



**JÚLIA RODRIGUES MACEDO**

**DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA  
DO MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES FORMAS DE  
APLICAÇÃO DE FÓSFORO**

**LAVRAS - MG  
2019**

**JÚLIA RODRIGUES MACEDO**

**DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DO MILHO EM  
FUNÇÃO DE DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Macedo, Julia Rodrigues.

Distribuição do sistema radicular da cultura do milho em  
função de diferentes formas de aplicação de fósforo/ Julia  
Rodrigues Macedo. - 2019.

52p.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Adubação do sistema. 2.Fósforo a lanço. 3. Adubação no  
sulco. I. Moreira, Silvino Guimarães. II. Silva, Bruno Montoani.

**JÚLIA RODRIGUES MACEDO**

**DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DO MILHO EM  
FUNÇÃO DE DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO**

**DISTRIBUTION OF THE RADICAL CULTURE SYSTEM OF CORN IN THE  
FUNCTION OF DIFFERENT FORMS OF PHOSPHORUS APPLICATION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de fevereiro de 2019.

Dr. Amilton Ferreira da Silva      UFSJ

Dr Leônidas Carrijo Azevedo Melo      UFLA

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2019**

*À minha família, Glória, Mário e Guilherme,  
pelo amor incondicional. Ao Flávio, pelo  
carinho, apoio, incentivo e compreensão. Essa  
vitória é nossa.*

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela proteção.

Ao Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira, pelos anos de convívio, amizade, preocupação, paciência, ensinamentos, e pela oportunidade de trabalhar com um profissional tão incrível como ele.

Ao Prof. Bruno Montoani Silva, pelas sugestões no desenvolvimento da pesquisa e pelo apoio necessário.

A toda a equipe da Fazenda Santa Helena, Grupo G7, em especial ao Evandro, por acreditar na pesquisa e ter cedido parte de sua área comercial para que pudéssemos desenvolver o trabalho.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Universidade Federal de Lavras, pelo apoio e estrutura.

Aos funcionários do Departamento de Agricultura – DAG, e do Setor de Grandes Culturas, Antônio, Ezequiel, Arnald e Edésio, pelo auxílio e suporte de infraestrutura;

À equipe do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Teo, por terem cedido o uso dos equipamentos e materiais para a realização de partes do experimento e, ao colega Devison da Física do Solo, pelo apoio no desenvolvimento da dissertação.

Aos colegas do Grupo G-MAP, em especial, Flávio, Alessandro, Daniel, Davi, Fabinho e Junior, pelo apoio durante a pesquisa e a toda a equipe G-MAP, pelos ensinamentos e pela oportunidade de trabalhar com pessoas tão dedicadas.

Aos amigos feitos na UFSJ e que compartilharam essa experiência de pós-graduação comigo na UFLA.

Aos amigos e familiares que mesmo de longe deram todo apoio e incentivo.

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

O sistema de produção de grãos do Brasil tem se tornado cada dia mais complexo. A realização de duas safras, e em algumas vezes três safras, demanda que os produtores sejam eficientes em todas as operações de manejo. Sendo assim, muitos produtores visando aumentar o rendimento operacional, estão realizando a adubação fosfatada do sistema de produção à lanço. Diante da dinâmica complexa do P no solo, estudos voltados para a avaliação de possíveis limitações do uso destas técnicas devem ser desenvolvidos. Desta forma, na primeira parte do trabalho é apresentada uma revisão de literatura sobre o assunto, visando compreender a dinâmica do fósforo nos sistemas solo planta. Na segunda parte é apresentado um capítulo do trabalho desenvolvido em que objetivou-se estudar o efeito dos modos de fornecimento de fósforo, num solo com fertilidade construída. O experimento foi instalado na safra de 2015/2016, onde foram cultivadas as culturas de soja, milho, feijão e trigo, totalizando-se 6 cultivos. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema de faixas com 5 tratamentos e 5 repetições, o qual foi composto por diferentes adubações do sistema de produção (lanço, sulco verão e sulco inverno) e adubação convencional. Após 6 cultivos, observou-se acúmulo de P na camada superficial do solo (0-10 cm), com influência direta no crescimento de raízes. Visualmente, o sistema radicular foi pouco influenciado pelas formas de aplicação de fósforo, ficando mais restrito à camada superficial em todos os tratamentos e pouco distribuído no perfil do solo quando o fósforo foi aplicado a lanço. As produtividades das culturas de verão não foram influenciadas pelos modos de fornecimento de P. A melhor forma de fornecimento de P às culturas de inverno foi com adubação convencional no sulco de semeadura.

**Palavras-chave:** Adubação de sistema. Fósforo a lanço. Adubação no sulco

## ABSTRACT

Brazil's grain production system has become increasingly complex. The accomplishment of two harvests, and in some times three harvests, demands that the producers be efficient in all the operations of handling. Therefore, many producers to increase the operational performance, are performing the phosphate fertilization of the production system to haul. Given the complex dynamics of soil P, studies aimed at evaluating possible limitations of the use of these techniques must be developed. In this way, with this work, it was better to understand the management of phosphate fertilization used empirically for such edaphoclimatic conditions by many farmers in the region. The experiment was installed in the 2015/2016 harvest, where the soybean, corn, beans and wheat crops were grown, totaling 6 crops. The experimental design used was that of blue blocks in a band scheme with 5 treatments and 4 repetitions, which was composed of different fertilizers from the production system (haul, summer groove and winter furrow) and conventional fertilization. The results after 6 crops on the area showed the influence of the fertilization of the production system on the accumulation of P in the superficial layer (0-10 cm) of the soil and the great challenge of this situation is that this nutrient directly influences the growth of roots, the accumulation of superficial P can limit the growth of the root system of the crops in these layers and damage them in expression of the productive potential, mainly in times with low rainfall. In this regard, the productivity of summer crops, a season with good water availability, was not affected by the different forms of phosphate fertilization, while the productivity of autumn/winter crops, a season with water limitations, was influenced by Fertilization forms.

**Keywords:** Fertilization of the production system. Phosphate fertilization to haul. Conventional fertilization.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO ..... 10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO..... 12</b>
<b>2.1</b>	<b>Dinâmica do fósforo no solo ..... 12</b>
<b>2.2</b>	<b>Formas de aplicação de fósforo no sistema de produção ..... 15</b>
<b>2.3</b>	<b>Adubação do sistema de produção ..... 19</b>
<b>2.4</b>	<b>Importância das raízes e comportamento do sistema radicular do milho..... 20</b>
<b>2.6</b>	<b>Avaliação do sistema radicular do milho..... 22</b>
	<b>REFERÊNCIAS ..... 23</b>
	<b>SEGUNDA PARTE ARTIGOS * ..... 29</b>
	<b>Artigo 1 - Distribuição de raízes de milho e produtividade de culturas anuais, em função da adubação fosfatada convencional e de sistema ..... 30</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO ..... 31</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS ..... 33</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 38</b>
<b>3.1</b>	<b>Fósforo no solo..... 38</b>
<b>3.2</b>	<b>Sistema radicular do milho ..... 41</b>
<b>3.3</b>	<b>Concentração de fósforo foliar..... 44</b>
<b>3.4</b>	<b>Produtividade das culturas ..... 45</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES ..... 47</b>
	<b>REFERÊNCIAS ..... 49</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem aumentando a cada ano a área plantada, a produção e a produtividade das principais culturas. Segundo dados da CONAB (2019), a área prevista para cultivo com grãos no país, terá um aumento de 1,2% da safra 2017/2018 para a safra 2018/2019, totalizando 62,48 milhões de hectares.

Seguindo esta tendência nacional, o estado de Minas também tem aumentado sua participação na produção de grãos. Como exemplo disso, podem ser citadas as produções de soja e milho, que saltaram de 2,537 e 6,629 milhões de toneladas, na safra 2007/2008, para 5,545 e 7,087 milhões de toneladas, respectivamente na safra 2017/18 (CONAB, 2019). Dentro do estado, as Mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul de Minas, destacam-se por apresentar ótimo potencial para cultivo de grãos, e isso pode ser atribuído, em grande parte, às condições climáticas favoráveis e ao bom manejo do solo.

Em função deste crescente desenvolvimento agrícola das Mesorregiões citadas, e do manejo do solo adotado, é que o interesse da pesquisa vem sendo motivado, principalmente no que se refere às técnicas agronômicas que têm sido empregadas e que ainda não foram consolidadas para as condições edafoclimáticas dos locais (HICKMANN, 2014). Dentre estas, pode-se destacar a adubação fosfatada do sistema de produção, com aplicação de fósforo nas culturas mais responsivas, principalmente no outono e inverno, e com redução ou retirada do nutriente da cultura da soja, que é menos exigente (ALTMANN, 2012).

De acordo com Prochnow et al. (2017), um dos grandes desafios na agricultura tropical e, principalmente em solos altamente intemperizados, como é o caso dos solos sob Cerrado, pois estes, além de apresentarem baixa disponibilidade natural em fósforo (P), apresentam uma forte interação química entre os íons fosfatos e os constituintes minerais e orgânicos do mesmo, reduzindo fortemente a disponibilidade do nutriente às plantas.

Segundo Nunes et al. (2006), a fim de reduzir esta interação P-solo, a forma mais recomendada para a aplicação de fósforo no sistema de produção, tem sido através do uso de fontes solúveis no sulco de semeadura, o qual garante maior eficiência no uso deste nutriente pelas plantas.

Por outro lado, na busca por maiores rendimentos operacionais na lavoura, alguns produtores têm realizado suas aplicações de fósforo a lanço, pois isso permite reduzir uma operação no momento da semeadura, uma vez que não se faz necessário reabastecer a caixa de adubo do implemento. Segundo Lacerda e Stephan (2016), o grande desafio e

consequência no uso contínuo desta forma de aplicação, é a tendência em haver acúmulo de P nas camadas superficiais do solo, que poderá prejudicar o crescimento e o desenvolvimento das raízes em profundidade, visto que este é um dos nutrientes que mais contribui para o crescimento das mesmas (ROSOLEM; MARCELO, 1998). Com isso, poderia ocorrer redução do volume de solo explorado pelas raízes.

Neste caso, a redução e limitação do sistema radicular em superfície se tornaria um entrave em situações de períodos prolongados de veranicos. Isso seria mais problemático nas áreas de sequeiro, que é a grande realidade das lavouras nas Mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul de Minas, pois sob condição de estresse hídrico, a primeira camada do solo a perder umidade é a superficial. Com isso, o sistema radicular das plantas teria dificuldade em obter água e nutrientes, e o reflexo seria fortemente observado em perda de produtividade.

Neste estudo, busca-se compreender a dinâmica do sistema radicular ao longo do perfil, influenciadas por diferentes modos de fornecimento de fósforo. Contudo, o objetivo é avaliar o desenvolvimento de raízes em profundidade através do método direto (trincheira) bem como os teores de P no solo após três anos de cultivo. Também é objetivo, avaliar os efeitos da adubação convencional no sulco de semeadura, comparada à adubação do sistema nas produtividades das culturas nas safras verão e outono/inverno.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Dinâmica do fósforo no solo

O fósforo é um nutriente que possui uma dinâmica muito complexa, interagindo com microrganismos e partículas com propriedades coloidais do solo, sejam elas orgânicas ou minerais de argila (PROCHNOW et al., 2017), como os óxidos de ferro e alumínio. Além dos baixos teores de P originais nos solos das regiões tropicais, há o fenômeno de fixação do P em reações com componentes do solo (adsorção). Assim, para viabilizar o uso agrícola desses solos, há necessidade de aplicação de maiores quantidades do que o exportado pela cultura (RAIJ, 2011). Quanto mais argiloso, maior será a capacidade de adsorção de P e, conseqüentemente, maior será o tamponamento do solo em P, exigindo maiores quantidades para sua correção (KURIHARA; HERNANI, 2011).

Assim, quando se aplica o nutriente, parte do P presente na solução do solo é absorvida pelas plantas e outra grande parte pode ser adsorvida aos colóides, e ainda, parte precipitada aos íons  $Fe^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  e  $Ca^{2+}$ , dependendo do pH do meio. Pode-se considerar a existência de uma relação fonte-dreno, em que muitas vezes, devido à baixa concentração de P no solo, ocorre uma competição entre as raízes das plantas e os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) pelo nutriente fornecido (NOVAIS et al., 2007). Por isso, há grande dificuldade na correção e aumento dos teores do P no solo tropicais, sendo de grande importância entender o comportamento do nutriente no solo.

O P é encontrado no solo em duas principais formas: orgânica (Po) e inorgânica (Pi). Além disso, nos solos há grande quantidade de P total, podendo chegar de 200 a 3.000 mg  $kg^{-1}$ , sem relação direta com a nutrição das plantas, pois somente cerca de 0,1% dessa quantidade é prontamente disponível na solução do solo (NOVAIS et al., 2007). A forma orgânica está associada a resíduos vegetais como húmus, tecidos microbianos ou em outros materiais orgânicos, os quais permanecem de forma estável através de ligações químicas (KURIHARA; HERNANI, 2011; MARTINAZZO et al., 2007). Na forma inorgânica, o P está associado, em sua maioria, à fração sólida do solo (argilominerais), em combinações do íon fosfato com íons de ferro, alumínio, manganês e cálcio, os quais formam compostos de alta estabilidade e insolubilidade em água (DEITH et al., 2005).

