

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

DANILO AUGUSTO SCHARR

**ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO AVEIA PRETA-SOJA
A PARTIR DO ESTABELECIMENTO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**PONTA GROSSA - PR
2015**

DANILO AUGUSTO SCHARR

**ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO AVEIA PRETA-SOJA
A PARTIR DO ESTABELECIMENTO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Agricultura. Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

**PONTA GROSSA - PR
2015**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

S311 Scharr, Danilo Augusto
 Adubação fosfatada para a sucessão
 aveia preta-soja a partir do
 estabelecimento do sistema plantio direto/
 Danilo Augusto Scharr. Ponta Grossa, 2015.
 77f.

 Dissertação (Mestrado em Agronomia -
 Área de Concentração: Agricultura),
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
 Caires.

 1.Glycinemax (L.) Merrill. 2.Avena
 strigosaSchreb. 3.Adubação de sistema.
 4.Fontes de fósforo. I.Caires, Eduardo
 Fávero. II. Universidade Estadual de
 Ponta Grossa. Mestrado em Agronomia. III.
 T.

CDD: 631.8



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Adubação fosfatada para a sucessão aveia preta-soja a partir do estabelecimento do sistema plantio direto”.

Nome: Danilo Augusto Schar

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Pesquisador Dr. Gabriel Barth

Pesquisador Dr. Helio Antonio Wood Joris

Data da Realização: 20 de julho de 2015.

Aos meus valorosos pais, Alberto e Maria e a minha irmã, Bianca

A minha amada noiva, Jéssica

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela concessão da vida, bênçãos, inspirações, oportunidades, saúde e principalmente, pelas pessoas colocadas no meu caminho.

A todos os meus familiares, em especial aos meus pais, Alberto Ricardo e Maria Eloisa, a minha irmã Bianca, pelo apoio em todos os momentos, compreensão e disposição para tornarem possíveis todas as conquistas ao longo da minha vida.

À minha noiva Jéssica Aparecida, pela grande amizade, compreensão e ajuda na realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires, pela excelente orientação para a realização deste trabalho, pelos ensinamentos e oportunidades oferecidas, por toda a ajuda, incentivo, credibilidade, e principalmente por ser um excelente profissional, apostando sempre no crescimento de seus alunos.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela dedicação exemplar, em especial aos professores Adriel Ferreira da Fonseca e Ricardo Antonio Ayub, pelo excelente trabalho na coordenação do curso.

À técnica do Laboratório de Fertilidade do Solo Dirce Aparecida de Oliveira, pela amizade, carinho e grande auxílio na realização das análises químicas.

Ao Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) pela concessão da área na Fazenda Modelo para instalação e pelo apoio na condução do experimento.

A AGROMAC Ind. Com. Equipamentos Agrícolas LTDA, em especial ao Sr. Marcelo H. Hagemann pela doação dos dosadores de precisão Fertisystem® para realização deste trabalho.

A todos os colegas da pós-graduação, pelo companheirismo e amizade que levarei por toda vida.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo: Adriano Haliski, Angelo Rafael Bini, Shively Los Galetto, Bruno Fernando de Oliveira Lourenço, Rayane Rodrigues França, Clélio Gilberto Marsola, Leonardo Fetzer, Gabriel Soares, Maicon Elivelton Hildebrant, Alisson Marcos Fogaça e Rafael Pangratz Bedretchuk, pela grande amizade, companheirismo e auxílio na realização desse trabalho. Aos amigos Renato Zardo Filho e Hélio Antonio Wood Joris, pela amizade e ajuda.

E a todas as pessoas e entidades que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

EPÍGRAFES

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”

(Tomás de Aquino)

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”

(Ayrton Senna)

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo”

(Ayrton Senna)

ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO AVEIA PRETA-SOJA A PARTIR DO ESTABELECIMENTO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

No Brasil existem extensas áreas de pastagens degradadas que poderiam ser utilizadas para a produção de grãos. A acidez do solo e a deficiência de fósforo (P) nessas áreas são os fatores que mais limitam a produção das culturas. O suprimento mais adequado de P pode ser alcançado pelo manejo apropriado da adubação fosfatada e pela escolha do fertilizante mais apropriado para cada tipo e manejo do solo. Com o objetivo de avaliar a eficiência da aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades, sem e com antecipação, para a sucessão aveia preta-soja na conversão de pastagem degradada para o sistema plantio direto, foi realizado um experimento em um Latossolo Vermelho com alta acidez e baixo teor de P, em Ponta Grossa (PR), no período de 2009 a 2013. Antes da instalação do experimento foi realizada a correção da acidez por meio da incorporação de calcário dolomítico visando elevar a saturação por bases do solo, na camada 0–20 cm, a 70%. O delineamento experimental foi em blocos completos ao acaso com três repetições. Empregaram-se sete tratamentos de adubação fosfatada, com ou sem antecipação da adubação da soja para a cultura de aveia preta, por meio da aplicação de termofosfato magnésiano (TM), fosfato natural reativo (FR) e fosfato totalmente acidulado – superfosfato triplo (ST): sem P, TM no sulco de semeadura da aveia, FR no sulco de semeadura da aveia, ST no sulco de semeadura da aveia, TM no sulco de semeadura da soja, FR no sulco de semeadura da soja e ST no sulco de semeadura da soja. Realizaram-se quatro cultivos com a sucessão aveia preta-soja e a dose anual utilizada nos tratamentos de adubação fosfatada foi de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, calculada com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior produção de matéria seca e maior extração de nutrientes pela aveia preta, nos quatro anos de cultivo, em decorrência de maior disponibilidade de P no solo. A adubação fosfatada, com ou sem antecipação, aumentou os teores de P e Mn, e reduziu as concentrações de S e Zn nas folhas de soja, especialmente com a utilização de ST. Também houve redução no teor de S e aumento no teor de Mg nos grãos de soja com a adubação fosfatada, independentemente da fonte utilizada. As maiores produtividades de grãos de soja foram obtidas com a aplicação de ST no sulco da soja, no primeiro cultivo, no sulco da aveia ou da soja, no segundo e terceiro cultivos, e no sulco da aveia no quarto cultivo. Ao final dos quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja, o emprego de ST, com ou sem antecipação da adubação, proporcionou maior eficiência agrônômica e retorno econômico bem mais elevado do que as fontes menos solúveis em água (FR e TM). Os resultados sugerem que na conversão de pastagem degradada para o sistema plantio direto com a sucessão aveia preta-soja, a adubação fosfatada da soja deve ser feita com fonte totalmente acidulada (ST), podendo essa fonte ser antecipada para o sulco de semeadura da aveia preta.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, *Avena strigosa* Schreb., adubação de sistema, fontes de fósforo.

