de abertura estomática (EAE) (Rank), Mehlich-1 (Raiz cúbica), P folha (raiz cubica (x)), Fe folha (Box-Cox (x+1),  $\lambda= 0,7$ ). Ns: não significativo. ~, °, \*, \*\* significativos ao nível de 25, 10, 5 e 1% pelo teste F.

Tabela 2 – Valores de médias da matéria fresca e matéria seca em função das épocas (28P, 28B, 14P, 14B e 0BP), dose de biochar (6,5; 13; 26 g/vaso), dose de P (250 e 500 mg dm<sup>-3</sup>) e controle.

Matéria Fresca (g/vaso)					Matéria Seca (g/vaso)				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	44,97 bA	57,69 abA	55,85 aA	52,84 c	28P	13,72 bA	15,90 aA	14,64 aA	14,75 b
28B	68,02 aA	66,30 aA	70,47 aA	68,26 a	28B	16,97 aA	16,69 aA	17,20 aA	16,95 a
14P	66,83 aA	57,04 abA	54,18 aA	59,35 bc	14P	16,87 aA	15,20 abA	14,57 aA	15,55 b
14B	57,02 abA	46,75 bA	59,81 aA	54,53 bc	14B	15,87 aA	13,37 bB	15,54 aA	14,93 b
0PB	63,58 aA	61,77 abA	61,96 aA	62,44 ab	0PB	17,50 aA	16,55 aA	16,34 aA	16,80 a
Média	60,08 A	57,91 A	60,45 A		Média	16,18 A	15,54 A	15,66 A	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	74,35 aA	77,96 aA	79,33 aA	77,21 ab	28P	18,03 aA	18,09 aA	18,43 aA	18,18 a
28B	82,81 aA	80,33 aA	89,45 aA	84,20 a	28B	18,00 aA	18,15 aA	18,16 aA	18,10 a
14P	81,87 aA	81,76 aA	84,23 aA	82,62 ab	14P	18,61 aA	18,72 aA	17,85 aA	18,39 a
14B	68,31 aA	76,58 aA	77,37 aA	74,09 b	14B	16,05 aA	17,38 aA	17,45 aA	16,96 a
0PB	74,87 aA	79,81 aA	82,62 aA	79,10 ab	0PB	18,22 aA	17,64 aA	17,48 aA	17,78 a
Média	76,44 A	79,29 A	82,60 A		Média	17,78 A	17,99 A	17,87 A	
Controle	17,59				Controle	10,225			

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5%.

O conteúdo foliar de P não apresentou interação entre a dose de P e a dose de biochar. O efeito para a dose de biochar não foi significativo; entretanto, houve significância para a dose de P, em que para a maior dose obtiveram-se maiores conteúdos foliares de P. Houve interação significativa para dose de P e época de aplicação de biochar, uma vez que a dose maior de P ( $500 \text{ mg dm}^{-3}$ ) causou a diminuição do efeito da época de aplicação do biochar, aumentando o conteúdo foliar de P (Tabela 4).

Dos conteúdos foliares dos micronutrientes metálicos (Cu, Fe, Zn e Mn) apenas o Mn apresentou valor significativo para o efeito de dose de biochar. O conteúdo foliar de Zn foi significativamente diferente para doses de P, em que, para a dose de  $500 \text{ mg dm}^{-3}$ , o conteúdo de Zn foi menor (Tabela 4), mostrando o efeito antagonista da disponibilidade de P com a absorção deste micronutriente (Ova et al., 2015; Shahid et al., 2016). Entretanto, a menor absorção desse micronutriente pela planta não se mostrou limitante, uma vez que não se observou aparente perda de crescimento das plantas. (Tabela 4).