O que torna este nutriente com dinâmica complexa no solo é sua baixa mobilidade e rápida perda para a fração inorgânica. O ânion fosfato no solo pode ser perdido por três

diferentes formas, sendo elas: adsorção, precipitação e escoamento superficial. De acordo com Meurer et al. (2006) e Santos et al. (2008), a adsorção ocorre devido a rápida reação entre o íon fosfato com grupos reativos de superfície  $\text{OH}^-$  (aluminossilicatos, argilominerais silicatados, óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Mn), os quais formam complexos de esfera interna, altamente estáveis, tornando o P indisponível e com baixa taxa de retorno. Segundo Moreira et al. (2006), as argilas silicatadas têm menor poder de adsorção de P em relação aos óxidos, sendo as argilas 1:1 as que mais adsorvem o íon.

Diversos estudos mostram que os principais fatores que influenciam este processo de adsorção de P ao solo são: teor e a mineralogia da fração argila, teor de colóides amorfos, matéria orgânica, pH e alumínio trocável (BRENNAN et al., 1994; MEHADI; TAYLOR, 1998; FONTES; WEED, 1996). Para Moreira et al. (2006), o pH e a presença de alumínio trocável no solo, contribuem de forma pouco expressiva na adsorção do íon fosfato, isso porque, a maior perda é devido à presença de óxidos de Fe, a qual pode ocorrer em ampla faixa de pH.

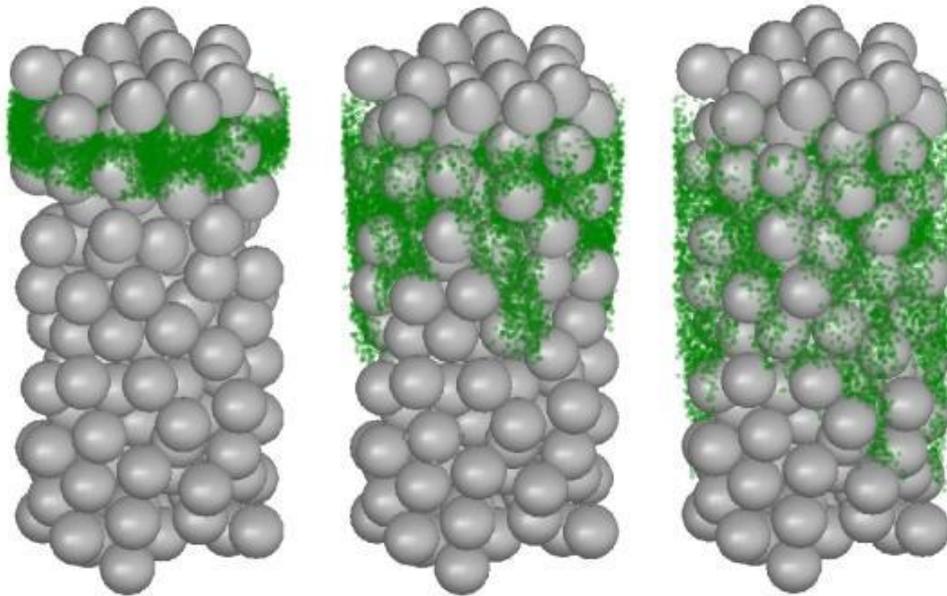
A perda por precipitação é a reação que ocorre em função da combinação do íon fosfato com íons de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , em condições ácidas e com  $\text{Ca}^{2+}$  em condições alcalinas, tornando-o indisponível para às plantas em seu tempo de cultivo (NOVAIS et al., 2007). Para reduzir essa perda por precipitação, basta corrigir a acidez do solo, aumentando-se o pH. Isso porque, à medida que o pH tende a valores próximos de 6,0 praticamente todo o  $\text{Al}^{3+}$  é neutralizado (RAIJ, 2011) e os micronutrientes  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  também são oxidados. A precipitação do íon fosfato com o  $\text{Ca}^{2+}$  ocorre quando o solo apresenta teores de pH próximos a 7,0, que não é comum nas condições brasileiras. No entanto, nos últimos anos tem aumentado a preocupação com esta forma de perda nos solos brasileiros, devido a aplicação de P a lanço na superfície de solos que receberam aplicação de calcário também em superfície (SOUSA et al., 2016).

Por sua vez, a perda de P por escoamento superficial ou erosão hídrica, é influenciada pela concentração do íon na água e nos sedimentos, e pela perda total dos mesmos por erosão (GUADAGNIN et al., 2003). De acordo com Schick et al. (2000), o manejo de solo influencia de forma direta o escoamento superficial de fósforo, no qual, manejos mais conservacionistas, como é o caso do sistema de plantio direto, reduzem o efeito da ocorrência de erosão hídrica. Portanto, a preocupação com esse tipo de perda é grande em áreas com alta declividade, pouca palha na superfície e que receberam aplicação de P a lanço.

Além das possíveis perdas de P no solo, a mobilidade deste nutriente também torna sua dinâmica complexa. Seu transporte até a superfície radicular se dá, principalmente, por meio do fluxo difusivo ou difusão. Segundo Foth e Ellis (1997), este transporte tem sido responsável por cerca de 90% do P total absorvido pelas plantas, sendo o restante transportado por meio do fluxo de massa e interceptação radicular.

A difusão é um processo considerado espontâneo, que ocorre a curtas distâncias e resulta do movimento térmico e aleatório de íons na solução do solo, em razão da diferença de concentração de um ponto mais concentrado para o menos concentrado (RUIZ et al., 2010), conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema demonstrativo do transporte de solutos por difusão decorrente da diferença de concentração entre pontos na solução do solo.



Fonte: Collaghan (2012).

Esta forma de transporte foi descrita por Nye (1979), através da fórmula matemática abaixo, a qual destaca os fatores que influem em sua dinâmica:

$$D = D_1 \theta f \frac{dC_1}{dC} \quad (1)$$

Em que, D representa o coeficiente de difusão do P no solo ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ );  $D_1$  o coeficiente de difusão do P em solução aquosa ( $0,89 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , a  $25^\circ\text{C}$ );  $\theta$  o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); f o fator de impedância ou tortuosidade (adimensional);  $C_1$  a concentração de P na solução do solo ( $\text{mol cm}^{-3}$ ), e C a concentração de fósforo adsorvido-lável ( $\text{mol cm}^{-3}$ ).

Ainda assim, outros fatores afetam de forma direta a difusividade do fosfato no solo. Segundo Lewis e Quirk (1967), o pH do solo mais elevado, com maior presença de Ca, induz mudanças na forma iônica  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  para  $\text{HPO}_4^{2-}$ , que pode resultar em redução da difusão do mesmo. Porém, solos brasileiros sob Cerrado, com baixo pH, possuem teor elevado de Al, Fe e Mn, o que também reduz o coeficiente de difusão do fosfato, uma vez que ocorre reação de precipitação.

Os nutrientes com maior dependência deste tipo de transporte são aqueles que apresentam baixa mobilidade no solo, os quais estão em baixas concentrações na solução, e que por outro lado, são requeridos em maiores quantidades, como é o caso do P. No entanto, para que sejam absorvidos de forma eficiente, dependem não só da concentração dos íons em solução, como de uma maior superfície de contato das raízes com o mesmo (JONES; JACOBSEN, 2001).

Portanto, a difusividade do íon fosfato no solo pode ser afetada por diversos fatores como temperatura, teor de água no solo, poder tampão, atividade de microrganismos, atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo (HORST et al., 2001; SANTOS et al., 2008), bem como pela adição do fosfato à solução, por meio de fertilizantes, e das fontes utilizadas (LEWIS; QUIRK 1967).

## **2.2 Formas de aplicação de fósforo no sistema de produção**

Diante da baixa disponibilidade de P nos solos tropicais, atribuída às perdas por adsorção e precipitação, faz-se necessário a aplicação de maiores quantidades de fertilizantes fosfatados, o que permite viabilizar o uso agrícola destes solos (RAIJ, 1991). Contudo, devido ao alto valor do fertilizante fosfatado no mercado e a possibilidade de perdas físicas e químicas do adubo, é preciso otimizar a eficiência no uso dos mesmos.

Buscando-se eficiência no manejo da adubação fosfatada no sistema de produção, alguns fatores devem ser considerados, tais como: dose, fonte, solubilidade e o modo de aplicação (COSTA et al., 2000). Para Brevilieri (2012), o modo de aplicação é um fator de grande relevância, uma vez que pode alterar a velocidade com que o mesmo reage no solo, e assim, determinar o grau de eficiência e de disponibilização de P via adubação. Segundo Prochnow et al. (2017), o modo de aplicação mais recomendado é o localizado no sulco de semeadura, o qual visa reduzir o contato fertilizante-solo, bem como aumentar o seu acesso às plantas.

No entanto, segundo Barbosa et al. (2015), a forma de aplicação que tem ganhado destaque no cenário agrícola de produção de grãos, devido a seu alto rendimento operacional, é a aplicação de P a lanço em superfície e em área total. Para Nunes et al. (2011), a adoção desta técnica permite maior agilidade na operação de semeadura, bem como adubação antecipada na lavoura. Entretanto, de acordo com Bordoli e Mallarino (1998), a aplicação de P, a lanço, deve ser preferida em áreas que já apresentam teores de P acima do nível crítico, bem como pH corrigido, o que permitirá com que perdas por adsorção e precipitação sejam menores.

Prado et al. (2001) avaliaram os efeitos de modos de aplicação do fertilizante fosfatado em um solo argiloso, com 66% de argila, e teor médio de P. A produtividade da cultura do milho foi maior quando o P foi aplicado no sulco, comparado a aplicação a lanço. Resultados semelhantes foram observados por Moterle et al. (2009), com a cultura da soja em solo com teor médio de fósforo.

Em experimento realizado em solos com teor adequado a alto de P, demonstraram que os diferentes modos de aplicação (sulco ou a lanço) não afetaram as produtividades de grãos das culturas trabalhadas (PAVINATO; CERETTA, 2004; NUNES et al., 2011; SOUSA et al., 2016). Para Sousa et al. (2016), após a correção inicial do solo com elevação do teor de P de um nível baixo para adequado, as produtividades da soja e do milho não diferiram entre as formas de aplicação durante os 17 anos de avaliação.

Neste mesmo sentido, em trabalho realizado por Barbosa et al. (2015), em solo inicialmente com teor médio de P (SOUSA et al., 2004), a adubação fosfatada, com 75% do fertilizante aplicado a lanço e 25% na linha de plantio não foi suficiente para suprir as necessidades nutricionais das plantas de soja. Entretanto, com 100% da dose de P na linha de semeadura, houve maior produtividade e rendimento de grãos. Ressalta-se que, em solos com teor baixo ou médio de P, a forma de aplicação mais recomendada é no sulco de semeadura, pois desta forma ocorrerá a correção gradual dos teores de P no solo. Ainda, para solos com teores adequados ou altos de P existe uma melhor flexibilização quanto ao modo de aplicação, podendo não haver diferenças em produtividade. No entanto, para esta condição, deve-se atentar a possibilidade de erosão no solo, pois pode gerar problemas ambientais e econômicos.

Resende et al. (2006) avaliaram diferentes modos de aplicação de P em solo inicialmente com teor baixo do nutriente (SOUSA et al., 2004), no qual o P foi aplicado a lanço, no sulco de semeadura com dose única e no sulco de semeadura com dose parcelada em 3 anos. Neste caso, a produtividade de milho não variou com os diferentes tratamentos, ao

contrário do que se esperava. Por outro lado, Castro et al. (2016), trabalhando em solo com teor inicial médio de P (SOUSA et al., 2004), a adubação fosfatada a lanço se mostrou mais eficiente em relação a adubação no sulco de semeadura, mesmo o cultivo do milho tendo passado por período de veranico.

Um ponto importante a ser destacado refere-se à relação existente entre aplicação de fósforo e crescimento de raízes. De acordo com Prochnow et al. (2017), o sistema radicular das plantas tende a se desenvolver em direção ao P, portanto, aplicações a lanço podem favorecer o crescimento das raízes em superfície, uma vez que têm maior acúmulo do nutriente nas camadas superficiais. A consequência deste fato está relacionada a condições de veranico, onde ocorre o secamento da camada superficial do solo, levando as plantas a estresses hídricos maiores com expressiva redução do potencial produtivo.

Por outro lado, Guareschi et al. (2008), afirmam que a aplicação de quantidades elevadas de adubo no sulco de semeadura pode atrasar a semeadura das culturas e levar a perdas de produtividade. Isto ocorre devido ao maior tempo necessário para os abastecimentos dos implementos, podendo atrasar o término da atividade e efetuar a semeadura fora da época recomendada. Por sua vez, a adubação fosfatada a lanço não é recomendada para solos com baixos teores de P, devendo ser realizada somente em locais em que o teor de fósforo já se encontra em valores adequados e/ou altos, conforme outros resultados disponibilizados na literatura (NUNES et al., 2011; SOUSA et al., 2016; ZANCANARO et al., 2018).