PHOSPHATE FERTILIZATION FOR A CROPPING SEQUENCE OF BLACK OAT AND SOYBEAN IN THE ESTABLISHMENT OF A NO-TILL SYSTEM

ABSTRACT

In Brazil there are large degraded grazing areas that could be used for grain production. Soil acidity and phosphorus (P) deficiency in these areas are the factors that most limit crop production. The most adequate supply of P can be achieved by proper management of phosphate fertilization and by the choice of the most appropriate fertilizer for each soil type and management. In order to assess the efficiency of the application of phosphate sources with different solubility, with and without anticipation, for a cropping sequence of black oat and soybean in the conversion of degraded pasture to a no-till system, an experiment was carried out on an Oxisol (Typic Hapludox) with high acidity and low P content in the period from 2009 to 2013, in Ponta Grossa, PR, Brazil. Before the establishment of the experiment, soil acidity was corrected through the application of dolomitic lime with incorporation to raise the base saturation in the topsoil (0-20 cm) to 70%. A randomized complete block design was used, with three replications. Seven treatments of phosphorus fertilization with or without anticipation of the soybean fertilization for black oat crop through the application of magnesium thermophosphate (MT), natural reactive phosphate (RF) and fully acidulated phosphate - triple superphosphate (TS) were tested: no P, MT in the oat seed furrow, RF in the oat seed furrow, TS in the oat seed furrow, MT in the soybean seed furrow, RF in the soybean seed furrow and TS in the soybean seed furrow. A cropping sequence of black oat and soybean was conducted four cycles. The annual rate used in the phosphate fertilization treatments was 100 kg ha⁻¹ of P₂O₅, based on the total P₂O₅ content of fertilizers. Application of TS in the oat seed furrow provided higher dry matter production and increased nutrient uptake by black oat, in the four years of cultivation, due to increased availability of soil P. Phosphorus fertilization, with or without anticipation, increased P and Mn contents, and reduced concentrations of S and Zn in soybean leaves, especially with the TS use. There was also a reduction in S content and an increase in Mg content in soybean grains with the phosphate fertilization, regardless of source used. The highest soybean yields were obtained with the TS application in the soybean seed furrow in the first crop; in the seed furrow of oat or soybean in the second and third crops; and in the oat seed furrow in the fourth crop. At the end of four cycles of a cropping sequence of black oat and soybean, use of TS with or without anticipation provided greater agronomic efficiency and higher economic returns than sources less soluble in water (RF and MT). The results suggest that in the conversion of degraded grassland to a no-till system with a cropping sequence of black oat and soybean, the phosphorus fertilization of soybean should be done with the fully acidulated source (TS), and the application of this source could be anticipated for the black oat seed furrow.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill, *Avena strigosa* Schreb., fertilization system, phosphorus sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1 - Precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento no período de 2009 a 2013 e precipitação pluvial média mensal histórica (47 anos) da região de Ponta Grossa (PR). Fonte: smaABC, 2012, DERAL, 2014 e IAPAR, 2014	33
Figura 2 - Produção de matéria seca de aveia preta em 2009 (A), 2010 (B), 2011 (C) e 2012 (D) de acordo com as fontes de P com termofosfato magnésiano (TM), fosfato natural reativo (FR) e superfosfato triplo (ST), na semeadura da aveia ou da soja. Médias seguidas de letras iguais para cada tratamento de adubação fosfatada não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$)	46
Figura 3 - Produtividade de grãos de soja em 2009–2010 (A), 2010–2011 (B), 2011–2012 (C) e 2012–2013 (D) de acordo com as fontes de P com termofosfato magnésiano (TM), fosfato natural reativo (FR) e superfosfato triplo (ST), na semeadura da aveia ou da soja. Médias seguidas de letras iguais para cada tratamento de adubação fosfatada não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$)	61

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Resultados de análises químicas do solo antes da instalação do experimento em 2009	28
Tabela 2 - Natureza e composição química dos fertilizantes fosfatados	30
Tabela 3 - Alterações no pH em CaCl ₂ e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2010, de acordo com tratamentos de fósforo.....	38
Tabela 4 - Alterações no pH em CaCl ₂ e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2011, de acordo com tratamentos de fósforo.....	39
Tabela 5 - Alterações no pH em CaCl ₂ e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2012, de acordo com tratamentos de fósforo.....	40
Tabela 6 - Alterações no pH em CaCl ₂ e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2013, de acordo com tratamentos de fósforo.....	41
Tabela 7 - Extração de nutrientes pela parte aérea da aveia preta cultivada em 2009, 2010, 2011 e 2012 de acordo com tratamentos de adubação fosfatada	49
Tabela 8 - Concentrações de nutrientes nas folhas da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013 de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada	53
Tabela 9 - Concentrações de nutrientes nos grãos da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013 de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada	58
Tabela 10 - Aumento na produtividade de soja, índice de eficiência agrônômica (IEA) e retorno econômico de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada após quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja	65

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Sistema plantio direto - aspectos e benefícios	15
2.2. Correção da acidez do solo no estabelecimento do sistema plantio direto	16
2.3. Fósforo no solo	17
2.4. Fertilizantes fosfatados	19
2.5. Estratégias de adubação fosfatada no sistema plantio direto	23
2.6. Resposta da aveia preta e da soja à adubação fosfatada	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1. Caracterização da área experimental	28
3.2. Características dos cultivares de soja	31
3.2.1. Cultivar de soja BRS 184	31
3.2.2. Cultivar de soja CD 202	31
3.2.3. Cultivar de soja BRS 284	31
3.2.4. Cultivar de soja Apolo RR	32
3.3. Precipitação Pluvial	32
3.4. Avaliações	33
3.4.1. Amostragem e análise química das plantas de aveia preta	33
3.4.2. Amostragem e análise química do tecido foliar da soja	34
3.4.3. Produtividade e concentração de nutrientes nos grãos de soja	34
3.4.4. Amostragem e análise química do solo	34
3.4.4.1. Determinação do carbono orgânico	35
3.4.4.2. Determinação do pH	35

3.4.4.3.	Determinação de Ca, Mg e K trocáveis	35
3.4.4.4.	Determinação de P	35
3.4.4.5.	Determinação de Cu, Fe, Zn e Mn	35
3.4.5.	Índice de eficiência agrônômica (IEA)	35
3.4.6	Retorno econômico	36
3.4.7.	Análises estatísticas	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Alterações químicas do solo com os tratamentos de fósforo	37
4.2.	Produção de matéria seca de aveia preta	45
4.3.	Extração de nutrientes pela aveia preta	48
4.4.	Concentração de nutrientes nas folhas de soja	52
4.5.	Concentração de nutrientes nos grãos de soja	57
4.6.	Produtividade de grãos de soja	60
4.7.	Índice de eficiência agrônômica (IEA) e retorno econômico dos fertilizantes fosfatados	64
5.	CONCLUSÕES	68
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1. INTRODUÇÃO

No Brasil há cerca de 160 milhões de hectares (Mha) de pastagens, dos quais 100 Mha ou 62,5% são ocupados com pastagens cultivadas e 60 Mha (37,5%) são de pastagens nativas que podem, pelo menos em parte, ser utilizados para a produção de grãos (IBGE, 2015). Para que essas áreas possam ser utilizadas de maneira eficiente para produção agrícola, há a necessidade de manejo da fertilidade do solo para que não ocorram limitações na produtividade das culturas.

A acidez do solo e a deficiência de fósforo (P) são os fatores que mais limitam a produção das culturas em solos altamente intemperizados. O suprimento mais adequado de P pode ser alcançado pelo manejo apropriado da adubação fosfatada e pela escolha do fertilizante mais apropriado para cada tipo e manejo do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999).

As fontes de P, normalmente empregadas em culturas agrícolas no país, incluem fosfatos solúveis e insolúveis em água (RAIJ, 2011). Entretanto, as diferenças de solubilidade têm provocado reações distintas do fertilizante fosfatado com o solo, principalmente pela diferença de reatividade e efeito residual ao longo do tempo (NOVAIS & SMYTH, 1999).

O aporte de elevada quantidade de resíduos vegetais ao solo é um dos principais requisitos para o sucesso do sistema plantio direto em condições tropicais e subtropicais. A aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) é uma gramínea anual bastante rústica que tem sido muito empregada como planta de cobertura no sistema em plantio direto, antecedendo as culturas de soja ou milho (DERPSCH & CALEGARI, 1992; PÖTTKER & ROMAN, 1994), nos Estados da região Sul do Brasil, Sudoeste de São Paulo e Sul de Mato Grosso do Sul.

A adubação antecipada, com a retirada total ou parcial dos fertilizantes que seriam utilizados na semeadura da cultura da soja, aplicando-os no momento da semeadura da cultura de aveia preta, pode trazer vantagens por proporcionar (i) a instalação da cultura da soja na época recomendada, (ii) aproveitamento da umidade do solo ideal para a semeadura e (iii)

economia de combustível, com menor movimentação de máquinas, contribuindo para melhorar o rendimento operacional no processo de instalação da lavoura. Além disso, a adubação antecipada na cultura antecessora utilizada para a formação de palha em plantio direto pode favorecer o acúmulo de matéria orgânica adicional, melhorando a conservação do solo, a manutenção da umidade e a ciclagem de nutrientes (SILVA & ROSOLEM, 2001).

Considerando a expansão da área cultivada em plantio direto no Brasil, a constante necessidade de aumento de produtividade das culturas e o aumento do consumo de fertilizantes, torna-se imprescindível a realização de estudos que visem o aprimoramento de técnicas de adubação, tendo por base o uso mais eficiente e racional dos insumos utilizados para a produção de grãos.