O P disponível pelo Mehlich-1 foi maior quanto mais próximo do plantio a fonte de P foi aplicada no solo, sendo que, a aplicação do biochar previamente (28B e 14B) ou no mesmo dia da adubação fosfatada (0PB) contribuiu para aumentar a disponibilidade de P ao final do experimento (35 dias) (Tabela 4). O biochar atua como concorrente do P no solo pelos sítios de ligação com os óxi-hidroxidos de Fe e Al (Nobrega, 2011; Novais, 2018), uma vez que o solo utilizado (Latosolo) possui alta presença de cargas positivas e o biochar cargas predominantemente negativas, assim como as negativas do fosfato. Sendo assim, a aplicação do biochar no solo, antecipadamente ao fosfato, diminui a fixação do P, por bloquear cargas positivas do solo, como também acontece com a adição de matéria orgânica ao solo antecipadamente ao P (Novais et al., 1999; Andrade et al., 2003; Van Swieten et al., 2010; Novais, 2018).

Tabela 3 – Valores de médias da fotossíntese, condutância estomática eficiência de uso da água e em função das épocas (28P, 28B, 14P, 14B e 0BP), dose de biochar (6,5; 13; 26 g/vaso) dose de P (250 e 500 mg dm<sup>-3</sup>) e controle.

Fotossíntese ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )					Condutância ( $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	20,94 abA	25,76 abA	23,84 aA	23,51 a	28P	0,18 aA	0,17 aA	0,14 aA	0,17 a
28B	15,65 abA	15,54 cA	13,23 bA	14,81 b	28B	0,11 bcA	0,11 bA	0,10 abA	0,11 c
14P	12,88 bA	18,05 bcA	12,92 bA	14,62 b	14P	0,07 cA	0,10 bA	0,07 bA	0,08 d
14B	13,38 bB	28,01 aA	22,65 aA	21,35 a	14B	0,09 bcB	0,17 aA	0,12 aB	0,12 bc
0PB	22,80 aA	21,62 abcA	22,51 aA	22,31 a	0PB	0,12 abA	0,13 abA	0,14 aA	0,13 b
Média	17,13 B	21,80 A	19,03 AB		Média	0,12 B	0,14 A	0,11 B	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	22,30 aA	25,89 aA	14,90 cB	21,03 b	28P	0,15 aA	0,17 aA	0,11 bcB	0,14 a
28B	12,65 bA	11,74 bA	8,59 cA	11,00 d	28B	0,08 bA	0,09 bA	0,07 cA	0,08 c
14P	15,80 abA	13,93 bA	15,35 cA	15,03 c	14P	0,08 bA	0,07 bA	0,08 cA	0,08 c
14B	21,87 aA	18,06 abA	23,89 bA	21,27 b	14B	0,12 aA	0,11 bA	0,14 abA	0,12 b
0PB	23,58 aA	26,45 aA	31,75 aA	27,26 a	0PB	0,14 aA	0,18 aA	0,18 aA	0,16 a
Média	19,24 A	19,21 A	18,90 A		Média	0,12 A	0,12 A	0,12 A	
Controle	8,94				Controle	0,07			