Acredita-se que nos solos com teores adequados e/ou altos de nutrientes, aumenta-se a flexibilidade de fornecimento de P às culturas, o qual poderia ser fornecido no momento operacionalmente mais adequado ao produtor, pois não há resposta agrônômica ao nutriente, o qual é fornecido apenas para repor o exportado pelas culturas. Nesta condição, poderia se pensar na adubação do sistema de produção com P, visando adubar mais intensamente a cultura mais exigente (ALTMANN, 2012) e/ou mesmo, o enterrio do nutriente antes da semeadura da cultura de verão e/ou de inverno, um dos focos de estudo deste trabalho.

### **2.3 Adubação do sistema de produção**

O sistema de produção pode ser definido pelo conjunto de sistemas de cultivo, que é composto por práticas comuns de manejo, visando uma espécie vegetal, com a finalidade de produção da mesma e que vai desde a elaboração de um planejamento até o processo de pós-colheita do produto. A partir disso, o sistema de produção pode ser classificado quanto a sua

complexidade, podendo ser monocultivo, sistema em sucessão de culturas, sistema em rotação de culturas, sistema em consorciação de culturas e sistema de integração (HIRAKURI et al., 2012).

Ao se trabalhar dentro do sistema de produção com o sistema de rotação de culturas, existe uma forma de se fazer a adubação do sistema, que é uma tecnologia que visa adubar o sistema de produção como um todo e não apenas uma única cultura (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2010). O principal objetivo desta forma de adubação é simular as condições sustentáveis que ocorrem naturalmente em uma floresta, onde os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo estão em interação contínua. No entanto, ao pensar em adotar este tipo de tecnologia, é preciso que alguns requisitos estejam sendo adotados na área, como sistema de plantio direto e rotação de culturas (ALTMANN, 2012).

O incremento de matéria orgânica (palha) ao sistema e produção, é de extrema importância e está diretamente associado a rotação de culturas. Isso porque, ao fazer um cultivo diversificado, estima-se que os diferentes sistemas radiculares das plantas conseguirão atuar em profundidades diferentes e, com isso, será possível reciclar diversos nutrientes, principalmente aqueles que são mais facilmente perdidos, seja por lixiviação ou por escoamento superficial, trazendo-os para camadas superficiais e aumentando seu uso pelas culturas sucessoras. Além disso, o planejamento de um bom sistema de rotação de culturas deve preconizar que a cultura sucessora seja beneficiada pela cultura antecessora, para evitar problemas futuros à lavoura (ALTMANN, 2012).

Sabendo-se os principais pilares do sistema de produção é preciso pensar na adubação do sistema e fazer o seu correto planejamento. Para isso, é necessário ter o conhecimento sobre quais são as culturas que têm maior resposta à adubação, que no caso da produção de grãos são milho e feijão. Neste caso, estes cultivos podem receber maiores doses de adubos, acima de suas necessidades nutricionais, e as culturas menos responsivas (soja e trigo), serão cultivadas com uma dose de arranque e com a adubação residual da cultura anterior (BENITES et al., 2010; ALTMANN, 2012; LACERDA et al., 2015).

O cálculo para a adubação do sistema será mensurado através dos teores de nutrientes presentes no solo, avaliado por uma análise química, bem como pelos níveis de adubação e exportação da cultura a ser implantada, e pela demanda da próxima cultura, além de possíveis perdas. É importante ressaltar que áreas com solos arenosos, nutrientes como N e K devem ser aplicados visando a cultura específica, e não o sistema de produção, pois estes nutrientes são mais facilmente perdidos (ALTMANN, 2010).

Para o caso do fósforo, a aplicação a lanço pode ser inserida nesta forma de adubação do sistema. Entretanto, em solos ácidos com baixa fertilidade, a aplicação a lanço expõe as partículas do adubo em maior contato com o solo, e assim, as perdas serão mais acentuadas e os reflexos serão sentidos em redução da produtividade (ALTMANN, 2012).

## **2.4 Fósforo no metabolismo das plantas**

O fósforo é um dos nutrientes de importância fundamental ao metabolismo das plantas. Como fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), o P atua como componente integral de compostos das células vegetais, incluindo intermediários da respiração e fotossíntese, fosfato-açúcares e fosfolipídeos, que compõe as membranas vegetais (TAIZ; ZAIGER, 2013). Além disso, o P possui papel fundamental na síntese e degradação de macromoléculas, como amido, proteínas e gorduras (FAQUIN, 2005).

Embora o P seja requerido em todas as fases de desenvolvimento das plantas, devido as suas diversas funções em seu metabolismo, um desequilíbrio nutricional nos estádios iniciais de crescimento limitaria o potencial produtivo das culturas (GRANT et al., 2001). Entretanto, se este fornecimento for menor, apenas nas fases seguintes à inicial, o reflexo na produtividade será menor (GRANT et al., 2005). A exemplo disso, Lauzon e Miller (1997) demonstraram que a deficiência de P no solo para a cultura do milho, entre V4 e V5, afetou o rendimento de grãos em maior grau em relação à deficiência ocasionada nos estádios subsequentes.

Os principais sintomas de deficiência deste nutriente são: emergência e crescimento lento em plantas jovens, má formação das folhas, que podem conter pequenas manchas de tecido morto, denominado manchas necróticas. Além disso, sua falta pode levar a um acúmulo de antocianina excessivo nas folhas, principalmente em folhas velhas, tornando-as arroxeadas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Ainda, segundo Amado et al. (2010), a deficiência deste nutriente no solo reduz o crescimento das plantas, bem como o potencial produtivo das culturas.

De acordo com Klepker e Anghinoni (1996), o suprimento de fósforo, em quantidades adequadas às plantas, permite maior crescimento do sistema radicular, tanto em comprimento quanto em massa, o que é essencial para absorção de água e nutrientes em maiores profundidades. De acordo com Crusciol et al. (2005) e Silva-Olaya et al. (2017), o maior

crescimento e densidade de raízes podem ser observados em camadas do solo, as quais apresentam teores adequados de P, podendo se restringir a superfície ou não.

Neste sentido, segundo Schoninger et al. (2015), o incremento de P no cultivo de feijão, conferiu maior altura de plantas, aumento de massa seca da parte aérea, número de vagens por planta, número de grãos por vagens, com maior produtividade da cultura.

## **2.5 Importância das raízes e comportamento do sistema radicular do milho**

O sistema radicular representa uma interface de extrema importância para as plantas (RÉLLAN-ÁLVAREZ et al., 2016). Suas funções primárias mais conhecidas são: sustentação e absorção de água e nutrientes. No entanto, também atuam na produção de metabólitos secundários, reguladores vegetais (fitohormônios) e funciona como reservatório de substâncias, bem como fonte para propagação vegetal (RAVEN et al., 1996). No solo, o papel das raízes se estende a melhorar a qualidade química, física e biológica do mesmo, uma vez que aumenta o aporte de carbono, cicla nutrientes e gera atividade de microrganismos (BRADY; WEIL, 2008; RASSE et al., 2005).

Diante do importante papel das raízes às plantas e ao solo, é fundamental criar condições para que as mesmas consigam crescer, se desenvolver e desempenhar suas funções com êxito. Para isso, faz-se necessário manejar o solo de forma adequada, principalmente, visando reduzir acidez por  $Al^{3+}$ , elevar teores de nutrientes, sobretudo Ca e P, regular a temperatura e umidade do solo, assim como, os níveis de compactação do mesmo (BAO et al., 2014; ROBBINS; DINNENY, 2015). Desta forma, as raízes conseguirão explorar um maior volume de solo possível, adquirindo com maior facilidade recursos adequados à sua nutrição.

São diversos os fatores que influenciam o crescimento do sistema radicular das plantas, dentre eles, a presença de P na solução do solo (ELWAN, 1993). Segundo Amtmann et al. (2006), regiões com alta disponibilidade de P, provocam modificações na arquitetura do sistema radicular, de tal forma, que faz com que ocorra maior proliferação das raízes, principalmente em direção ao nutriente. Portanto, o modo de aplicação do fertilizante fosfatado, poderá estimular o direcionamento do crescimento das raízes, as quais poderão se desenvolver em camadas mais profundas ou se limitar à superfície do solo.

No caso do milho, a arquitetura de seu sistema radicular é bastante complexa, uma vez que é composta por diferentes raízes que se desenvolvem em estádios diferentes ao longo do crescimento e desenvolvimento da planta (HOCHHOLDINGER et al., 2004). Após a

semeadura, as sementes de milho absorvem água e aumentam seu volume. A partir desse momento, a radícula, a qual tem origem no embrião, começa a crescer, sendo a primeira parte da planta a se alongar. Este órgão é responsável pelo estabelecimento inicial da plântula de milho no solo (BORÉM et al., 2017). Posteriormente, o sistema radicular primário ou seminal, começa a se alongar e se desenvolver. Nesta etapa, as raízes são pouco ramificadas, e são responsáveis pela nutrição da planta (MAGALHÃES et al., 2002). Além disso, as raízes seminais são consideradas como temporárias, pois após a emergência da plântula, seu crescimento é reduzido, e após o estágio V<sub>3</sub>, em que as plantas possuem três folhas expandidas, o crescimento é cessado (BORÉM et al., 2017).

Esta primeira fase de desenvolvimento radicular, apesar de ser curta (8-12 dias), tem grande importância, pois fixa a plântula ao solo, dando sustentação a mesma (RITCHIE et al., 2003). De acordo com Borém et al. (2017), estas raízes têm elevadas quantidades de pêlos e baixa taxa de ramificação, sendo inicialmente, sua principal função, a absorção de água e oxigênio, objetivando a ativação do seu metabolismo enzimático e consumo de reservas contidas na semente. Nos demais estádios de desenvolvimento do milho, as raízes seminais permanecem ativas, contribuindo com a absorção de água e nutrientes.

Durante a emergência, o ponto de crescimento do milho se encontra à profundidade de 2,5 a 4,0 cm abaixo da superfície do solo. A essa profundidade o sistema radicular definitivo ou nodal, inicia seu crescimento, alongando-se desde V<sub>1</sub>, em que a planta apresenta uma folha expandida e vai até o estágio reprodutivo R<sub>3</sub>, em que os grãos são classificados como pastosos (MAGALHÃES et al., 2002). Em torno do estágio V<sub>6</sub>, em que a planta apresenta seis folhas expandidas, este sistema se torna a principal responsável pela absorção de água e nutrientes (BORÉM et al., 2017).

Após o estágio V<sub>8</sub>, em que a planta apresenta oito folhas expandidas, inicia-se o desenvolvimento das raízes adventícias que contribuem para a sustentação da planta, as quais se estabelecem acima da superfície do solo. Elas podem eventualmente absorver água e nutrientes, através de seus pêlos radiculares na superfície do solo (MAGALHÃES et al., 1995; BORÉM et al., 2017). Entretanto, a principal forma de absorção de água e nutrientes, como o P, é através das raízes seminais e nodais.

## 2.6 Avaliação do sistema radicular do milho

Estudos voltados para a observação do crescimento das raízes, em condições de campo, são muito importantes para o manejo da lavoura. Principalmente, para otimizar as práticas de adubação, irrigação, descompactação do solo, dentre outros (ZONTA et al., 2006). Segundo Vasconcelos et al. (2003), a partir da avaliação da distribuição do sistema radicular ao longo do perfil, torna-se possível compreender melhor o que está acontecendo na parte aérea da planta, bem como seu potencial de produção. Fenômenos que afetam a parte aérea e produtividade das culturas são reflexos de um sistema radicular bem estabelecido ou não.

A quantificação do sistema radicular pode ser feita de algumas formas, e uma delas, que já foi bastante utilizada, é através da relação entre 'raiz: parte aérea', a qual assume que a produção de massa seca na parte aérea corresponde, de forma similar, e em mesma proporção, à de massa seca de raízes. No entanto, estas afirmações passaram a ser questionadas devido à dinâmica do crescimento radicular ser complexa, pois varia no espaço e no tempo, e são influenciadas por condições ambientais e de solo (HOOKER et al., 2000).

Para isso, o estudo de crescimento de raízes deve ser determinado de outras maneiras. Estas vão desde as mais simples às mais complexas. A escolha de uso de cada uma delas varia de acordo com os objetivos do trabalho, das características avaliadas e dos recursos financeiros disponíveis (PIVETTA et al., 2011). Em geral, estas metodologias avaliam diretamente o sistema radicular da planta, a partir da mobilização do solo e amostragem do material vegetal (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008), com isso, possibilitam quantificá-las em campo.

Dentre as técnicas, tem-se o método direto, composto por: método da trincheira, monólito, placa de pregos, trado, rhizotron e minirhizotron (POLOMSKI; KUHN, 2002). Os mais utilizados são aqueles em que é preciso realizar grande mobilização de solo, como: placa de pregos, trincheira, trado e monólito (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008). Nestas avaliações, as raízes são expostas e contadas para posterior quantificação. É importante ressaltar, que cada método difere um do outro em relação a forma de amostragem e avaliação.