Considerou-se, neste estudo, a hipótese de que as fontes fosfatadas menos solúveis em água, aplicadas de forma antecipada no sulco de semeadura da cultura de aveia preta, ao longo do tempo, são alternativas viáveis do ponto de vista agrônomo e econômico em comparação à fonte de alta solubilidade em água para a sucessão aveia preta-soja, no estabelecimento do sistema plantio direto. Os objetivos desse trabalho foram: (i) verificar as alterações nos principais atributos de fertilidade do solo (pH, Ca, Mg, K, C-orgânico, P-disponível, Cu, Fe, Zn e Mn), sem e com antecipação da adubação fosfatada para a sucessão aveia preta-soja com o uso de diferentes fontes de P - superfosfato triplo (ST), fosfato natural reativo (FR) e termofosfato magnesiano (TM); (ii) verificar a eficiência da aplicação de fontes de P em quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja na produção de matéria seca e extração de nutrientes pela aveia preta, e na produtividade e concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos de soja; e (iii) verificar a eficiência agrônoma (IEA) e o retorno econômico dos fertilizantes fosfatados, com ou sem antecipação, ao final dos quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema plantio direto – aspectos e benefícios

O sistema plantio direto tem se destacado como uma das estratégias mais eficazes para melhorar a sustentabilidade da agricultura em regiões tropicais e subtropicais, contribuindo para minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão (CAIRES, 2011). A área atualmente cultivada em plantio direto no Brasil ultrapassa 32 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2014). Nesse sistema, a semeadura ocorre em solo não revolvido e devidamente protegido por resíduos vegetais de culturas anteriores, no qual as sementes são colocadas em sulcos ou covas, com largura e profundidade suficientes para adequada cobertura e contato das mesmas com a terra (MUZILLI, 1981).

Ao longo do tempo, o sistema plantio direto tornou-se um investimento na gestão dos recursos naturais e socioeconômicos, cujos principais benefícios assegurados são a conservação do solo, da água e do ar, economia com o uso de maquinários e produtos agroquímicos, redução dos riscos de estiagens, melhor organização e conforto do trabalho e uso mais eficiente do capital (MUZILLI, 2000). Devido à ausência de revolvimento e manutenção de uma cobertura permanente no solo, o sistema constrói ao longo do tempo um solo estratificado, com acúmulo acentuado de matéria orgânica e nutrientes na superfície do solo (PEIXOTO, 2000).

Com a evolução deste sistema e sua adoção pelos produtores, começaram a surgir questionamentos sobre o manejo da fertilidade do solo, tendo em vista diferenças na dinâmica de nutrientes nesse sistema em relação ao sistema convencional de preparo do solo.

2.2. Correção da acidez do solo no estabelecimento do sistema plantio direto

A maioria dos solos brasileiros apresenta limitações ao estabelecimento e desenvolvimento das culturas em decorrência dos efeitos da acidez. Tais limitações estão relacionadas com a presença de alumínio (Al) e manganês (Mn) em concentrações tóxicas, e de baixos teores de cátions básicos, como cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (SOUSA et al., 2007).

Os solos tropicais, em suas condições naturais, são ácidos, em decorrência do material de origem e da intensidade da ação de agentes de intemperismo, como clima e organismos (SOUSA et al., 2007). Regiões com alta precipitação pluvial apresentam tendência à maior acidificação do solo pela lixiviação de cátions básicos do complexo de troca, como Ca, Mg e potássio (K), e consequente acúmulo de cátions de natureza ácida como hidrogênio (H) e Al (LOPES & GUILHERME, 2007).

A acidez do solo limita a produção agrícola em consideráveis áreas no mundo. A deficiência de Ca e a toxidez causada por Al e Mn são os fatores que mais limitam a produtividade das culturas em solos ácidos de regiões tropicais e subtropicais (COLEMAN & THOMAS, 1967 apud CAIRES, 2011).

Em áreas de pastagem nativa, normalmente a maior limitação à produção de culturas está relacionada com a elevada acidez do solo. Entretanto, a principal qualidade desses solos é a sua estrutura (COSTA et al., 2006). Visando manter as boas qualidades físicas do solo, muitos agricultores têm implantado o sistema plantio direto nessas áreas apenas com calagem em superfície, porém tal prática pode resultar em baixas produtividades, principalmente nos primeiros anos, em decorrência da alta acidez do solo e da baixa solubilidade dos corretivos da acidez. A calagem na superfície, em tais circunstâncias, somente tem sido viável quando o solo apresenta baixa acidez e teor reduzido de Al^{3+} trocável na camada 0–20 cm (CAIRES et al., 2006)

No estabelecimento do sistema plantio direto a partir de pastagem nativa, a correção da acidez do solo por meio da incorporação do calcário com aração e gradagens proporciona maior reação no solo devido ao maior contato entre as partículas do corretivo com os colóides do solo (RHEINHEIMER et al., 2000).

Em um estudo realizado no Estado do Rio Grande do Sul com pastagem natural comparando a aplicação de calcário sem e com incorporação, Kaminski et al. (2005) constataram que a incorporação do calcário ao solo apresentou maior eficiência em relação à calagem superficial, neutralizando a acidez em profundidades maiores.

As alterações físicas e químicas de um Cambissolo Húmico em função de modos de aplicação de calcário no momento da conversão de pastagem nativa para o sistema plantio direto foram estudadas por Costa et al. (2006). Verificou-se que a incorporação do calcário no solo com aração e gradagens foi benéfica para a qualidade do solo, pois houve redução na densidade e na resistência à penetração, e aumento na porosidade total, na macroporosidade, no grau de floculação e na correção da acidez na camada de 0–10 cm, apesar de terem ocorridos prejuízos à estabilidade dos agregados e ao conteúdo de carbono (C).

Os resultados da literatura indicam que a correção da acidez no estabelecimento do sistema plantio direto em solos ácidos degradados deve ser feita por meio de incorporação de calcário no solo com aração e gradagens.

2.3. Fósforo no solo

No solo, o P está presente nas fases sólida e líquida, adsorvido ou complexado com os oxi-hidróxidos de ferro (Fe), Al e Ca e com a matéria orgânica, ou livre na solução do solo (MERLIN & ROSOLEM, 2011). Devido a sua baixa disponibilidade em solos tropicais (NOVAIS & SMYTH, 1999), o P é utilizado em grandes quantidades na adubação das culturas (RAIJ, 2011). Em 2013, o consumo de fertilizantes no Brasil foi de 3,9, 4,9 e 5,0 milhões de

toneladas (Tg) de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente (IPNI, 2015a). Já, os índices de aproveitamento de N, P_2O_5 e K_2O em 2008 no Brasil foram de 71,8%, 54,0% e 76,5%, respectivamente, evidenciando menor aproveitamento da adubação fosfatada pelas culturas (IPNI, 2015b). Tal fato se deve à alta capacidade de adsorção de P pelos solos altamente intemperizados das regiões tropicais (SANCHES & LOGAN, 1992). Nessas situações, o aumento na disponibilidade de P para as plantas pode ser alcançado pelo manejo apropriado da adubação fosfatada e pela escolha do fertilizante mais apropriado para cada tipo e manejo de solo (NOVAIS & SMYTH, 1999).

A retenção de P pelo solo pode acontecer pela precipitação do P em solução com as formas iônicas de Fe, Al e Ca, e de modo mais significativo pela sua adsorção aos oxihidróxidos de Fe e de Al (NOVAIS & SMYTH, 1999). Em solos ácidos, o produto principal da reação entre hidróxidos de Al e fosfatos é a variscita ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$) e entre hidróxidos de Fe e fosfatos é a strengita ($FePO_4 \cdot 2H_2O$). A reação de fosfatos com caulinita também ocorre, com a camada octaédrica de Al, pela substituição de grupos OH. Em condições de alcalinidade, ocorre a formação de compostos com Ca, na seguinte sequência de compostos cada vez mais insolúveis: fosfato dicálcio ($CaHPO_4$), fosfato tricálcio [$Ca_3(PO_4)_2$], fosfato octocálcico [$Ca_8H_2(PO_4)_6$], hidroxiapatita [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$] e fluorapatita [$Ca_{10}F_2(PO_4)_6$] (RAIJ, 2004).