Conc. Interna de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )					Transpiração ( $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	213,79 aA	126,13 aA	93,70 bB	144,54 a	28P	4,52 aA	4,94 abA	4,31 abA	4,59 a
28B	150,17 abA	133,89 aA	155,30 aA	146,45 a	28B	3,40 abA	3,44 bA	3,39 bA	3,41 b
14P	92,17 cdA	87,54 aA	82,85 bA	87,52 b	14P	2,47 bA	3,54 bA	2,37 cA	2,80 c
14B	130,49 bcA	85,38 aAB	61,44 bB	92,44 b	14B	2,93 abC	6,12 aA	4,26 abB	4,44 a
0PB	74,36 dA	92,63 aA	102,31 bA	89,77 b	0PB	4,41 aA	4,65 abA	5,44 aA	4,83 a
Média	132,20 A	105,11 A	99,12 A		Média	3,55 B	4,54 A	3,95 AB	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	134,86 aA	112,15 abA	162,81 aA	136,61 a	28P	4,15 aA	4,87 aA	3,48 cA	4,17 b
28B	123,92 abA	154,67 aA	187,70 aA	155,43 a	28B	2,62 bA	2,86 bA	2,60 cA	2,69 c
14P	67,27 cA	69,89 bA	82,82 bA	73,33 b	14P	2,83 bA	2,45 bA	2,86 cA	2,71 c
14B	82,69 bcA	100,05 abA	91,57 bA	91,44 b	14B	4,46 aA	4,07 aA	4,86 bA	4,46 b
0PB	88,21 bcA	97,68 abA	71,80 bA	85,90 b	0PB	4,88 ab	6,21 aAB	7,21 aA	6,10 a
Média	99,39 A	106,89 A	119,34 A		Média	3,79 A	4,09 A	4,20 A	
Controle	175,94				Controle	3,02			
EUA ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ )					EAE ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol CO}_2^{-1}$ )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	4,55 aB	5,20 aAB	5,53 aA	5,09 a	28P	114,33 cB	148,56 aB	169,93 aA	144,27 b
28B	4,49 aA	4,54 aA	3,87 bA	4,30 c	28B	138,02 bcA	148,30 aA	134,28 bA	140,20 b
14P	5,26 aA	5,12 aA	5,43 aA	5,27 a	14P	177,45 aA	176,24 aA	182,89 aA	178,86 a
14B	4,39 aB	4,64 aB	5,41 aA	4,81 ab	14B	151,45 abB	171,71 aAB	189,79 aA	170,98 a
0PB	5,16 aA	4,69 aAB	4,14 bB	4,66 bc	0PB	183,49 aA	170,40 aA	160,57 aA	171,49 a
Média	4,77 A	4,84 A	4,87 A		Média	152,95 A	163,04 A	167,49 A	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	5,38 aA	5,36 aA	4,28 bcB	5,01 ab	28P	146,63 bA	157,29 abA	130,60 bA	144,84 b
28B	4,76 aA	4,07 bAB	3,30 cB	4,05 c	28B	155,78 abA	135,53 bA	116,21 bA	135,84 b
14P	5,62 aA	5,65 aA	5,39 aA	5,55 a	14P	191,09 aA	190,67 aA	181,42 aA	187,72 a
14B	4,96 aA	4,42 bA	4,95 abA	4,78 b	14B	177,87 abA	167,10 abA	170,40 aA	171,79 a
0PB	4,82 aA	4,44 bA	4,41 bcA	4,56 bc	0PB	173,00 abA	159,64 abA	176,64 aA	169,76 a
Média	5,11 A	4,79 AB	4,47 B		Média	168,87 A	162,04 A	155,05 A	
Controle	2,72				Controle	121,37			