O método da trincheira é um tipo de avaliação feita a campo, a qual permite explorar características morfológicas quantitativas como: arquitetura e biomassa das raízes, de forma individual, e mensurar aspectos qualitativos como: comprimento, diâmetro e volume de solo explorado (POLOMSKI; KUHN, 2002). Por ser um método prático, sem necessidade de emprego significativo de recursos financeiros, esse foi o escolhido neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALTMANN, N. Adubação de sistemas integrados de produção em plantio direto: resultados práticos no Cerrado. **Informações Agronômicas**, n. 140, p. 1-8, 2012.
- \_\_\_\_\_. **Plantio Direto no Cerrado: 25 anos acreditando no Sistema**. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, RS, 2010. p. 568.
- AMADO, T. J. C.; SCHLEINDWEIN, J. A.; FIORIN, J. E. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. In: **Soja – Manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 243.
- AMTMANN, A.; HAMMOND, J. P.; ARMENGAUD, P.; WHITE, P. J. Nutrient sensing and signaling in plants: potassium and phosphorus. **Advances in Botanical Research**, New York, v. 43, p. 209-256, 2006.
- BAO, Y.; AGGARWAL, P.; ROBBINS, N.E.; STURROCK, C.J.; THOMPSON, M.C.; TAN, H.Q.; THAM, C.; DUAN, L.; RODRIGUEZ, P.L.; VERNOUX, T. Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, v. 111, p. 9319-9324, 2014.
- BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 3, 2015.
- BENITES, V. de M.; POLIDORO, J.C.; RESENDE, A.V. Oportunidades para a inovação tecnológica no setor de fertilizantes no Brasil. **Boletim Informativo da SBCS**, v. 35, p.18-21, 2010.
- BORDOLI, J. M.; MALLARINO, A. P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p. 27-33, 1998.
- BORÉM, A.; GALVÃO, J. C. C.; PIMENTEL, M. A. **Milho do Plantio a Colheita**. Viçosa: UFV, 2017. p. 50-76.
- BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. The soils around us. The Nature and Properties of Soils, 14th ed. New Jersey and Ohio: Pearson Prentice Hall, 2008. p. 1-31.
- BRENNAN, R. F.; BOLLAND, M. D.; JEFFERY, R. C.; ALLEN, D. G. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties. **Communications Soil Science Plant Analysis**, v. 25, n. 15/16, p. 2785-2795, 1994.
- BREVILIERI, R. C. **Adubação fosfatada na cultura da soja em Latossolo Vermelho cultivado há 16 anos sob diferentes sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2012. p. 52.
- CASTRO, L. R.; REIS, T. C.; JÚNIOR, O. F.; DE ALMEIDA, R. B. S.; ALVES, D. S. Diferentes doses de fósforo e formas de aplicação na cultura do milho, em barreiras–Bahia. **Agrarian**, v. 9, p. 47-54, 2016.

COLLAGHAN, P. **Simulated dispersion in a beadpack**. Magnetic Resonance Physics. University of Wellington:Victoria, 2012.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Portal de informações Agropecuárias. Observatório Agrícola, Safra Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 10 jan. 2019.

COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja-trigo em sistema de plantio direto**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000. p. 146.

CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; ALVAREZ, R. D. C. F.; LIMA, E. D. V.; TIRITAN, C. S. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, p. 643-649, 2005.

DEITH, L. G.; ANDERSON, S. A.; HOFFMANN, B. W. Soil and fertilizer sources of plant nutrients. **Management of Wisconsin Soils**, v. 3588, p. 87, 2005.

ELWAN, I. M. Response of nutrient status of plants in calcareous soils receiving phosphorus fertilization and mycorrhiza. **Annals of Agricultural Science**, Cairo, v. 38, n. 2, p. 841-849, 1993.

ENCIDE-OLIBONE, A. P.; OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Atividade radicular da soja: definição de um método. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 899-903, 2008.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. p.186.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption y clays from Brazilian Oxisoils: relationships whit specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, p. 377-51, 1996.

FOTH, H. D.; ELLIS, B. G. **Phosphorus**. In Soil Fertility, 2nd ed., Ed. H.D, Lewis Publishers, Tokyo, p. 145-161, 1997.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, n. 81, p. 211-224, 2001.

GRANT, C.; BITTMAN, S.; MONTREAL, M.; PLENCHETTE, C.; MOREL, C. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. **Canadian Journal of Plant Science**, n. 85, p.3-14, 2005.

GUADAGNIN, J.C.; BERTOL, I.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J. Perdas de nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo em um Cambissolo Húmico alumínico léptico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2003.

GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R.; SOUCHIE, E. L.; CORREA DA ROCHA, A. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, 2008.

HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais**. 2014. 159 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.

HIRAKURI, M. H.; DEBIASI, H.; PROCÓPIO, S. D. O.; FRANCHINI, J. C.; CASTRO, C. D. **Sistemas de produção**: conceitos e definições no contexto agrícola. Londrina: Embrapa Soja, 14, 2012.

HOCHHOLDINGER, F.; WOLL, K.; SAUER, M.; DEMBINSKY, D. Genetic dissection of root formation in maize (*Zea mays*) reveals root-type specific development programmes. **Annals of Botany**, London, v. 93, p. 359-368, 2004.

HOOKE, J.E.; HENDRICK, R.; ATKINSON, D. The measurement and analysis of fine root longevity. In: SMIT, A. L., BENGOUGH, A. G., ENGELS, C., VAN NOORDWIJK, M.,

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 211-223, 2001.

JONES, C.; JACOBSEN, J. Plant nutrition and soil fertility. In: **Nutrient Management Module**, No.2. Nutrient Management a self-study course from MSU Extension Continuing Education Series. Montana State University, p. 4449. 2001. 4449-2.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, p.79-86, 1996.

KURIHARA, C.; HERNANI, L. **Adubação antecipada no sistema plantio direto**. Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 2011.

LACERDA, M. C.; STEPHAN, A. **Adubação a lanço na cultura do feijoeiro comum**. Embrapa Arroz e Feijão-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E), 2016.

LACERDA, J. J. de JESÚS; RESENDE, Á. V. de; NETO, A. E. F.; HICKMANN, C.; DA CONCEIÇÃO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p.769-778, 2015.

LAUZON, J. D.; MILLER, M. H. Comparative response of corn and soybean to seed-placed phosphorus over a range of soil test phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, n. 3-5, p. 205-215, 1997.

LEWIS, D. G.; QUIRK, J. P. Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. **Plant and soil** **XXVI**, n. 1, p. 99-118, 1967.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; PAIVA, E. **Fisiologia da planta de milho**. EMBRAPA-CNPMS, 1995. (Circular técnica).

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O.; GOMIDE, R. L. **Fisiologia da cultura do milho. Fisiologia da cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE), 2002.

- MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 563-570, 2007.
- MEHADI, A. A.; TAYLOR, R. W. Phosphate adsorption by two highly-weathered soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 52, p. 627-632, 1998.
- MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 117-162.
- MOREIRA, F. L. M.; MOTA, F. O. B.; CLEMENTE, C. A. DE AZEVEDO, B. M.; DO BOMFIM, G. V. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n.1, p. 7-12, 2006.
- MOTERLE, L. M.; DOS SANTOS, R. F.; DE LUCCA, A.; SCAPIM, C. A.; DO CARMO LANA, M. Influência da adubação com fósforo e potássio na emergência das plântulas e produtividade da cultura da soja. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 256-265, 2009.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.V.H., BARROS, N.F., FONTES, R.L.F., CANTARUTTI, R.B., NEVES, J.C.L. (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8. p. 471-537.
- NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 877-888, 2011.
- NUNES, U. R.; JÚNIOR, V. C. A.; SILVA, E. de B.; SANTOS, N. F.; COSTA, H. A. O.; FERREIRA, C. A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 943-948, 2006.
- NYE, P. H. Diffusions of ions and uncharged solutes in soil and soil clays. **Advancis Agonomy**, v. 31, p. 225-272, 1979.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; CASTRO, C. de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F.A. de. Soja. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.). **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**. **International Plant Nutrition Institute**, Piracicaba v. 3 p.1-38, 2010.
- PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, n. 34, p. 1779-1784, 2004.
- PELLERIN, S., VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) **Root methods: a handbook**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. p. 273-304.
- PIVETTA, L. A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G. P. D.; ROSOLEM, C. A. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 1547-1554, 2011.

- POLOMSKI, J.; KUHN, N. Root Research methods. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Orgs.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 295-322.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 25, p. 85-92, 2001.
- PROCHNOW, L. I.; DE RESENDE, A. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A. D.; FRANCISCO, E., CASARIN, V.; PAVINATO, P. **Localização do fósforo em culturas anuais na agricultura nacional: situação importante, complexa e polêmica**. Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2017.
- RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba (Brasil), 1991.
- RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant Soil**, v. 269, p. 341-356, 2005.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; CURTS, H. **Biologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996. p. 728.
- RELLÁN-ÁLVAREZ, R.; LOBET, G.; DINNENY, J. R. Environmental control of root system biology. **Annual review of plant biology**, v. 67, 2016.
- RESENDE, A. V. de.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N., FAQUIN, V.; KINPARA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da Região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 453-466, 2006.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. Como a planta de milho se desenvolve. **Informações agronômicas**, v. 103, p. 1-19, 2003.
- ROBBINS, N. E.; DINNENY, J. R. The divining root: Moisture-driven responses of roots at the micro-and macro-scale. **Journal of Experimental Botany**, 2015.
- ROSOLÉM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 448-455, 1998.
- RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; ROCHA, G. C.; BORGES J. R. J. C. F. Transporte de solutos no solo. In: JONG VAN LIER, Q. (Ed). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 213-240.
- SANTOS, D. R. dos.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 38, n. 2, p. 576- 586, 2008.

- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JR., A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 24, p. 427-436, 2000.
- SCHONINGER, E. L.; LANGE, A.; MENEGON, T. G.; CAIONE, G. Produtividade da cultura do feijoeiro submetido a doses de fósforo e nitrogênio. **Agrarian**, v. 8, n. 30, p. 387-398, 2015.
- SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, P.; EDUARDO, C.; CERRI, C. C. Comparação de métodos de amostragem para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 34, n. 1, p. 7-16, 2017.
- SOUSA, D. M. G. de; REIN, T.; SANTOS JUNIOR, J. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Embrapa Cerrados-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2016.
- SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147-168.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetale**. Porto Alegre: Artmed, 2013.
- VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 2011.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D., JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, 2003.
- ZANCANARO, L.; ONO, F.B.; KAPPES, C.; VALENDORFF, J.D.P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A.; SEMLER, T. D.; VIDOTTI, M. V. Adubação fosfatada no sulco de semeadura e em superfície. Fundação MT. Boletim de pesquisa, Rondonópolis (Fundação MT. Boletim, 18), p.82, 2018.
- ZONTA, E.; BRASIL, F. D. C.; GOI, S. R.; ROSA, M. D. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. **Nutrição mineral de plantas**, v. 1, 2006.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO\***

## **Artigo 1 – Distribuição de raízes de milho e produtividade de culturas anuais, em função da adubação fosfatada convencional e de sistema**

### **RESUMO**

A adubação fosfatada a lanço, bem como a adubação de sistema, tem ganhado espaço entre os produtores devido ao aumento de rendimento operacional no momento da semeadura, permitindo com que a operação possa ser executada dentro de uma adequada janela de plantio. No entanto, o grande desafio é a dinâmica complexa do fósforo (P) no solo, podendo sofrer perdas por agentes físicos, como escoamento superficial e/ou químicas, através de reações de adsorção e precipitação. Suspeita-se ainda, que ao se acumular nas camadas superficiais, devido a sua baixa mobilidade, poderia influenciar o crescimento do sistema radicular, concentrando-o na superfície. Diante disso, objetivou-se, primeiramente, avaliar o efeito da adubação convencional (sulco) e de sistema na produtividade de culturas anuais. Além disso, foi avaliada a distribuição do sistema radicular de milho pelo método da trincheira e os teores de P (Mehlich 1 e Resina) no perfil do solo. O experimento foi instalado com delineamento de blocos casualizados, em esquema de faixas com 5 tratamentos e 5 repetições. Os tratamentos foram compostos por um tratamento controle e um tratamento com adubação fosfatada convencional (sulco), além de três com a adubação fosfatada do sistema de produção, sendo um realizado a lanço 30 dias antes da semeadura da cultura de verão; outro no sulco, plantando o adubo 30 dias antes da semeadura das culturas no verão e no sulco das culturas de outono/inverno. Após 6 cultivos, realizados no período de 2015 a 2018, foi observado maior acúmulo de P na camada superficial do solo, quando fornecido via adubação do sistema de produção. Além disso, observou-se maior distribuição do sistema radicular entre as camadas 0-20 cm de profundidade, sendo pouco influenciado pelas diferentes formas de adubação fosfatada. As produtividades das culturas de verão não foram influenciadas pelas formas de aplicação de P, isso porque as condições climáticas foram favoráveis, enquanto que as culturas de outono/inverno apresentaram maiores produtividades, quando o adubo foi fornecido no sulco de semeadura.