Na solução do solo, o P encontra-se na forma predominante de íons ortofosfatos (HPO_4^{2-} e $H_2PO_4^-$). Em decorrência das reações de equilíbrio no solo, a forma $H_2PO_4^-$ predomina em solos ácidos, ou seja, na faixa de pH em água de 5,0 a 6,0, e a forma HPO_4^{2-} passa a predominar em situações de pH em água mais elevado (acima de 6,0) (RAIJ, 2011).

O P no solo é dividido em dois grandes grupos, o P inorgânico e o P orgânico, dependendo da natureza do composto a que ele está ligado. O grupo do P inorgânico pode ser separado em P dos minerais primários ou estrutural, P adsorvido e P da solução no solo. O P inorgânico adsorvido pode ocorrer em todos os minerais presentes no solo por causa de sua

facilidade em formar complexos de alta energia de ligação; assim o P pode ser encontrado ligado ao Fe, Al e Ca, adsorvido às argilas silicatadas do tipo 1:1, adsorvido à matéria orgânica e, principalmente, adsorvido aos oxi-hidróxidos de Fe e Al (GATIBONI, 2003; NOVAIS & SMYTH, 1999; HAVLIN et al., 2005; RAIJ, 2011).

O P orgânico pode constituir de 20 a 80% do P total do solo (DALAL, 1977). O P orgânico é originário dos resíduos vegetais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (MERLIN & ROSOLEM, 2011). O P orgânico ocorre em teores proporcionais ao da matéria orgânica, podendo-se citar a relação de 50:1 como ordem de grandeza. Vários compostos de P foram identificados na matéria orgânica, predominando os fosfatos de inositol, fosfolipídeos e ácido nucléicos (RAIJ, 2011).

2.4. Fertilizantes fosfatados

No Brasil existem diversas fontes de fosfatos para aplicação no solo. As principais fontes de P podem ser divididas em: (i) fosfatos naturais (rocha fosfática moída; reatividade/eficiência agronômica variável dependendo de fatores ligados à mineralogia da rocha); (ii) termofosfatos (processo térmico; consumo de elevada quantidade de energia) e (iii) fosfatos totalmente acidulados (superfosfatos) (MALAVOLTA, 2006).

A aplicação de fosfato natural é uma prática que vem sendo estudada como alternativa à aplicação de fosfatos solúveis no sulco de semeadura, comumente adotada (MERLIN & ROSOLEM, 2011). A utilização da rocha fosfática pode ser uma alternativa eficaz do ponto de vista agronômico e econômico em relação à utilização de fertilizantes solúveis, especialmente em solos ácidos de países em desenvolvimento (CHIEN et al., 2009). Os fosfatos de rocha podem ser divididos em duas categorias: fosfatos naturais de baixa reatividade (rochas ígneas e metamórficas) e fosfatos naturais reativos (rochas sedimentares).

Os fosfatos naturais apresentam, normalmente, menor eficiência do que os totalmente acidulados, em especial no ano da aplicação e nas culturas anuais, as quais apresentam alta demanda de P num curto período de tempo (GOEDERT & LOBATO, 1984; GOEDERT et al., 1986a; SOUSA & LOBATO, 2003). Porém, ao longo de vários cultivos após a adubação, o desempenho de alguns fosfatos naturais pode equiparar-se ao das fontes mais solúveis (RESENDE et al., 2006). Isso se explica pelo fato de o P prontamente liberado dos fertilizantes solúveis passar para formas menos disponíveis, enquanto os fosfatos naturais vão sendo solubilizados com o decorrer do tempo (NOVAIS & SMYTH, 1999).

Além dos benefícios agronômicos promovidos pelo fosfato natural, o uso desse fertilizante também poderia mitigar os efeitos da eutrofização dos ambientes aquáticos (CHIEN et al., 2009).

Vários fatores afetam a eficiência dos fosfatos naturais, dentre eles: (i) o tamanho das partículas do fertilizante; (ii) as propriedades do solo; (iii) o modo de aplicação e o preparo do solo; (iv) a espécie vegetal; e (v) o clima (CHIEN et al., 2009; HOROWITZ & MEURER, 2004).

A aplicação de fosfatos naturais apresenta maior eficiência em solos com maior acidez, pois são necessários prótons (H^+) para iniciarem o processo de dissolução do fosfato natural (NOVAIS & SMYTH, 1999). Porém em solos com acidez corrigida para culturas anuais (pH em água em torno de 6,0), a eficiência agronômica do fosfato natural é muito baixa, em média de 25% para culturas anuais, em relação aos fosfatos solúveis em água (SOUSA & LOBATO, 2004).

Outro fator que afeta a dissolução dos fosfatos naturais e, conseqüentemente, sua eficiência, são os teores de Ca e P presentes no solo. Quanto menor a concentração desses nutrientes na solução, o deslocamento da reação no sentido da dissolução do fosfato será favorecido, aumentando sua eficiência (HOROWITZ & MEURER, 2004).

A dissolução do fertilizante é dependente também da superfície de contato com o solo, portanto sua taxa de dissolução será maior quando for aplicado em área total e incorporado ao solo (HOROWITZ & MEURER, 2004). Corroborando com isto, Oliveira Junior et al. (2008) observaram que, para o fosfato de rocha, a aplicação de forma localizada reduziu significativamente a eficiência agronômica em comparação à aplicação a lanço.

O uso de fontes alternativas de P tem adquirido grande importância, basicamente em decorrência do custo elevado dos fertilizantes fosfatados solúveis em água e do aumento da oferta de fosfatos insolúveis de melhor eficiência agronômica (RESENDE et al., 2006).

A utilização do termofosfato magnésiano como fonte de P tem mostrado alta eficiência agronômica devido à sua solubilidade total em ácido cítrico a 2%. O termofosfato é obtido por meio da fusão das rochas fosfatadas com materiais contendo sílica e Mg, com granulometria entre 6 e 50 mm em fornos com temperatura entre 1400 a 1500 °C. Ao sair do forno, o material é resfriado imediatamente com jatos de água, formando, nessa operação, grãos inferiores a 2 mm, de aspecto vítreo e de coloração enegrecida (SOUZA & YASUDA, 1995). A alta eficiência do termofosfato está relacionada à disponibilização gradual do P, pela presença de silicato em sua composição, o que possibilita a diminuição da fixação de P no solo, principalmente em solos ricos em argilominerais do tipo sesquióxidos de Fe e/ou de Al (MOREIRA & MALAVOLTA, 2001).

A aplicação de termofosfato em um solo com alta acidez promove a liberação de íons H^+ da superfície dos coloides do solo, e ocorre uma troca destes com os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes no fertilizante. Com isso, o P remanescente desprende-se do fertilizante junto com a sílica, tornando-se solúvel ao entrar em contato com os ácidos fracos, tais como o ácido carbônico, sendo absorvido pelas plantas (SOUZA & YASUDA, 1995). Portanto, os termofosfatos contribuem para a elevação dos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, acrescentando

além do fosfato tricálcico, os silicatos de Ca e Mg, alterando o pH e as demais propriedades a ele relacionadas (SOUZA & YASUDA, 1995; VITTI et al., 2004).

Após 18 meses da aplicação de termofosfato, Morelli et al. (1992) constataram que os níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} e a saturação por bases aumentaram na camada de 20-40 cm, sendo que no tratamento com 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 a lanço, a saturação por bases na camada de 20-40 cm elevou-se de 22% aos 8 meses para 43% aos 18 meses. Os mesmos autores também observaram que o pH em água na superfície do solo elevou-se de acordo com as doses de termofosfato, passando de 5,0 no tratamento sem P para 6,1 na maior dose de termofosfato, aos 8 meses após a aplicação.

Dentre as opções de fontes de P no mercado, os fosfatos totalmente acidulados ocupam lugar de destaque, principalmente por suas elevadas quantidades de P disponível para as plantas e pelo menor custo por unidade de P presente no fertilizante. Também apresentam alta solubilidade em água, o que contribui para uma maior eficiência agronômica (BOLLAND & BOWDEN, 1982; RESENDE et al., 2006). O superfosfato triplo é um fosfato totalmente acidulado produzido através da reação de rocha fosfática moída com ácido fosfórico (H_3PO_4). É constituído principalmente de fosfato monocálcico, contendo aproximadamente 43 a 48% de P_2O_5 solúvel em água + CNA e 14% de Ca (VITTI et al., 2004).