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5%.

Tabela 4 – Valores de médias do conteúdo foliar de P, Mn, Fe, Zn e Cu; e teor de P disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 em função das épocas (28P, 28B, 14P, 14B e 0BP), dose de biochar (6,5; 13; 26 g/vaso), dose de P (250 e 500 mg dm<sup>-3</sup>) e controle.

P Folha (mg vaso <sup>-1</sup> )					Mn Folha (mg vaso <sup>-1</sup> )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	25,67 aB	30,85 aAB	32,85 aA	29,79 a	28P	106,91 aA	108,33 aA	100,07 aA	105,10 a
28B	30,01 aA	26,04 aA	26,20 aA	27,42 ab	28B	106,42 aA	88,14 abA	100,92 aA	98,49 a
14P	28,23 aA	27,51 aA	25,40 aA	27,04 ab	14P	91,23 aA	80,54 bA	80,99 aA	84,25 b
14B	23,44 aA	22,92 aA	25,45 aA	23,94 b	14B	94,26 aA	90,72 abA	93,60 aA	92,86 ab
0PB	24,97 aA	23,02 aA	24,80 aA	24,26 b	0PB	102,99 aA	97,97 abA	96,37 aA	99,11 a
Média	26,46 A	26,07 A	26,94 A		Média	100,36 A	93,14 A	94,39 A	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	35,14 aA	35,69 aA	35,00 abA	35,28 b	28P	129,11 aA	104,37 aB	90,54 aB	108,01 a
28B	42,31 aA	39,80 aA	44,24 aA	42,12 a	28B	90,77 bA	99,19 aA	102,13 aA	97,36 ab
14P	38,57 aA	40,00 aA	44,20 aA	40,92 ab	14P	94,94 bA	104,90 aA	101,80 aA	100,55 ab
14B	35,67 aA	38,95 aA	31,46 bA	35,36 b	14B	81,83 bA	94,16 aA	95,08 aA	90,36 b
0PB	34,84 aA	37,37 aA	42,34 aA	38,18 ab	0PB	103,52 bA	95,50 aA	108,38 aA	102,46 ab
Média	37,31 A	38,36 A	39,45 A		Média	100,03 A	99,62 A	99,59 A	
Controle	13,47				Controle	75,85			
Fe Folha (mg vaso <sup>-1</sup> )					Zn Folha (mg vaso <sup>-1</sup> )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	211,89 abA	272,17 abA	192,68 aA	225,58 a	28P	9,33 aA	7,46 aB	9,20 aA	8,66 a
28B	285,94 aA	229,44 abA	233,91 aA	249,76 a	28B	8,41 abA	7,27 abAB	6,85 bB	7,51 b
14P	150,42 bB	307,75 aA	305,93 aA	254,70 a	14P	5,39 cB	5,90 bB	7,21 bA	6,16 c
14B	307,27 abA	250,22 abA	251,21 aA	269,57 a	14B	7,39 bAB	8,39 aA	6,80 bB	7,53 b
0PB	248,79 abA	159,36 bA	182,25 aA	196,80 a	0PB	7,87 bA	6,89 abA	7,35 bA	7,37 b
Média	240,86 A	243,79 A	233,19 A		Média	7,68 A	7,18 A	7,48 A	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	263,82 aA	263,24 aA	332,67 aA	286,57 a	28P	6,97 aA	6,71 aA	6,91 aA	6,86 a
28B	372,90 aA	276,79 aAB	193,55 aB	281,08 a	28B	7,60 aA	6,40 aA	6,22 aA	6,74 a
14P	284,33 aA	347,47 aA	224,86 aA	285,55 a	14P	7,03 aA	7,17 aA	6,73 aA	6,98 a
14B	274,15 aA	255,10 aA	200,00 aA	243,08 a	14B	7,27 aA	6,13 aA	6,42 aA	6,60 a
0PB	234,07 aA	181,90 aA	193,41 aA	203,13 a	0PB	7,23 aA	6,30 aA	7,21 aA	6,91 a
Média	285,85 A	264,90 AB	228,90 B		Média	7,22 A	6,54 B	6,70 B	
Controle	126,73				Controle	4,96			
Cu Folha (mg vaso <sup>-1</sup> )					P disponível (mg dm <sup>-3</sup> )				
P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 250 mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	4,87 aA	4,98 aA	5,86 aA	5,23 a	28P	0,93 bA	0,83 bA	0,95 cA	0,90 c
28B	5,20 aA	4,52 aA	5,19 aA	4,97 a	28B	0,92 bB	1,05 bAB	1,28 abA	1,08 b
14P	4,25 aA	4,71 aA	5,03 aA	4,66 a	14P	0,87 bA	0,96 bA	1,06 bcA	0,97 bc
14B	4,99 aA	4,75 aA	4,97 aA	4,90 a	14B	1,23 aA	1,03 aA	1,33 abA	1,20 a
0PB	5,49 aA	4,32 aA	5,35 aA	5,05 a	0PB	1,09 abB	1,31 aAB	1,52 aA	1,30 a
Média	4,96 AB	4,66 B	5,28 A		Média	1,01 B	1,04 AB	1,23 A	
P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média	P 500mg dm <sup>-3</sup>	Biochar (g/vaso)			Média
Época	6,5	13,0	26,0		Época	6,5	13,0	26,0	
28P	5,25 aA	4,84 aA	5,25 aA	5,12 a	28P	2,51 bA	2,77 bA	3,12 bA	2,80 b
28B	5,79 aA	5,15 aA	5,34 aA	5,43 a	28B	2,98 abAE	2,52 bB	3,42 bA	2,97 b
14P	5,48 aA	5,90 aA	5,73 aA	5,70 a	14P	3,17 abA	2,27 bA	3,66 abA	3,03 b
14B	5,15 aA	5,31 aA	5,63 aA	5,36 a	14B	3,80 aA	4,00 aA	3,83 abA	3,87 a
0PB	5,42 aA	5,41 aA	5,46 aA	5,43 a	0PB	3,55 aB	3,06 aAB	5,79 aA	4,13 a
Média	5,42 A	5,32 A	5,48 A		Média	3,20 B	2,92 B	3,96 A	
Controle	3,04				Controle	0,15			