**Palavra-chave:** Adubação do sistema de produção. Adubação fosfatada a lanço. Crescimento radicular.

### **ABSTRACT**

The objective of the work was to consolidate the production of matches by the producers, as a fertilizer for the production system with the help of phosphorus or no sowing furrow. This technique has been the space between companies for the increase of operational performance, allowing a planning window to be executed as planned, and so the crops are executed with good historical availability to start their growth and development. However, the great challenge in the use of this technique is that phosphorus is not able to submerge in the soil, but its dispersion capacity in the superficial layers and, a conscious consequence is that it is the largest of the development of asphalt in the system the surface layer of the soil dries, with it, as a. In this work we analyzed the results obtained in the analysis of the results obtained in the analysis of the results obtained in the analysis of the results obtained, groove in the summer and no furrow autumn / winter. After 6 crops grown in the area, in the period from

2015 to 2018, a greater accumulation of P was observed in the topsoil when it was supplied through the fertilization of the production system. In addition, a large distribution of the root system was observed between 0 to 20 cm deep, being little influenced by the different forms of phosphate fertilization. The summer cultures were not influenced by the forms of action of autumn / winter were influenced by the forms of application of P, being more responsive when they were made of conventional fertilization.

**Keyword:** Fertilization of the production system. Phosphate fertilization to haul. Root growth.

## 1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros são originalmente ácidos e pobres em nutrientes, principalmente em P. Desta forma, após a correção da acidez, este nutriente deverá ser um dos primeiros a ser corrigido, pois é um grande limitante ao crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, principalmente em áreas sob Cerrado. Entretanto, há grande dificuldade na correção e aumento dos teores disponíveis de P no solo, pois o nutriente possui uma dinâmica muito complexa, interagindo com microrganismos e partículas com propriedades coloidais do solo, sejam elas orgânicas ou minerais de argila (PROCHNOW et al., 2017), como os óxidos de ferro e alumínio. Por isso, nos solos das regiões tropicais relata-se que um dos fatores responsáveis pela baixa disponibilidade de P, é o fenômeno de fixação com componentes do solo, necessitando, portanto, da aplicação de maiores quantidades do que o exportado pelas culturas (VAN RAIJ, 2011). Além disso, quanto mais argiloso for o solo, maior será a capacidade de adsorção de P e, conseqüentemente, maior será o tamponamento de P, exigindo maiores quantidades para sua correção (KURIHARA; HERNANI, 2011).

Ao se aplicar o P nesses solos, parte do nutriente presente na solução é absorvida pelas plantas, outra grande parte é adsorvida aos colóides e, ainda, parte é precipitada aos íons  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , dependendo do pH do meio. Pode-se considerar a existência de uma relação fonte-dreno, em que muitas vezes, devido à baixa concentração do nutriente no solo, ocorre uma competição entre as raízes das plantas e os óxidos de ferro e alumínio pelo nutriente fornecido (NOVAIS et al., 2007).

Desta forma, o manejo inicial mais recomendado da adubação fosfatada é através da aplicação de fontes solúveis de P no sulco de semeadura (NUNES et al., 2011). Porém, a aplicação a lanço vem conquistando os agricultores, devido ao alto rendimento operacional,

tanto na distribuição do nutriente quanto no momento da semeadura. O fato é que grandes propriedades, localizadas em sua maior parte no Brasil Central, se adaptaram para aplicação em superfície, passando por grandes mudanças tecnológicas e organizacionais, substituindo maquinários, funcionários e operações, visando ajustes para esse propósito (PROCHNOW et al., 2017).

De acordo com Guareschi et al. (2008), a aplicação de quantidades elevadas de adubo no momento da semeadura pode atrasar esta etapa e levar a perdas de produtividade. Isto ocorre devido ao maior tempo necessário para os abastecimentos constantes do maquinário durante a semeadura, podendo resultar no término da atividade fora da época recomendada. No entanto, a adubação fosfatada a lanço, não é recomendada para solos com baixos teores de P, devendo ser realizada somente em locais em que o teor desse nutriente já se encontra em valores adequados e/ou altos, conforme outros resultados disponibilizados na literatura (NUNES et al., 2011; SOUSA et al., 2016; ZANCANARO et al., 2018).

Acredita-se que nos solos com teores adequados e/ou altos de nutrientes, aumenta-se a flexibilidade de fornecimento de P às culturas, o qual poderia ser fornecido no momento operacionalmente mais adequado ao produtor, pois não há resposta agrônômica à aplicação do nutriente, o qual é aplicado somente para repor as quantidades exportadas pelas culturas. Nesta condição pode-se pensar na adubação do sistema de produção com P, visando adubar mais intensamente a cultura mais exigente (ALTMANN, 2012) e/ou mesmo o enterrio do nutriente antes da semeadura da cultura de verão e/ou de inverno, um dos focos de estudo deste trabalho.

Por outro lado, deve-se destacar que há uma íntima relação entre o local de aplicação do P e o crescimento radicular, observando-se maior proliferação de raízes nos pontos de maior concentração do nutriente no solo (PROCHNOW et al., 2017). Ainda, sabe-se que para que haja absorção de P pelas raízes, é preciso que tenha umidade no solo, sendo assim, em situações de veranico, em que há o secamento da superfície do solo em direção às camadas mais profundas, além de gerar estresse à planta por falta de água, pode ainda limitar a absorção do nutriente. No entanto, há pouca informação na literatura sobre o desenvolvimento do sistema radicular das plantas em locais com diferentes formas de aplicação de P.

Diante disso, objetivou-se avaliar a distribuição do sistema radicular de milho pelo método da trincheira e os teores de P (Mehlich 1 e Resina) no perfil do solo após três anos de cultivo, bem como o efeito da adubação convencional (sulco) e de sistema no rendimento das culturas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Santa Helena, em Nazareno, Mesorregião do Campo das Vertentes, Minas Gerais, Brasil (21°15'40" Sul e 44° 30'30" Oeste, altitude de 1020 m), em área manejada há 15 anos sob sistema de plantio direto (SPD). Os dados de temperatura e precipitação pluviométrica foram obtidos através da estação meteorológica presente na própria fazenda e estão correlacionados com dados de semeadura e colheita dos cultivos desde a safra 2015/2016 até a safra 2017/2018, conforme a Figura 1.

O solo é um Latossolo Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 2006), de textura argilosa. As propriedades químicas do mesmo, antes da instalação do experimento, estão descritas na Tabela 1. Os teores médios dos nutrientes estão próximos do considerado adequado para a manutenção de um ambiente de alto potencial produtivo. Para P resina o teor é alto (21-35 mgdm<sup>-3</sup>), já para P Mehlich 1 o teor é médio (5,1-8,0 mgdm<sup>-3</sup>, considerando-se o solo com 50% de argila) e os teores de K >80 mgdm<sup>-3</sup>, Ca > 2,0 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> e Mg >0,5 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup>, são adequados de acordo com Sousa e Lobato (2004). Portanto, pode-se dizer que estes teores caracterizam o solo como sendo de fertilidade construída.

Tabela 1 – Propriedades químicas do solo antes da instalação do experimento.

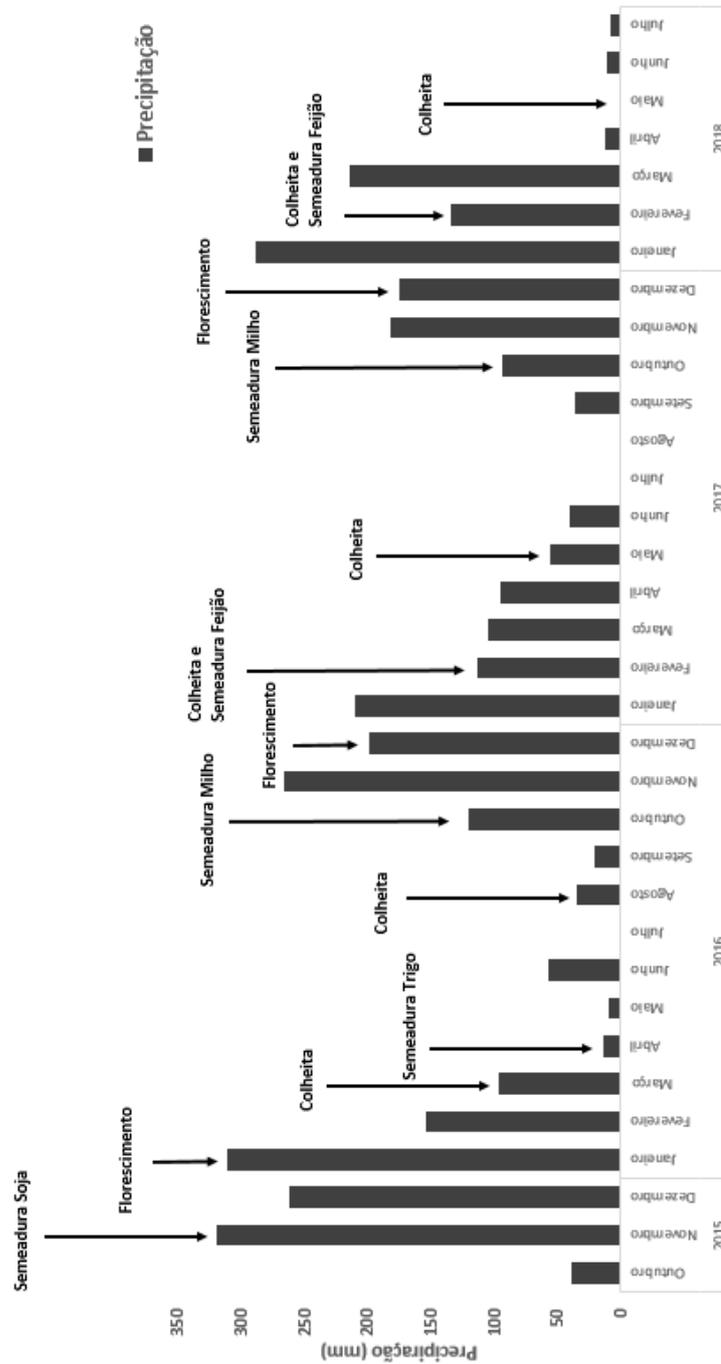
Profundidade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	K	P <sup>1</sup> (mgdm <sup>-3</sup> )	P <sup>2</sup>	Ca	Mg	Al	H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	t	T	V (%)
0-10	6,1	106	5,8	30	2,7	0,6	0,0	2,4	3,5	5,9	60
10-20	5,5	101	5,1	25	1,5	0,4	0,0	4,1	2,2	6,3	37
0-20	6,0	109	5,2	30	2,1	0,5	0,0	2,6	2,8	5,5	52

<sup>1</sup>P-Mehlich 1. <sup>2</sup>P-resina de troca iônica.

Fonte: Da autora (2019).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados (DBC), em faixas, com 5 repetições. Os tratamentos foram compostos por diferentes formas de aplicação de fertilizante fosfatado, compondo um total de 5 tratamentos, descritos na Tabela 2. As parcelas consistiam de 18 metros de largura por 30 metros de comprimento, totalizando-se uma área de 540 m<sup>2</sup>. A largura da parcela foi baseada em duas passadas da semeadora de grãos da fazenda.

Figura 1 - Dados de precipitação pluviométricas das safras de 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018 correlacionados com épocas de semeadura, florescimento das culturas de verão e colheita.



Fonte: Da autora (2019).

Tabela 2 – Descrição dos tratamentos

Tratamentos
1 Controle - sem P em nenhuma das culturas
2 P no sulco durante a semeadura de cada cultura (cultivo verão e inverno)
3 P total do SP aplicado a lanço 20 dias antes da semeadura apenas para a cultura de verão
4 P total do SP aplicado no sulco apenas da cultura de verão 20 dias antes da semeadura
5 P total do SP aplicado no sulco apenas da cultura de inverno 20 dias antes da semeadura

SP – Sistema de Produção

Fonte: Da autora (2019).

Os tratamentos compostos por P total do sistema de produção representavam a soma da adubação no cultivo de verão, com a adubação para o cultivo de outono/inverno (TABELA 3). Tanto a adubação da cultura do verão, como a adubação do cultivo de inverno, eram as mesmas utilizadas pela fazenda.

Foram implantadas as seguintes culturas na área durante as safras: safra 2015/2016, soja (*Glycine max*) no verão e trigo (*Triticum spp.*) no outono/inverno; safra 2016/2017 e 2017/2018, milho (*Zea mays*) no verão e feijão (*Phaseolus vulgaris*) no outono/inverno. Todos os cultivos foram realizados sob condição de sequeiro.

O manejo fitossanitário da área e a escolha das cultivares implantadas foram os mesmos adotados pelo produtor, de acordo com suas necessidades. A Tabela 3 descreve o ano, os cultivos para cada safra e a dose de  $P_2O_5$  aplicado na área experimental.

Tabela 3 – Sequência dos cultivos avaliados ao longo do experimento e a dose do fertilizante fosfatado.

Ano	Safra Verão	Cultivar	$P_2O_5$ (kg.ha <sup>-1</sup> )	Fonte	Safra Out/inv	Cultivar	$P_2O_5$ (kg.ha <sup>-1</sup> )	Fonte
2015/2016	Soja	NS 7000 IPRO	54	MAP	Trigo	BRS 264	108	MAP
2016/2017	Milho	DKB 230 PRO3	81	MAP	Feijão	Ouro da Mata	81	MAP
2017/2018	Milho	DKB 230 PRO3	92	09:43:00	Feijão	Ouro da Mata	66	09:43:00

Fonte: Da autora (2019).