A aplicação de fertilizante cuja solubilidade em água é elevada favorece o rápido aumento nos teores de P em solução, no entanto, concomitantemente à absorção de P pelas plantas podem ocorrer processos de adsorção de P na superfície dos minerais de argila, de precipitação como minerais secundários e de imobilização por microorganismos (HAVLIN et al., 2005; NOVAIS & SMYTH, 1999; SILVA et al., 2009). Tal efeito fez com que surgissem estudos com a utilização de fontes menos solúveis, buscando por meio de estratégias de adubação, reduzir as “perdas” de P e promover a nutrição adequada de forma gradual e constante das plantas.

2.5. Estratégias de adubação fosfatada no sistema plantio direto

Algumas características do sistema plantio direto, como o não revolvimento do solo, a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície e a colocação de sementes e fertilizantes em diferentes profundidades e espaçamentos podem interferir na dinâmica e disponibilidade do P no solo e, por conseguinte, na resposta das culturas à adubação fosfatada (CARNEIRO et al., 2011).

No sistema plantio direto, normalmente ocorre acúmulo de matéria orgânica na superfície, consequentemente ocasionando aumento na disponibilidade de alguns nutrientes nas camadas mais superficiais do solo, como é o caso do P (MERLIN & ROSOLEM, 2011). O efeito do manejo conservacionista do solo proporciona redução da adsorção de P através da formação de complexos orgânicos oriundos da decomposição dos resíduos culturais, com os íons Al^{3+} e Fe^{2+} (SÁ, 2004). A formação destes complexos faz com que ocorra a ocupação dos sítios de carga positiva da superfície dos coloides inorgânicos e reduza a passagem de P-lábil para P-não-lábil, resultando no aumento da disponibilidade de P no solo.

O revolvimento do solo utilizado no preparo convencional promove maior contato entre o íon fosfato e a superfície dos coloides inorgânicos, proporcionando reações de adsorção e redução na disponibilidade de P para as plantas (SÁ, 2004). O não revolvimento do solo sob plantio direto promove a formação de linhas de P residual, com espaçamentos e profundidades distintos, sendo este efeito cumulativo ao longo dos anos (SÁ, 2004).

Existem muitos fatores ou práticas que afetam a eficiência da adubação fosfatada como: (i) a calagem; (ii) a localização do fertilizante fosfatado; e (iii) o manejo do solo. Com a elevação do pH por meio da calagem, ocorre redução na fixação de P no solo, aumentando a eficiência da adubação fosfatada, como pode ser observado em Vidor & Freire (1972).

O local de aplicação do fertilizante fosfatado, por sua vez, está muito relacionado à fonte utilizada e aos atributos do solo. Os modos de fornecimento de P no sistema plantio direto são

bastante variados. O fertilizante fosfatado pode ser aplicado ao lado e abaixo do sulco de semeadura (SANTOS et al., 2008) ou na superfície do solo, a lanço (SANTOS et al., 2000). Fontes de P que apresentam menor solubilidade em água como os fosfatos de rocha (fosfato natural), devem ser aplicadas em área total e incorporadas em maior volume ao solo. Fontes de P com alta solubilidade por sua vez, devem ser aplicadas de forma localizada (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2010).

A aplicação de P em plantio direto deverá ser feita na linha de semeadura sempre que houver probabilidade de resposta da cultura à aplicação do fertilizante (POTTKER, 1999). A aplicação poderá ser realizada em superfície somente quando o solo apresentar teores de P acima dos níveis de suficiência, pelo menos na camada de 0–20 cm; porém, nessa condição, a probabilidade de resposta à adubação é muito pequena ou ausente (PAVINATO & CERETTA, 2004).

Quanto à prática de antecipação da adubação fosfatada, existem divergências na literatura. Alguns autores relatam que se a adubação fosfatada for antecipada, haverá perda na produtividade, pois a energia de ligação do fosfato aos grupos funcionais aumenta com o tempo e, conseqüentemente, diminui o P disponível para as plantas (MATINAZZO et al., 2007). Porém, outros trabalhos revelaram que a antecipação da adubação da soja permite racionalização no dimensionamento das máquinas, redução no número de conjuntos necessários para a semeadura e aumento na receita líquida da cultura (MATOS et al., 2006). Em um estudo com antecipação da adubação na semeadura do capim pé-de-galinha, a adubação antecipada não interferiu no acúmulo de matéria seca, na exportação de nutrientes pelos grãos e na produtividade da soja (FRANCISCO et al., 2007). Os resultados desse estudo evidenciaram que o manejo da adubação, visando maior rendimento operacional do processo de semeadura pode ser viável para favorecer a instalação da cultura da soja na época recomendada.

Lantmann et al. (1996) estudaram quatro condições de manejo de P: 1) sem aplicação de P; 2) com aplicação de P na cultura de inverno; 3) com aplicação de P na cultura de verão e inverno; e 4) com aplicação do dobro da dose de P na cultura de verão e com a dose normal de P na cultura de inverno. Verificou-se que o índice de aproveitamento médio do P aplicado foi de 71% quando a aplicação de P foi feita somente na cultura de inverno, enquanto que nas condições 3 e 4 foi, respectivamente, de 45% e 33%. Para Lana et al. (2003), a adubação antecipada em até cinco meses antes da semeadura não influenciou a produtividade da soja, em relação à adubação na semeadura. Na sucessão aveia branca-soja, Trentin et al. (2004) não verificaram redução na produtividade de soja com aplicação do P antecipada na cultura da aveia, havendo ainda o benefício adicional do aumento da produção de matéria seca da aveia. A adubação em pré-semeadura da soja com P e K a lanço, em região de cerrado, não promoveu alteração na produtividade da cultura, em comparação à adubação na linha no momento da semeadura (GUARESCHI et al., 2008). Porém a produtividade da soja foi reduzida pela aplicação exclusiva do P em pré-semeadura a lanço nesse estudo. Esses resultados evidenciam que a aplicação de P na cultura de inverno pode proporcionar aproveitamento igual ou até mesmo maior de P pelas plantas e permite racionalização no uso de fertilizantes fosfatados. No entanto, as estratégias para esse manejo precisam ser cuidadosamente avaliadas para evitar perdas na produtividade.

2.6. Resposta da aveia preta e da soja à adubação fosfatada

Na região Sul do Brasil, a adoção do sistema plantio direto com o uso da aveia preta como cultura de cobertura antecedendo o cultivo de verão tem se mostrado uma eficiente estratégia de manejo do solo (AMADO et al., 2003). Trata-se de uma forrageira que apresenta eficiência na ciclagem de nutrientes, devido à relação produção de massa seca e absorção de nutrientes em função do seu sistema radicular agressivo (PRADO et al., 2006). O seu uso como

cultura de cobertura traz como benefícios o controle de plantas daninhas, a redução da erosão e do escoamento superficial, e o aumento da infiltração de água, da umidade disponível, do conteúdo de C orgânico e da ciclagem de nutrientes no solo (BAYER & AMARAL, 2003; BORKERT et al., 2003; SANTI et al., 2003). Os resíduos de aveia preta também podem amenizar a acidez e os efeitos tóxicos do Al (MIYAZAWA et al., 1993; FRANCHINI et. al., 1999). Além dos benefícios de redução da acidez do solo, a exsudação de ácidos orgânicos na rizosfera radicular de algumas espécies também pode auxiliar na solubilização dos fosfatos, deixando o nutriente em maior disponibilidade (KIRK, 1999).

A adubação fosfatada no sistema plantio direto proporciona melhor desenvolvimento da aveia preta, incremento no rendimento de matéria seca e maior absorção de nutrientes pelas plantas (PRADO et al., 2006). Aumento nos teores de nutrientes na folha bandeira da aveia foi constatado com a adubação fosfatada (NAKAGAWA & ROSOLEM, 2005), sendo tal efeito reflexo do maior desenvolvimento das plantas proporcionado pela adição de P em solo com baixo teor do nutriente, resultando em maior formação de raízes e favorecendo a absorção e o acúmulo de nutrientes. A dose de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi suficiente para ocasionar esse efeito, confirmando a rusticidade e a menor exigência da aveia preta em P (DERPSCH & CALEGARI, 1992).