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste SNK a 5%.

## **Conclusões**

O aumento da dose de biochar não influencia o crescimento e a absorção de nutrientes pela planta. A menor dose aplicada ( $10 \text{ t ha}^{-1}$ ) já demonstra efeito.

O efeito da utilização do biochar apresenta-se principalmente em situações de menor dose de P, uma vez que na dose alta de P houve diminuição do efeito entre as épocas de aplicação do biochar para a maioria das variáveis testadas.

A melhor forma de aplicação do biochar para o crescimento da planta e disponibilidade de P, é aquela em que o biochar é aplicado simultaneamente ao P, por diminuir o efeito de adsorção do P com os óxi-hidroxidos de Fe e Al do solo.

## Referências

- ALHO, C. F. B. V.; CROOS, A.; SOHI, S.; ESTRADA, C.; NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; LELIS, R. C. C. Biochar stable fraction quantification by thermo-chemical oxidation and assesment by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **X Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas**, p. 340–343, 2013.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1003–1011, 2003.
- BARROS, D. L. D. E. **Caracterização e utilização de biocarvão proveniente de resíduo madeireiro na produção de mudas florestal e frutífera e a campo de teca (*Tectona grandis* L. f.)**. 2017. Tese (Doutorado engenharia agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- BHATTI, J. S.; COMERFORD, N. B.; JOHNSTON, C. T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a spodic horizon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 1089, 1998.
- BIANCHI, C. A. M.; BERGONCI, J. I.; BERGAMACHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Condutância da folha em milho cultivado em plantio direto e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 315–322, 2007.
- CARVALHO, M. T. DE M. **The impact of wood biochar as a soil amendment in aerobic rice systems of the Brazilian Savannah**. 2015. Tese (Doutorado), The University of Tasmania and Wageningen University; Wageningen.
- CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q. SPEED Stat: a minimalist and intuitive spreadsheet program for classical experimental statistics. **Anais da 62ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria**, 333pp. 2017.
- CHA, J. S.; PARK, S. H.; JUNG, S. C.; RYU, C.; JEON, J. K.; SHIN, M. C.; PARK, Y. K. Production and utilisation of biochar: A review. **Journal of industrial and engineering Chemistry**, v. 40, p. 1-15, 2016

DARI, B.; NAIR, V. D.; HARRIS, E. G.; NAIR, P. K. R.; SOLLENBERGER, L.; MYLAVARAPU, E. Relative influence of soil- vs. biochar properties on soil phosphorus retention. **Geoderma**, v. 280, p. 82–87, 2016.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; ALMEIDA, A. Q.; CARVALHO JUNIOR, J. I. T.; ANDRADE, K. R. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. **Catena**, v. 162, p. 414–420, 2018.

HALE, S. E.; ALLING, V.; MARTINSEN, V.; MULDER, J.; BREEDVELD, G. D.; CORNELISSEN, G. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. **Chemosphere**, v. 91, n. 11, p. 1612–1619, 2013.

LEHMANN, J. JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Taylor and Francis, London, 2015.

LIMA, J. R. DE S., SILVA, W. M.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; CORRÊA, M. M.; MARINS FILHO, A. P.; CLERMONT-DOUPHIN, C.; ANTONINO, A. C. D.; HAMMERCKER, C. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14–23, 2018.

LONGSTRETH, D. J.; NOBEL, P. S.; DEB, G. Nutrient influences on leaf photosynthesis. **Plant Physiology**, v. 65, n. 3, p. 541–543, 1980.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ed. Piracicaba. Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo – Potafos. 1997. 319p.