As adubações com nitrogênio e potássio foram realizadas com a mesma dose utilizada pelo produtor. No caso da adubação nitrogenada foi feito uma correção para a dose aplicada, descontando-se a quantidade já fornecida pelo adubo fosfatado. Já o fornecimento de K, também foi a partir da dose definida pelo produtor, aplicado a lanço antes da semeadura. Durante a condução do experimento coletaram-se folhas diagnósticas das culturas para análise nutricional. A atividade foi realizada apenas para as culturas de verão (soja e milho), as quais foram retiradas 10 folhas em cada parcela. Para o milho, a folha referência era a oposta e

abaixo da espiga e para a soja, a terceira folha trifoliolada com pecíolo, contando a partir do meristema apical. Ambas as coletas foram realizadas no período de florescimento (estádio R1), conforme recomendado por Malavolta et al. (1997).

Durante o cultivo do milho, instalado na safra 2017/2018, foram feitas avaliações de raízes através do método da trincheira, quando o mesmo atingiu estágio reprodutivo R1 (florescimento). Foi escolhido o milho para fazer esta avaliação de raízes, pelo fato de a cultura apresentar um sistema radicular mais robusto e visual que as demais culturas. As trincheiras possuíam 60 x 80 cm e a área útil para captura de imagem foi de 40 cm de largura por 60 cm de altura, as quais foram delimitadas por um quadro reticulado.

Depois de abertas as trincheiras o solo foi acertado manualmente e com o auxílio de canivete, as raízes foram expostas, conforme descrito por Jorge (1996). O perfil exposto foi pintado com tinta *spray* branca e as partes do solo com coloração branca foram limpas, para aumentar o contraste entre solo e raiz (VASCONCELOS et al., 2003). Posteriormente, foi realizada captura de imagem digital, as quais foram processadas pelo software SAFIRA para determinação da distribuição, comprimento, área e volume ocupados no perfil (JORGE; SILVA, 2010).

A partir das trincheiras, coletou-se amostras com estrutura preservada em cilindro volumétrico (2,5 cm de altura x 6 cm de diâmetro) nas profundidades 0-5, 20-25, 30-35, 45-50 cm, para determinação e caracterização da estrutura física do solo para os seguintes atributos: densidade ( $D_s$ ), macroporosidade ( $Mac$ ), microporosidade ( $Mic$ ), porosidade total ( $Pt$ ), capacidade de campo ( $CC$ ) e resistência à penetração de bancada ( $R_p$ ).

As amostras foram saturadas e submetidas à drenagem por meio de uma mesa de tensão automatizada (EcoTech) para os potenciais matriciais de -6 e -10 kPa, utilizados para definir microporosidade e macroporosidade, respectivamente. A soma destas duas variáveis compôs a porosidade total da amostra. Os dados de densidade do solo e capacidade de campo foram encontrados a partir da determinação do peso dos cilindros, após serem submetidos aos potenciais matriciais referidos. A resistência à penetração foi realizada em laboratório com uso do penetrômetro eletrônico de bancada, marca MARCONI, dotado de variador eletrônico de velocidade e registro de dados (TORMENA et al., 2007).

Estas análises foram realizadas a fim de verificar impedimentos de origem física sobre o crescimento do sistema radicular. É possível observar que os valores para as variáveis analisadas estavam na margem considerada adequada,  $D_s = 1,0-1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$  (TORRES; SARAIVA, 1999);  $Mac = 0,170-0,250 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ;  $Mic = 0,250-0,330 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$  (LIMA et al., 2007),

Pt = 0,5 cmcm<sup>-3</sup>, RP = menor que 2,0 Mpa (SERAFIM, 2007) e CC < 0,7 (REYNOLDS et al., 2008) conforme Tabela 4. Sendo assim, o crescimento do sistema radicular do milho foi estudado visando a influência apenas do teor de P no solo.

Tabela 4 – Caracterização física do solo na área do experimento.

Tratamento	Profundidade (cm)	Ds <sup>1</sup>	Mac (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup>	Mic (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	Pt <sup>4</sup>	CC <sup>5</sup>	RP (MPa) <sup>6</sup>
Controle	0-5	1,02	0,21	0,38	0,59	0,62	0,60
Controle	20-25	1,15	0,14	0,42	0,56	0,73	0,87
Controle	30-35	1,24	0,16	0,44	0,60	0,72	0,75
Controle	45-50	1,03	0,18	0,42	0,60	0,67	0,62
Adubação convencional (sulco)	0-5	0,89	0,22	0,39	0,60	0,61	0,62
Adubação convencional (sulco)	20-25	1,06	0,21	0,39	0,56	0,66	0,70
Adubação convencional (sulco)	30-35	1,10	0,23	0,17	0,40	0,28	0,37
Adubação convencional (sulco)	45-50	0,90	0,22	0,33	0,55	0,56	0,27
Adubação do sistema (lanço)	0-5	0,79	0,24	0,38	0,62	0,59	0,25
Adubação do sistema (lanço)	20-25	1,11	0,16	0,39	0,56	0,69	0,48
Adubação do sistema (lanço)	30-35	1,19	0,14	0,43	0,57	0,74	0,98
Adubação do sistema (lanço)	45-50	1,03	0,18	0,40	0,58	0,66	0,62
Adubação do sistema (sulco verão)	0-5	0,85	0,17	0,34	0,51	0,67	0,34
Adubação do sistema (sulco verão)	20-25	1,06	0,19	0,38	0,57	0,65	0,61
Adubação do sistema (sulco verão)	30-35	0,99	0,22	0,36	0,58	0,60	0,51
Adubação do sistema (sulco verão)	45-50	1,07	0,19	0,40	0,58	0,65	0,51
Adubação do sistema (sulco inverno)	0-5	1,04	0,16	0,41	0,57	0,69	0,74
Adubação do sistema (sulco inverno)	20-25	1,01	0,20	0,36	0,56	0,63	0,47
Adubação do sistema (sulco inverno)	30-35	1,00	0,18	0,36	0,55	0,64	0,34
Adubação do sistema (sulco inverno)	45-50	1,03	0,19	0,38	0,57	0,64	0,62

<sup>1</sup>Ds – Densidade do solo. <sup>2</sup>Mac – Macroporosidade. <sup>3</sup>Mic – Microporosidade. <sup>4</sup>Pt – Porosidade total. <sup>5</sup>CC – Capacidade de Campo. <sup>6</sup>RP – Resistência à penetração.

Fonte: Da autora (2019).

A colheita de cada parcela das culturas ao longo das safras foi realizada retirando-se 3 linhas de 5 metros, localizadas no meio da parcela, para garantir ausência de efeito bordadura. Após a colheita, separaram-se 100 grãos por parcela, os quais tiveram suas umidades e pesos determinados. Posteriormente, pesou-se todo o material colhido por parcela e, com o auxílio dos dados coletados anteriormente, determinou-se as produtividades. Este procedimento foi feito em todos os cultivos.

Após a colheita do milho, safra 2017/2018, foi realizada coleta de solo de forma aleatória, com 6 pontos por parcela, para análise e verificação de possível tendência de

acúmulo de P em superfície, em razão das diferentes formas de aplicação do nutriente. Para isso, foram coletados cinco pontos por parcela, nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-40 cm, conforme metodologia descrita por Silva (1999).

Os dados de produtividade e dos teores de P no solo obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e a comparação das médias foi feita pelo teste Scott- Knott a 5% de probabilidade, utilizando-se o software Sisvar<sup>®</sup>, versão 5.6 (FERREIRA, 2014). As imagens digitais do sistema radicular do milho foram aplicadas no software SAFIRA para caracterização do comprimento, volume e área superficial ocupada. Posteriormente, os dados de raiz foram submetidos à análise de variância e foi feita a transformação quadrática dos mesmos pelo software Sisvar<sup>®</sup>, versão 5.6.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Fósforo no solo**

Devido ao correto manejo da fertilidade do solo adotado pelo produtor ao longo de 15 anos de cultivo sob SPD, já eram esperados adequados teores de nutrientes no solo. Portanto, antes da implantação do experimento, o solo já apresentava teor de P extraível por Resina em um nível alto nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm (TABELA 1), conforme Sousa et al. (2004).

De 2015 a 2018, a área foi submetida a seis cultivos e, após esse período, foi observada acentuada concentração no teor de P na camada de 0-10 cm de profundidade, independente da forma de aplicação de P (TABELA 5). Em todos os tratamentos os maiores teores de P foram observados na camada de 0-10 cm em relação à camada de 10 a 20 cm, a exceção do controle (sem aplicação de P). Resultados semelhantes foram encontrados por Costa (2009), Nunes et al. (2011) e Barbosa et al. (2015), e isso ocorre porque existe uma tendência de acúmulo de P na superfície dos solos, independentemente da forma de aplicação (COSTA et al., 2009; SOUSA et al., 2016).

Tabela 5 - Teor de fósforo no solo, em função de formas de manejo da adubação fosfatada, com diferentes extratores, em diferentes profundidades de coleta.

Tratamento	P resina (mg.dm <sup>-3</sup> )			P Mehlich 1 (mg.dm <sup>-3</sup> )		
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
Controle	22 Ac	17 Ab	10 Bb	6 Aa	3 Ba	3 Ba
Adubação convencional (sulco)	26 Ab	14 Bb	13 Ba	6 Aa	2 Ba	1 Ba
Adubação do sistema (lanço)	31 Ab	18 Bb	6 Cb	4 Ab	2 Ba	1 Ba
Adubação do sistema (sulco verão)	42 Aa	26 Ba	15 Ca	3 Ab	2 Ba	1 Ba
Adubação do sistema (sulco inverno)	46 Aa	26 Ba	12 Ca	4 Ab	1 Ba	1 Ba

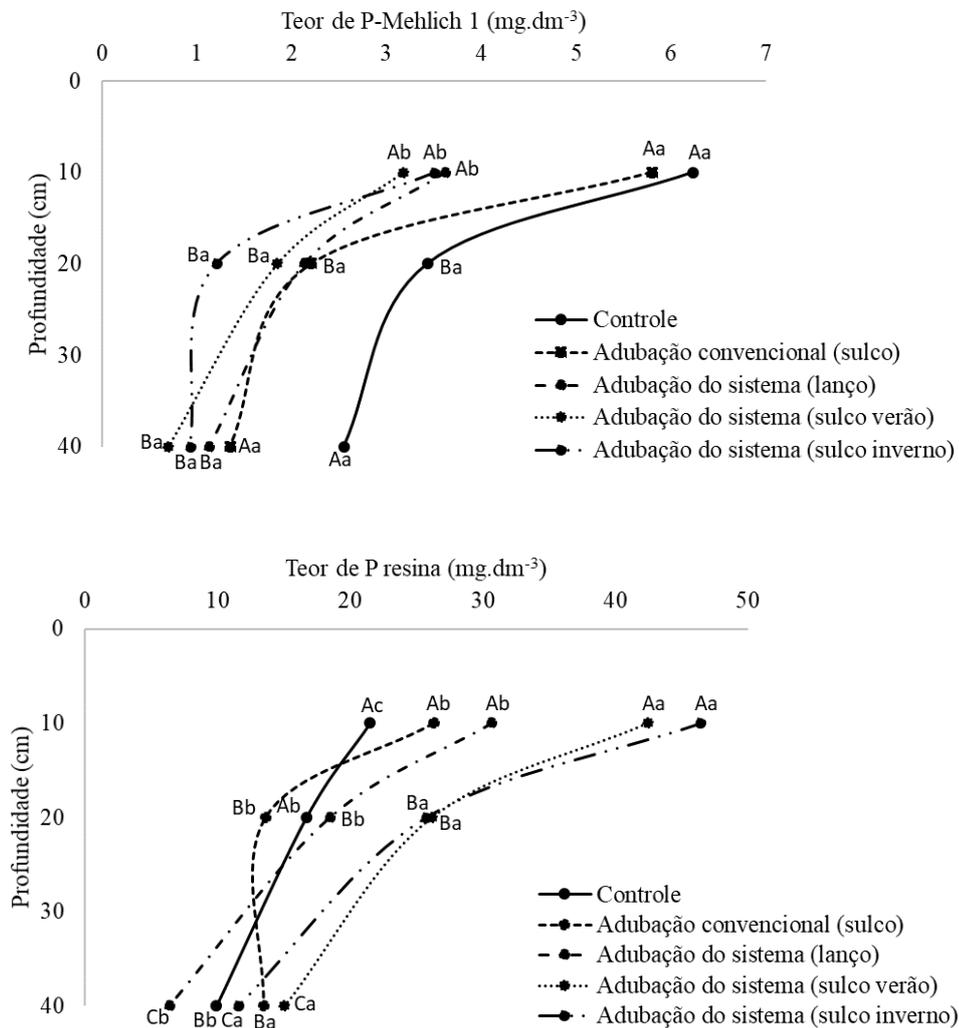
Letras maiúsculas comparam teores de P entre diferentes profundidades, dentro de uma mesma forma de manejo do P e, letras minúsculas, comparam tratamentos na mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%.

Fonte: Da autora (2019).