Dentro do agronegócio mundial, a produção de soja está entre as atividades econômicas que apresentaram crescimentos mais expressivos nas últimas décadas. No contexto mundial, o Brasil possui significativa participação na oferta e na demanda de produtos do complexo agroindustrial da soja, o qual vem desempenhando papel fundamental para o desenvolvimento de várias regiões do país. Na safra 2013/2014, a produção brasileira de soja atingiu 86,1 Tg, com área cultivada de 30,2 Mha e produtividade média de 2854 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015). Com a expansão do cultivo da cultura de soja em diversas regiões do Brasil, principalmente na região

do Cerrado, a escolha das melhores estratégias de manejo da fertilidade e correção da acidez do solo é de extrema importância para a sustentabilidade da produção agrícola nessas regiões.

A adubação fosfatada é muito importante no manejo nutricional da soja, porém a quantidade absorvida é pequena, cerca de 7 kg de P ou 15 kg de P_2O_5 para produzir uma tonelada de grãos (MALAVOLTA, 1978). Embora a exigência de P seja pequena, as doses de P utilizadas por meio das adubações costumam ser elevadas, devido, principalmente, à fixação deste nutriente no solo (LANTMANN & CASTRO, 2004). Segundo Hanson (1981), a soja tem necessidade crescente de P conforme os rendimentos se elevam, ou seja, para alcançar produtividade de 1.020 kg ha^{-1} ocorre demanda de $15,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 e para produtividade de 4.080 kg ha^{-1} (quatro vezes maior), a demanda de P foi de $107,4 \text{ kg ha}^{-1}$, aproximadamente sete vezes maior. Esses dados sugerem que a soja necessita de altas doses de P para a obtenção de elevados rendimentos, porém conforme Lantmann et al. (1996), existem vários trabalhos que demonstram que a cultura da soja possui habilidade em aproveitar o efeito residual das fertilizações anteriores, sendo capaz de apresentar altos rendimentos em condições de baixa ou nenhuma adubação fosfatada, desde que o solo apresente nível de P acima dos níveis críticos para a cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado no município de Ponta Grossa – PR, em área de pastagem degradada na Fazenda Modelo do IAPAR, cujas coordenadas geográficas são 25°07'29'' de latitude sul, 50°04'14'' de longitude oeste e altitude de 890 m.

O clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico, tipo Cfb conforme classificação de Köppen, com temperaturas amenas no verão e ocorrência de geadas severas e frequentes no inverno, sem estação seca definida (MAACK, 1981). A precipitação pluvial média histórica na região é de 1554 mm anuais. A temperatura média histórica é de 17,8°C, com média máxima de 24,1°C e média mínima de 13,3°C (IAPAR, 2014).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico textura média (EMBRAPA, 2006). Os resultados de análises químicas (PAVAN et al., 1992), em diferentes profundidades do solo, realizadas antes da instalação do experimento em 2009, estão apresentados na tabela 1. Nota-se que o solo apresentava alta acidez, teores tóxicos de Al^{3+} , baixos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e teor muito baixo de P.

Tabela 1 - Resultados de análises químicas do solo antes da instalação do experimento em 2009.

Profun- didade	pH (CaCl ₂)	H + Al	Al	Ca	Mg	K	P (Mehlich-1)	C	CTC a pH 7,0	V
cm		----- mmolc dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³	g dm ⁻³	cmolc dm ⁻³	%
0–5	4,5	62,1	4,0	8,0	3,7	1,0	0,8	11,6	7,48	17
5–10	4,2	62,1	7,0	3,5	1,5	0,8	0,2	11,1	6,79	9
10–20	4,1	58,6	8,0	1,3	1,6	0,6	0,2	9,9	6,21	6
0–20	4,3	61,0	6,0	4,0	2,0	1,0	0,4	10,9	6,80	10

V: saturação por bases do solo.

Análises granulométricas (EMBRAPA, 1997), na camada de 0–20 cm, indicaram 190 g kg⁻¹ de argila, 103 g kg⁻¹ de silte e 707 g kg⁻¹ de areia. Análises de difratogramas de raios-X

realizadas na fração argila revelaram dominância de caulinita e gibsitita, e presença, em menor magnitude, de óxidos de Fe, principalmente de hematita.

Antes da instalação do experimento foi realizada calagem incorporada para a correção do solo. O calcário utilizado tinha 280 g kg⁻¹ de CaO, 180 g kg⁻¹ de MgO e 84% de poder relativo de neutralização total (PRNT). A dose de calcário empregada foi de 4,8 t ha⁻¹, definida de acordo com o método da elevação da saturação por bases do solo para 70%, considerando a camada de 0–20 cm (CAIRES et al., 2005). O calcário foi distribuído a lanço sobre a superfície do solo em maio de 2009 em duas etapas consecutivas. A primeira etapa constou de aplicação manual de metade da dose antes da aração com arado de discos, a 20 cm de profundidade. Na segunda etapa, aplicou-se o restante do calcário manualmente após a aração e imediatamente antes da gradagem com grade niveladora.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos completos ao acaso com três repetições. O tamanho das parcelas foi 20 m × 4 m. Empregaram-se sete tratamentos de adubação fosfatada, com ou sem antecipação da adubação da soja para a cultura de aveia preta por meio da aplicação de termofosfato magnésiano (TM), fosfato natural reativo - BG 4 (FR) e fosfato totalmente acidulado – superfosfato triplo (ST): sem P (controle), TM no sulco de semeadura da aveia, FR no sulco de semeadura da aveia, ST no sulco de semeadura da aveia, TM no sulco de semeadura da soja, FR no sulco de semeadura da soja e ST no sulco de semeadura da soja. A dose utilizada nos tratamentos de adubação fosfatada foi de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, calculada com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes. A natureza e a composição química dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento são apresentadas na tabela 2.

A semeadura e a adubação fosfatada foram realizadas com máquina semeadora-adubadora, utilizando o dosador de precisão Fertisystem[®]. O dosador de precisão proporciona a eliminação do efeito "ciclo do sem-fim (pulsção)" e anula as grandes variações das dosagens em inclinações topográficas, apresentando uniformidade de distribuição na linha e dosagem

constante. O sistema é versátil na utilização de adubos com diversas granulometrias (granulado, farelado e pó).

Tabela 2 - Natureza e composição química dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizante fosfatado	Natureza	P ₂ O ₅ (total)	P ₂ O ₅ (ácido cítrico 2%)	P ₂ O ₅ (água)	CaO	MgO	SiO ₂
-----g kg ⁻¹ -----							
TM	Pó	180	165	-	180	70	100
FR – BG 4	Farelado	330	100	-	370	-	-
ST	Granulado	460	-	380	130	-	-

Realizaram-se quatro cultivos com a sucessão aveia preta-soja em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013. A adubação potássica foi efetuada em cobertura, logo após a semeadura, utilizando-se 50 kg ha⁻¹ de K₂O na cultura da aveia preta e 50 kg ha⁻¹ de K₂O na cultura da soja, nas formas de cloreto de potássio, no primeiro e terceiro cultivos, e de sulfato de potássio, no segundo e quarto cultivos. O uso de sulfato de potássio teve por objetivo fornecer enxofre (S) para a cultura da soja. A adubação nitrogenada na aveia preta foi realizada conjuntamente a adubação potássica, na forma de uréia em cobertura, na dose de 50 kg ha⁻¹ de N em todos os cultivos. A aveia preta foi semeada em junho de 2009, 2010, 2011 e 2012, na densidade de 80 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento de 0,18 m entre as linhas. No período de pleno florescimento da cultura, coletou-se a parte aérea das plantas para avaliar a produção de matéria seca. Logo após, realizou-se a dessecação da aveia com a aplicação de 2 L ha⁻¹ de *glyphosate*. A soja foi semeada no início de dezembro de 2009 (cv. BRS 184) e 2011 (cv. BRS 284) e no final de novembro de 2010 (cv. CD 202) e 2012 (cv. Apolo RR), na densidade de 17 sementes por metro e espaçamento de 0,45 m entre as linhas. As sementes de soja foram inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* pouco antes da semeadura.