NÓBREGA, Í. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo**. 2011. Dissertação (Mestrado em engenharia do ambiente) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

NOVAIS, S.V. **Biochars in the mitigation of greenhouse gases and on phosphorus removal and reuse**. 2018. Tese (Doutorado solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.

NOVAIS, S. V.; ZENERO, M. D. O.; BARRETO, M. S. C.; MONTES, C. R.; CERRI, C. E. P. Phosphorus removal from eutrophic water using modified biochar. **Science of the Total Environment**, v. 633, p 825-835, 2018.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solos e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015.

OBIA, A.; MULDER, J.; HALE, S. E.; NURIDA, N. L.; CORNELISSEN, G. The potential of biochar in improving drainage, aeration and maize yields in heavy clay soils. **PLOS ONE**, v. 13, n. 5, p. 1–15, 2018.

OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 86–95, 2005.

OVA, E. A.; KUTMAN, U. B.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. **Plant and Soil**, v. 393, n. 1–2, p. 147–162, 2015.

PANDIT, N. R.; MULDER, J.; HALE, S. E.; MARTINSEN, V.; SCHMIDT, H. O.; CORNELISSEN, G. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1380–1389, 2018.

PEIXOTO, R.; VARGAS, L. M. P.; SILVA, K; BOGNOLA, I. A.; SANTOS, L. M.; MAIA, C. M. B. F. Aspectos dendrométricos de plantio de eucaliptos em solos com biochar. **4º Encontro Brasileiro de Silvicultura**, Ribeirão Preto, SP, April, 2018.

REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; WRIGHT, I. J. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: A cross-biome analysis of 314 species. **Oecologia**, v. 160, n. 2, p. 207–212, 2009.

SHAHID, M.; SHUKLA, A. K.; BHATTACHARYYA, P.; TRIPATHI, R.; MOHANTY, S.; KUMAR, A.; LAL, B.; GAUTAN, P.; RAJA, R.; PANDA, B. B.; DAS, B.; NAYAK, A. K. Micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu) balance under long-term application of fertilizer and manure in a tropical rice-rice system. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, n. 3, p. 737–747, 2016.

SILVA, M. A. S.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; BERNARDES, T. G.; SOUZA, R. O.; OLIVEIRA, F. B. Efeito da aplicação de biochar sobre propriedades químicas do solo e produtividade de feijoeiro comum irrigado. In: **Congresso nacional de pesquisa de feijão**. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.

STAUFFER, E. **Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo**. 2016. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

SUMNER, M. E., FARINA M. P. W. **Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems**. In: STEWART, B. A. (editor) *Advances in Soil Science*. v. 5. Springer, New York, NY, 1986.

TAN, Z.; LIN, C. S. K.; JI, X.; RAINEY, T.J. Returning biochar to fields: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 116, n. April, p. 1–11, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TIMLIN, D. J.; NAIDU, T. C. M.; FLEISHER, D. H.; REDDY, V. R. Quantitative effects of phosphorus on maize canopy photosynthesis and biomass. **Crop Science**. v. 3169, p. 3156–3169, 2017.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, Y. K.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility, **Plant Soil**, v. 327, p. 235-246. 2010

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. **Manual de Fisiologia Vegetal**. Editora Agronômica Ceres, São Paulo, 2008, 1166p.

ZHANG, H.; CHEN, C.; GRAY, E. M.; BOYD, S. E.; YANG, H.; ZHANG, D. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. **Geoderma**, v. 276, p. 1–6, 2016.

## **Conclusões Gerais**

Para a cenoura cultivada em vasos, a aplicação mais localizada da adubação fosfatada mostra-se mais eficiente por apresentar maior produção de matéria fresca de raiz e maior eficiência agronômica.

O uso de biochar antecipadamente ou simultaneamente à adubação com P contribui para diminuir a adsorção de P no solo e, conseqüentemente, para aumentar a disponibilidade deste nutriente.