A estratificação dos teores de P no perfil do solo pode ser influenciada pela forma de aplicação (HOWARD et al., 1998), pela dose e pelo manejo da área e isso ocorre devido à baixa mobilidade do nutriente no solo (BARBER et al., 1984; RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001 e MOTTA et al., 2002) e pelo revolvimento ou não do mesmo, podendo levar a um acúmulo superficial e aumento das diferenças entre seus teores em profundidade (BARBER, 1984; COSTA et al., 2009), conforme Figura 2. Em áreas sob SPD, como é o caso da área experimental, existe uma tendência natural de acúmulo de P na camada superficial por não haver revolvimento do solo, que pode ser observada tanto com aplicações de P no sulco, como aplicações a lanço, conforme observado por Nunes et al. (2011) e Sousa et al. (2016).

O acúmulo de P superficial pode ainda ser intensificado quando for feita a adubação do sistema de produção (sulco e lanço), conforme resultados obtidos no presente trabalho. Nesses tratamentos, os teores de P extraídos pelo método Resina foram maiores na camada de 0-10 cm (Figura 2) e se encontravam dentro de valores altos (21-35 mg.dm<sup>-3</sup>) ou muito altos (>35 mg.dm<sup>-3</sup>) para a camada de 0-20cm, descritos por Sousa et al. (2004). Esse fato também foi observado por Rheinheimer e Anghinoni (2001), trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico, muito argiloso, no Rio Grande do Sul sob SPD há 15 anos e por Nunes et al. (2011), onde também observaram altos teores de P Resina na camada de 0-10 cm em área de Cerrado, em um Latossolo vermelho distrófico, muito argiloso, sob SPD há 14 anos, com aplicação de P em superfície. Para as demais camadas, foi verificada diferença estatística significativa entre os teores de P nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm, que mostra certo consumo do ‘estoque’ de P em camadas mais profundas após sucessivos cultivos (SOUSA et al., 2004).

Figura 2 – Distribuição do teor de fósforo no solo, extraído pelos métodos Mehlich 1 (a) e Resina de Troca Iônica (b), em diferentes profundidades do solo



Fonte: Da autora (2019).

O acúmulo de P observado na camada de 0-10 cm pode ter ocorrido também, porque de forma geral, as sementeiras de grãos graúdos (cultura verão) depositam o fertilizante até no máximo a camada de 10 cm de profundidade (DENARDIN et al., 2008) e, as culturas de inverno a profundidade de alcance do adubo é efetivamente até 5 cm de profundidade. Portanto, muito embora a adubação no sulco seja a mais recomendada na literatura, por permitir melhor distribuição de P no perfil, bem como promover distribuição do sistema radicular, com ela também é possível observar acúmulo de P na superfície (MOREIRA, 2003; PROCHNOW et al., 2017), que aqui pode ter sido intensificado pela adubação do sistema de produção.

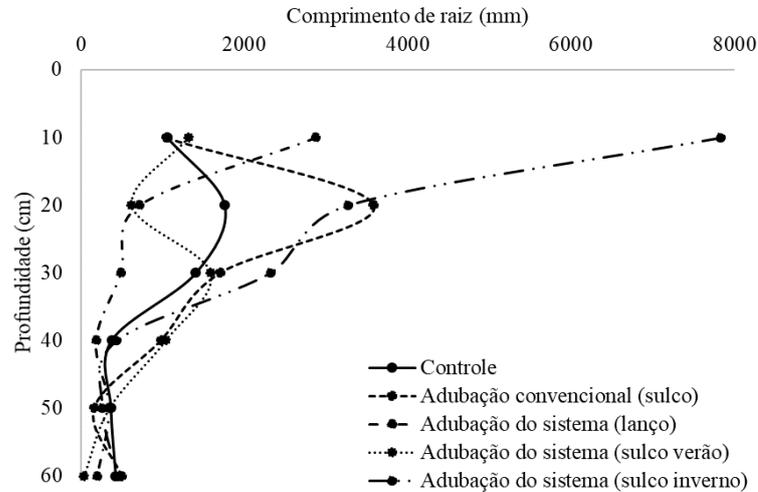
Nota-se que os teores de P extraídos pelo método Mehlich-1 na camada de 0-10 cm (TABELA 5), estavam dentro da faixa de valores baixos (3,1 a 5,0 mg.dm<sup>-3</sup>). Somente para os tratamentos com aplicação convencional de P (sulco de semeadura) e para o tratamento controle, os teores se enquadraram dentro de valores considerados médios (5,1 a 8,0 mg.dm<sup>-3</sup>), de acordo com Sousa et al. (2004). Para as demais profundidades, não foram verificadas diferenças estatísticas entre os valores para os cinco tratamentos.

Ressalta-se que este método de extração de P pode subestimar a real disponibilidade do nutriente, principalmente em solos argilosos com acidez mais tamponada, como é o caso da área experimental (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008). Ainda, houve correlação de Pearson alta e negativa ( $r = -0,85$ ) entre os teores de fósforo extraídos pelos dois métodos avaliados. Portanto, pode-se afirmar que uma das metodologias utilizadas não está sendo efetiva na avaliação da disponibilidade real de P. Como vem sendo observadas altas produtividades das culturas na gleba em que foi instalado o experimento, pode-se sugerir que os teores extraídos pelo Mehlich 1 podem estar sendo subestimados.

### **3.2 Sistema radicular do milho**

Mesmo após três anos sem aplicação de fertilizante fosfatado no tratamento controle, o crescimento do sistema radicular do milho, visualmente, não foi limitado (FIGURAS 3 e 4). Isso porque os teores de P ainda continuaram acima dos valores considerados críticos (SOUSA et al., 2004). Como o solo apresentava fertilidade adequada antes do início do experimento, este período sem aplicação de P, não foi significativo para exaurir o nutriente do sistema, fato também observado por Lacerda et al. (2015), e nem limitar o crescimento de raízes em profundidade.

Figura 3 – Distribuição relativa do comprimento do sistema radicular no florescimento do milho em diferentes profundidades em um Latossolo Vermelho Amarelo.

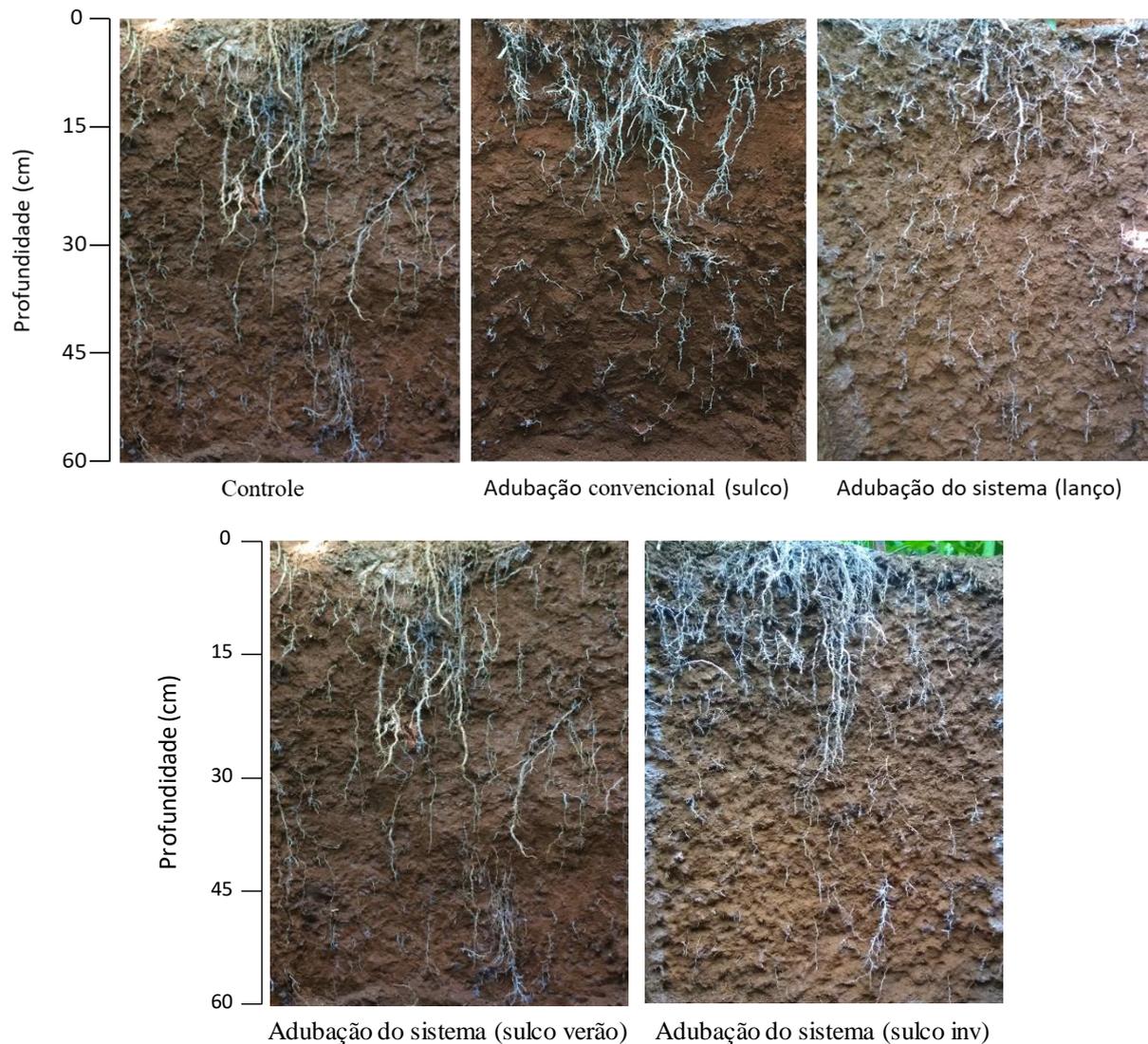


Fonte: Da autora (2019).

Sousa et al. (2016) também não observaram restrição no desenvolvimento dos sistemas radiculares de soja e milho, avaliados aos 6 e 11 anos, após o início do experimento com formas de aplicação de P. Ainda ressalta-se que, havia maior acúmulo de P na camada superficial de locais com aplicação do P a lanço, comparada à aplicação no sulco, havendo maiores teores do nutriente na camada superficial, comparada às inferiores nas duas formas de aplicação de P. E, mesmo assim, o crescimento radicular das culturas não foi afetado pelas formas de aplicação de P. Em experimento de Valadão et al. (2015), a aplicação de P a lanço em apenas uma safra não provocou extratificação nos teores deste nutriente em profundidade, assim, o sistema radicular da soja também não foi afetado. Por outro lado, Barreto e Fernandes (2002), encontraram melhor distribuição do sistema radicular do milho quando foi feita a adubação fosfatada convencional a lanço.

Embora nos trabalhos de Sousa et al. (2016) e de Valadão et al. (2015) não tenha havido efeito negativo da adubação a lanço, conforme esperado devido à possibilidade de acúmulo de P em superfície, é importante salientar que o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular é influenciada por diversos fatores (bióticos e abióticos), podendo variar no tempo e no espaço (HOOKER et al., 2000). Portanto, pode ser que no presente estudo, e nos demais citados, ainda não houve tempo suficiente para que os efeitos da aplicação de P apenas de forma superficial fossem percebidos.

Figura 4 – Distribuição de perfil do sistema radicular no florescimento do milho, no sexto cultivo da área, em função de diferentes formas de aplicação de fósforo, em área sob sistema de plantio direta.



Fonte: Da autora (2019).

No presente estudo, as plantas cultivadas sob os tratamentos que receberam adubação do sistema (P total) no sulco de semeadura no inverno e a lanço, no verão foram as que apresentaram maior quantidade de raízes na camada de 0-10 cm, mostrando a influência da dose, do modo de aplicação e do acúmulo de P na zona de maior crescimento radicular (SOUSA et al., 2016). A restrição do crescimento de raízes em profundidade, com baixa exploração no perfil do solo, pode gerar menor aquisição de água e nutrientes para as plantas (KLEPKER, 1991) e, como consequência, pode ocorrer redução de produtividade. Em geral, esse fato pode ser intensificado quando o cultivo passa por períodos de estresse hídrico, observado frequentemente em cultivos de outono/inverno e em áreas de sequeiro. Portanto, é

importante construir a fertilidade do solo, visando manter os teores dos nutrientes em níveis considerados adequados em todo o perfil (SOUSA et al., 2004; PROCHNOW et al., 2017).

### 3.3 Concentração de fósforo foliar

Durante as três safras, as concentrações de P nas folhas das culturas de verão (soja safra 2015/2016 e milho, safras 2016/2017 e 2017/2018) estavam em níveis adequados para a soja (2,5 a 5,0 g.kg<sup>-1</sup>) e milho (2,0 a 4,0 g.kg<sup>-1</sup>), de acordo com Cantarella et al. (1996). Ressalta-se que as concentrações foliares de P, também não foram alteradas pelos modos de aplicação desse nutriente, não havendo, portanto, diferença significativa entre os tratamentos (TABELA 6). Resultados semelhantes foram obtidos por Moterle et al. (2009) para a cultura da soja.

Em trabalhos de Barreto e Fernandes (2002), a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a lanço aumentou a concentração de P nas folhas de milho, em solo inicialmente com teor muito baixo do nutriente (1,0 mg.dm<sup>-3</sup> por Mehlich), comparada à aplicação da mesma dose do nutriente, via sulco de semeadura. Esta divergência de resultados pode ser explicada pela possível baixa capacidade de adsorção do fósforo no solo trabalhado (50% de argila), o qual proporcionou disponibilidade adequada de P às plantas.