3.2. Características dos cultivares de soja

3.2.1. Cultivar de soja BRS 184

O cultivar BRS 184 é um genótipo de soja convencional com alto potencial produtivo. Possui ciclo precoce e crescimento determinado. Apresenta excelente ramificação da planta. É resistente ao cancro da haste, à mancha “olho de rã”, ao mosaico comum da soja e ao vírus da necrose da haste. A coloração da flor é roxa, o hilo é preto e a pubescência é marrom. Pode ser cultivado em ambientes de média fertilidade (EMBRAPA, 2014a).

3.2.2. Cultivar de soja CD 202

O cultivar CD 202 é um genótipo de soja convencional e possui ciclo precoce, hábito de crescimento determinado, coloração da flor branca, hilo marrom claro e pubescência cinza. A altura média das plantas é de 84 cm e a altura média de inserção da primeira vagem é de 15 cm. Esse cultivar apresenta resistência ao acamamento, ao cancro da haste, à mancha “olho de rã”, à pústula bacteriana e ao nematóide *Meloydogine incognita*. É suscetível ao crestamento bacteriano, ao oídio e aos nematóides *Meloydogine javanica* e *Heterodera glycines*. É recomendado para solos de alta fertilidade, sendo eficiente e responsivo quanto à utilização de adubação, e apresenta tolerância ao complexo de acidez do solo (COODETEC, 2014).

3.2.3. Cultivar de soja BRS 284

O cultivar BRS 284 é um genótipo de soja convencional de hábito de crescimento indeterminado. Apresenta ciclo precoce e pode ser semeado no início de outubro. Possui boa resistência ao nematóide da galha *Meloidogyne javanica* e boa qualidade de semente. A coloração da flor é roxa, o hilo é marrom clara e a pubescência cinza. Exige solos com média a alta fertilidade (EMBRAPA, 2014b).

3.2.4. Cultivar de soja Apolo RR

O cultivar Apolo RR é um genótipo de soja transgênico de hábito de crescimento indeterminado. Possui ciclo superprecoce e porte médio. Apresenta alto índice de ramificação e alto índice de colheita, não tolerando perdas em sua área foliar. Possui resistência ao acamamento, ao cancro da haste, à pústula bacteriana e à podridão radicular de *Phytophthora* raça 1. A coloração da flor é branca, o hilo é amarelo e a pubescência cinza. Exige solos de alta fertilidade (BRASMAX, 2014).

3.3. Precipitação Pluvial

Na figura 1 estão apresentados os dados de precipitação pluvial ocorridos nos quatro anos em que as culturas de aveia preta e soja estiveram no campo, entre os anos de 2009 e 2013 (smABC, 2012; DERAL, 2014), e também a precipitação pluvial média histórica compreendida entre os anos de 1954 a 2001, obtida da estação meteorológica do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR, 2014).

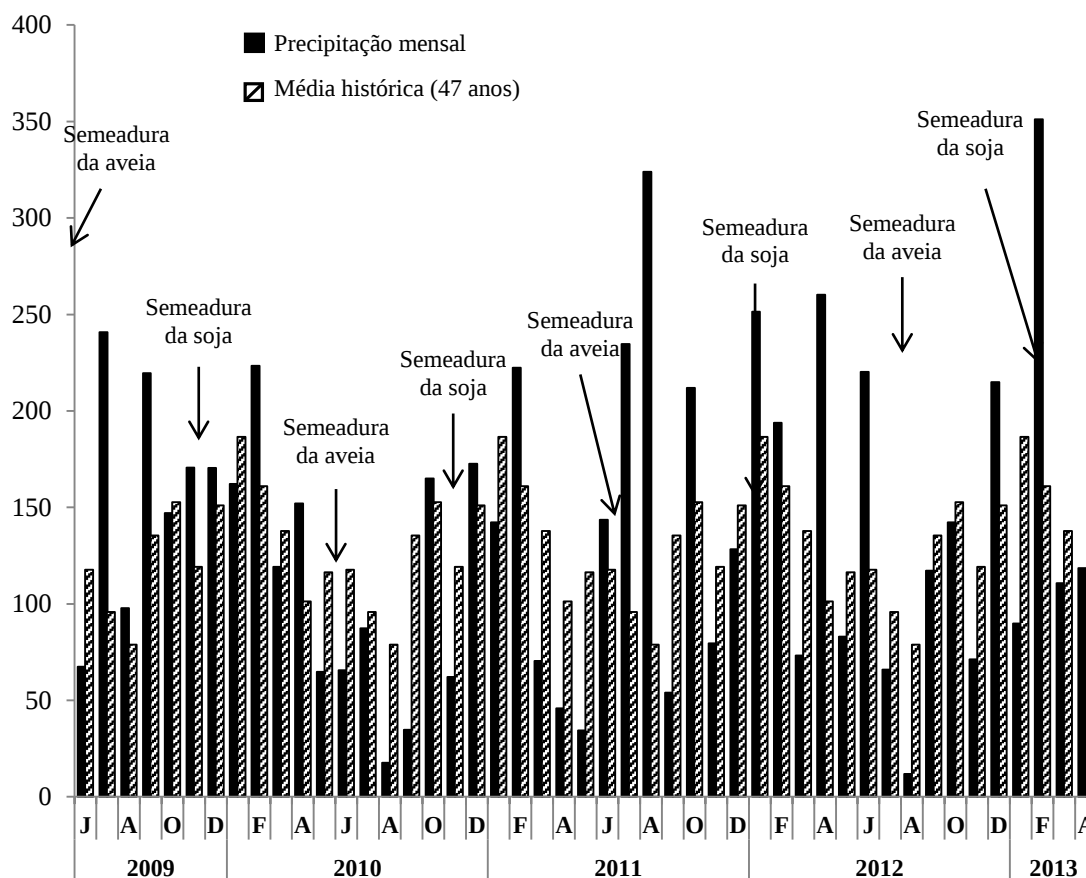


Figura 1 - Precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento no período de 2009 a 2013 e precipitação pluvial média mensal histórica (47 anos) da região de Ponta Grossa (PR).
Fonte: smaABC, 2012, DERAL, 2014 e IAPAR, 2014.

3.4. Avaliações

3.4.1. Amostragem e análise química das plantas de aveia preta

No período de pleno florescimento da aveia preta nos quatro anos, foram retiradas três linhas de 1,0 m de plantas ($0,54 \text{ m}^2$) de cada parcela, somente a parte aérea, para avaliar a produção de matéria seca. Depois disso, os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn na parte aérea da aveia preta foram analisados de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997). A extração de nutrientes pela parte aérea das plantas de aveia preta foi calculada em função dos dados de produção de matéria seca e dos teores de nutrientes.

3.4.2. Amostragem e análise química do tecido foliar da soja

Amostras de folhas foram coletadas nos quatro cultivos com soja (2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013), para fins de diagnose foliar. As amostragens foram realizadas por ocasião do florescimento em 30 plantas de cada parcela, retirando-se o terceiro trifólio a partir do ápice das plantas. Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinados de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

3.4.3. Produtividade e concentração de nutrientes nos grãos de soja

A produtividade de grãos nos quatro cultivos com soja (2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013), foi avaliada após a maturação, por meio de colheita manual e trilhagem em máquina debulhadora estacionária, corrigindo-se a umidade dos grãos para 130 g kg⁻¹. Foram colhidas as cinco linhas centrais por 4,5 m de comprimento de cada parcela, compreendendo uma área útil de 10,1 m². Após a avaliação da produtividade, os grãos foram moídos em liquidificador industrial e, em seguida, foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn conforme Malavolta et al. (1997).