Tabela 6 – Concentração foliar de fósforo nos cultivos de safra verão 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018.

Tratamento	Teor foliar de P (g.kg <sup>-1</sup> )		
	2015/2016	2016/2017	2017/2018
	Soja	Milho	Milho
Controle	3,4	2,1	2,8
Adubação convencional (sulco)	3,1	2,2	2,7
Adubação do sistema (lanço)	3,5	2,3	2,5
Adubação do sistema (sulco verão)	3,1	2,1	2,7
Adubação do sistema (sulco inverno)	3,0	2,1	2,6

Fonte: Da autora (2019).

Foram realizados estudos de correlação linear entre os teores de P das diferentes camadas do solo (0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm), extraídos pelos diferentes extratores (Mehlich 1 e Resina), com as concentrações foliares de nutrientes em soja e milho. De forma geral, não houve correlação entre os teores de P de todas as profundidades com as concentrações foliares do nutriente. Normalmente, quando a correlação entre teores de determinado nutriente no solo

e sua concentração foliar não ocorre, pode-se no primeiro momento dizer que o extrator não está sendo adequado para avaliar a disponibilidade do nutriente (SILVA, 1997). No entanto, para haver correlação deveria ocorrer amplitude entre os teores no solo e também na planta, ou seja, os mesmos deveriam ter sido afetados pelos tratamentos, fato não observado principalmente nas concentrações foliares (TABELA 6), uma vez que os teores no solo já estavam adequados (TABELA 5), independentemente dos tratamentos.

### **3.4 Produtividade das culturas**

As respostas em produtividade das culturas aos modos de adubação foram diferentes no verão, comparado ao outono/inverno (TABELA 7). Apenas para a safra de outono/inverno as produtividades foram afetadas pelas formas de adubação de P. Ausência de respostas nas produtividades das culturas, em função do modo de aplicação de P, já era esperado, devido aos teores adequados de P nos solos. Quando os solos apresentam teores de nutrientes iguais ou acima dos níveis críticos, eles já são suficientes para se obter de 80-90% do rendimento potencial da cultura, na ausência da aplicação do mesmo (SOUSA et al., 2016) e independentemente da forma de aplicação do fertilizante. Assim, os nutrientes são aplicados apenas para repor as quantidades exportadas pelas culturas, e não para incrementar os teores no solo e a produtividade das culturas (PAULETTI et al., 2010).

Em experimentos realizados em solos com teor adequado a alto de P, Pavinato e Ceretta (2004), Nunes et al. (2011) e Sousa et al. (2016), demonstraram que os diferentes modos de aplicação (sulco ou a lanço) não afetaram as produtividades de grãos das culturas trabalhadas. Em estudo de Lacerda et al. (2015), também não foi observado aumento de produtividade da cultura da soja em solo argiloso, com teor adequado de P, mesmo quando se aplicou 1,5 vez a dose de  $P_2O_5$  utilizada pelo produtor ( $120 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Tabela 7 – Produtividade de grãos dos cultivos de soja, trigo, milho e feijão desde a safra 2015/2016 até a safra 2017/2018.

Tratamento	Produtividade (kg.ha <sup>-1</sup> )					
	Safra verão	Safra out/inv	Safra verão	Safra out/inv	Safra verão	Safra out/inv
	Soja	Trigo	Milho	Feijão	Milho	Feijão
	2015/2016	2016	2016/2017	2017	2017/2018	2018
Controle	4392 a	2029 b	14787 a	2518 b	11990 a	1956 c
Adubação convencional (sulco)	4164 a	3006 a	15651 a	3013 a	11636 a	2709 a
Adubação do sistema (lanço)	4221 a	2027 b	16325 a	2730 b	12105 a	2438 b
Adubação do sistema (sulco verão)	4366 a	2362 b	14468 a	2639 b	11661 a	2094 c
Adubação do sistema (sulco inverno)	4365 a	2804 a	14710 a	2584 b	12645 a	2458 b
CV%	7,6	10,1	8,2	6,8	12,0	6,5

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%.

Fonte: Da autora (2019).

Em diversos outros trabalhos desenvolvidos no estado do Mato Grosso, e citados por Zancanaro et al. (2018), não houve diferenças na produtividade da cultura da soja em função do modo de aplicação de P, em solos que tiveram seus teores elevados, pela fosfatagem corretiva, com altas doses de P. Resultados semelhantes foram observados por Sousa et al. (2016), a partir do segundo ano de cultivo, com aplicações de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por ano, cultivado com soja e milho por 17 anos. Estes resultados corroboram os dados obtidos na produtividade das culturas no presente trabalho.

De modo geral, para os cultivos realizados nas safras de outono/inverno, as maiores produtividades de feijão e trigo foram observadas com aplicação convencional de P, ou seja, aplicação no sulco, no momento da semeadura. Nesta época de cultivo houve restrição hídrica (FIGURA 1), que possivelmente influenciou a resposta das culturas aos modos de aplicação de P, conforme o esperado (PROCHNOW et al., 2017). Deve ser lembrado que, para que se tenha boa eficiência na utilização do P pelas plantas, deve haver adequado suprimento de água, pois, o seu transporte da solução do solo até às raízes ocorre por difusão, que é dependente de umidade no solo (SANTOS et al., 2008). Possivelmente, quando se aplica o nutriente no sulco de semeadura em época de restrição hídrica, o seu fornecimento é favorecido, devido a menor distância entre o sistema radicular e o local de deposição do nutriente. Além disso, as culturas de feijão e trigo apresentam sistema radicular pouco agressivo em relação ao milho e soja. Por isso, são mais susceptíveis aos efeitos dos modos de aplicação de P, principalmente nas épocas com menor disponibilidade de água (FIGURA 1).

Mesmo que as produtividades das culturas de verão não tenham sido influenciadas pelos modos de fornecimento de P, outros fatores devem ser considerados na tomada de decisão sobre como fornecer o nutriente. Neste caso específico, aparentemente não parece seguro retirar todo o P do sulco nas culturas de inverno. Outro grande desafio da adubação fosfatada a lanço é o possível acúmulo de P na camada superficial do solo (0-10cm), que pode comprometer o crescimento do sistema radicular das culturas e limitar seu crescimento apenas a essa camada, tornando a planta susceptível a tombamentos e estresse hídrico. No entanto, ainda há necessidade de estudos de longa duração sobre o tema.

Outro ponto que merece atenção na forma de aplicação do fertilizante fosfatado a lanço em superfície, é que o mesmo poderá ser facilmente carregado por agentes erosivos como chuva, levando não só a uma perda do fertilizante (ANDRASKI et al., 2003), como também a uma possível contaminação de rios e mananciais, gerando problemas ambientais (PROCHNOW et al., 2017) e possíveis multas ao produtor. Além disso, acarretará em prejuízos econômicos, uma vez que adubos fosfatados têm custo elevado. Trata-se de um assunto polêmico, o qual merece ser tratado de forma científica.

De maneira geral, nota-se que a aplicação de fósforo, de forma convencional no sulco de plantio, conforme recomendado pela literatura, é uma prática viável e que já vem sendo utilizada por muitos anos na agricultura e, além disso, esta técnica permite melhor distribuição de P e de raízes no perfil do solo. É importante ressaltar, que a adubação do sistema pode entrar como uma ferramenta no manejo da lavoura, mas que só deve ser preferido quando o solo apresentar fertilidade construída, relevo mais plano e quando a janela de plantio for muito curta devido às condições climáticas.

#### **4 CONCLUSÕES**

O teor de P no solo foi influenciado pelo modo de aplicação do fertilizante fosfatado, sendo mais expressivo quando feito a adubação do sistema, mas ficando na faixa de teores altos ou acima desta em todos os tratamentos.

Visualmente, o sistema radicular foi pouco influenciado pelas formas de aplicação de P, ficando mais restrito à camada superficial em todos os tratamentos, e pouco distribuído no perfil do solo quando o P foi aplicado a lanço.

As produtividades das culturas de verão não foram influenciadas pelos modos de fornecimento de P.

A melhor forma de fornecimento de P para as culturas de inverno, foi com adubação convencional no sulco de semeadura.

## REFERÊNCIAS

- ALTMANN, N. Adubação de sistemas integrados de produção em plantio direto: resultados práticos no Cerrado. **Informações Agronômicas**, n.140, p.1-8, 2012.
- ANDRASKI, T. W.; BUNDY, L. G.; KILIAN, K. C. Manure history and long-term effects on soil properties and phosphorus losses in runoff. **Journal of environmental quality**, Madison, v. 32, p. 1782-1789, 2003.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. New York, John Wiley and Sons, 1984. p. 398.
- BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 31, n.1, 2015.
- BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, 2002.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. VAN.; CAMARGO, C.E.O. 13 cereais. In: RAIJ, B. van; ANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.O.; FURLANI, A.M.C. (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação, 1996. p. 43-71 (Boletim técnico, 100).
- COSTA, S. E. V. G. de A. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1237-1247, 2009.
- DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BACALTCHUK, B.; SATTTLER, A.; ENARDIN, N.D.A.; FAGANELLO, A.; WIETHÖLTER, S. Sistema plantio direto: Fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G. (Eds.). **Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1. p. 1251-1273.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brasil). **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.
- GUARESCHI, R.; GAZOLLA, P. R.; SOUCHIE, E. L.; CORREA DA ROCHA, A. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, 2008.
- HOOKE, J.E.; HENDRICK, R.; ATKINSON, D. The measurement and analysis of fine root longevity. In: SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds.) **Root methods: a handbook**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000. p.273-304.

HOWARD, D. D.; MULLEN, M. D.; ESSINGTON, M. E. Assessing nutrients stratification within a long-term no-tillage corn soil. Annual Southern Conservation Tillage Conference for Sustainable. **Agriculture**, v. 21, Arkansas. Proceedings. Arkansas agriculture experiment station, 1998.

JORGE, L. A. C. **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária (Circular Técnica, 1/96), 1996. p. 57.

JORGE, L. A. de C.; SILVA, D. J, da C. B. **Safira**: Manual de utilização. Embrapa Instrumentação-Livro científico (ALICE), 2010.

KURIHARA, C.; HERNANI, L. **Adubação antecipada no sistema plantio direto**. Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 2011.

KLEPKER, D. Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação. 1991. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

LACERDA, J. J. de J.; RESENDE, A V. de; NETO, A. E. F.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. da. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 769-778, 2015.

LACERDA, M. C.; STEPHAN, A. **Adubação a lanço na cultura do feijoeiro comum**. Embrapa Arroz e Feijão-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E), 2016.

LIMA, C. G. D. R.; CARVALHO, M. D. P.; MELLO, L. M. M. D.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, p. 1233-1244, 2007.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. p. 319.

MOREIRA, S. G. **Formas químicas no solo e disponibilidade de micronutrientes à soja em sistema de semeadura direta**. 2013. 147 P. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.

MOTERLE, L. M.; SANTOS, R. F. dos; DE LUCCA, A.; SCAPIM, C. A.; DO CARMO LANA, M. Influência da adubação com fósforo e potássio na emergência das plântulas e produtividade da cultura da soja. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 256-265, 2009.

MOTTA, ANTONIO C.V.; REEVES, D. W.; TOUCHTON, J. T. Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soils. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 33, n. 5-6, p. 913-932, 2002.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.V.H., BARROS, N.F., FONTES, R.L.F., CANTARUTTI, R.B., NEVES, J.C.L. (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8. p. 471-537.

NUNES, R. D. S.; DE SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. **Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada**. Embrapa Cerrados-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2011.

PAULETTI, V.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; FAVARETTO, N.; ANJOS, A. D. Yield response to fertilization strategies in no-tillage soybean, corn and common bean crops. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 3, p. 563-574, 2010.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, 2004.

PROCHNOW, L. I.; DE RESENDE, A. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A. D.; FRANCISCO, E., CASARIN, V.; PAVINATO, P. **Localização do fósforo em culturas anuais na agricultura nacional: situação importante, complexa e polêmica**. Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2017.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, n. 146, p. 466-474, 2008.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 36, p. 151-160, 2001.

SANTOS, D. R. dos.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 38, n. 2, p. 576- 586, 2008.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 5, p. 2037-2049, 2008.

SERAFIM, M.E. Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção. 2007. 79 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2007.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária, 1999. p. 370.

SILVA, W. M. **Avaliação de extratores de fósforo disponível em dois latossolos do Mato Grosso do Sul**. 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 1997.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T.; SANTOS JUNIOR, J. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Embrapa Cerrados-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2016.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 416.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147-168.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 31, p. 211-219, 2007.

VALADÃO, F. C. de A.; WEBER dos S. O. L.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, 2015.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 2011.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, 2003.

ZANCANARO, L.; ONO, F.B.; KAPPES, C.; VALENDORFF, J.D.P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A.; SEMLER, T. D.; VIDOTTI, M. V. **Adubação fosfatada no sulco de semeadura e em superfície**. Rondonópolis: Fundação MT, 2018. Boletim de pesquisa (Fundação MT. Boletim, 18). p. 82.