3.4.4. Amostragem e análise química do solo

Amostras de solo foram coletadas logo após a colheita da cultura da soja em 2010, 2011, 2012 e 2013. Retiraram-se, por meio de trado, 12 subamostras por parcela, sendo três na linha de semeadura e nove nas entrelinhas da cultura da soja, para constituir uma amostra composta das camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm de profundidade. As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C, destorroadas e moídas mediante o uso de almofariz, e passadas em peneira com malha de 2 mm. O pH e os teores de C orgânico, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinados de acordo com os seguintes procedimentos:

3.4.4.1. Determinação do C orgânico: O C orgânico total do solo foi determinado por meio de sua oxidação a CO_2 por íons dicromato, em meio fortemente ácido, por meio do método Walkley-Black (PAVAN et al., 1992).

3.4.4.2. Determinação do pH: o pH foi determinado em suspensão de solo com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (PAVAN et al., 1992).

3.4.4.3. Determinação de Ca, Mg e K trocáveis: A extração de Ca e Mg trocáveis foi efetuada com solução de KCl 1 mol L^{-1} . O K trocável foi extraído com solução de Mehlich 1. Os teores de Ca e o Mg trocáveis foram determinados por titulação com EDTA e o teor de K trocável por fotometria de chama (PAVAN et al., 1992).

3.4.4.4. Determinação de P: O P disponível no solo foi determinado por meio de extração com resina trocadora de ânions (RAIJ et al., 1986), seguida de leitura em colorímetro.

3.4.4.5. Determinação de Cu, Fe, Zn e Mn: Os teores de Cu, Fe, Zn e Mn no solo foram determinados por meio de extração com as soluções de DTPA-TEA (ácido dietilenotriaminopentaacético $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ + trietanolamina $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ + CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$) a pH 7,3 (LINDSAY & NORVELL, 1978), seguida de leitura em espectrofotômetro de absorção atômica.

3.4.5. Índice de eficiência agronômica (IEA)

O IEA foi calculado com base no incremento de produtividade de soja obtido com as fontes fosfatadas, com ou sem antecipação, em relação ao incremento de produtividade de soja obtido com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja, considerando a mesma dose de P total aplicada, por meio da seguinte equação descrita em Goedert et al. (1986b):

$$IEA = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_1} \right) \times 100$$

Y1 = Produtividade obtida sem aplicação de P;

Y2 = Produtividade obtida com a fonte de P testada, com ou sem antecipação;

Y3 = Produtividade obtida com a fonte de referência de P (ST na soja).

3.4.6. Retorno econômico

O cálculo de retorno econômico com a utilização das fontes fosfatadas foi realizado com base nos incrementos obtidos na produtividade de soja e no custo dos fertilizantes fosfatados durante os quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja. Foram considerados os preços médios dos últimos cinco anos por tonelada dos fertilizantes (TM, FR e ST) e da soja (DERAL, 2015; INDEX MUNDI, 2015).

3.4.7. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises de variância, de acordo com o delineamento de blocos completos ao acaso. A comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada pelo teste de Tukey a $p = 0,05$. As análises estatísticas foram executadas por meio do programa de computador SISVAR, conforme método descrito por Ferreira (2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Alterações químicas do solo com os tratamentos de fósforo

Os tratamentos de adubação fosfatada não influenciaram o pH do solo nas camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm, em 2010 e 2011 (Tabelas 3 e 4). Entretanto, na camada de 5–10 cm, a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionou pH do solo maior do que o tratamento com ST no sulco de semeadura da aveia em 2012 (Tabela 5) e do que o tratamento com ST no sulco de semeadura da soja em 2013 (Tabela 6). De forma semelhante, na camada de 10–20 cm, a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionou pH do solo maior do que o tratamento com ST no sulco de semeadura da aveia ou da soja e do que o tratamento controle, sem aplicação de P, em 2013 (Tabela 6). O fato de esse efeito ter sido observado somente com a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja, e não no sulco de semeadura da aveia, pode estar relacionado com a quantidade proporcionalmente maior do fertilizante aplicado nas linhas de semeadura da soja em função do maior espaçamento entre as linhas. O aumento no pH do solo com a aplicação de TM é explicado pela composição desse fertilizante, considerando que o silicato de magnésio presente no TM possui capacidade de amenizar a acidez do solo. Resultados semelhantes foram observados por Morelli et al. (1992), os quais constataram aumento no pH em água na superfície do solo com a aplicação de TM, passando de 5,0 no tratamento controle para 6,1 com a maior dose de P aplicada. Em vários outros estudos também se observou aumento no pH do solo após a aplicação de TM (BRAGA & AMARAL, 1971; GOEDERT & LOBATO, 1984; MOREIRA et al., 2002).

Os teores de Mg trocável e de C-orgânico, nas diferentes camadas de solo, não foram influenciados de forma significativa pelos tratamentos de adubação fosfatada nos quatro anos de avaliação (Tabelas 3, 4, 5 e 6).

Tabela 3 - Alterações no pH em CaCl_2 e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2010, de acordo com tratamentos de fósforo.

Tratamento	pH (CaCl_2)	Ca trocável	Mg trocável	K trocável	P resina	C orgânico	Cu DTPA	Zn DTPA	Fe DTPA	Mn DTPA
		----- mmol _c dm ⁻³ -----			mg dm ⁻³	g dm ⁻³		----- mg dm ⁻³ -----		
0-5 cm										
Controle	5,5	18,0	13,7	1,1b	4,1	12,2	0,56	0,26	23,28	2,91
FR - Aveia	5,5	17,7	14,3	1,9a	4,4	12,4	0,56	0,33	24,21	2,99
TM - Aveia	5,4	17,0	12,0	1,4ab	5,0	12,3	0,61	0,34	23,22	3,56
ST - Aveia	5,4	14,5	12,3	1,6ab	4,8	13,0	0,57	0,29	27,85	3,00
FR - Soja	5,6	18,0	12,3	1,2b	6,9	11,4	0,61	0,30	28,08	3,43
TM - Soja	5,4	17,7	13,3	1,4ab	4,0	12,4	0,57	0,33	26,97	2,84
ST - Soja	5,5	17,0	13,3	1,3ab	4,5	11,7	0,58	0,27	25,69	2,85
DMS	0,5	5,4	5,4	0,6	5,0	2,6	0,05	0,16	11,33	1,07
CV (%)	2,9	11,0	14,5	15,1	36,1	7,9	3,0	18,9	15,5	12,2
5-10 cm										
Controle	5,1	15,0	13,7	1,2	3,2b	12,4	0,63	0,22	28,87	2,62
FR - Aveia	5,5	15,7	14,7	1,3	4,5ab	11,0	0,65	0,30	28,22	2,77
TM - Aveia	5,3	16,7	12,7	1,1	4,3ab	12,3	0,62	0,20	26,68	2,74
ST - Aveia	5,0	18,0	11,7	1,2	3,7b	12,2	0,63	0,17	26,07	2,10
FR - Soja	5,1	17,3	11,7	1,4	8,4a	11,8	0,64	0,20	31,51	2,70
TM - Soja	5,5	16,3	12,7	1,3	3,9ab	11,5	0,61	0,26	32,68	3,07
ST - Soja	5,2	15,7	14,3	1,1	3,1b	11,3	0,67	0,20	28,16	2,51
DMS	0,8	5,1	5,3	0,7	4,7	3,0	0,09	0,21	16,10	1,31
CV (%)	5,1	10,9	14,1	20,5	36,8	8,9	4,8	32,4	19,5	17,4
10-20 cm										
Controle	4,7	10,7	10,3	0,9	4,3	11,6	0,71	0,21	40,07	2,93ab
FR - Aveia	4,8	12,7	11,0	1,1	4,8	11,3	0,72	0,21	36,27	2,40abc
TM - Aveia	5,2	12,7	10,7	1,1	5,0	11,6	0,71	0,14	32,08	2,21bc
ST - Aveia	4,9	16,0	9,3	0,9	4,5	11,8	0,69	0,17	28,24	2,00c
FR - Soja	4,5	7,3	9,3	1,4	5,9	11,5	0,73	0,21	37,11	3,10a
TM - Soja	4,8	10,3	10,0	0,7	5,0	10,8	0,71	0,17	41,26	2,31abc
ST - Soja	4,7	9,0	12,3	0,9	4,5	11,4	0,75	0,19	35,03	2,56abc
DMS	1,0	5,2	6,9	0,7	5,0	1,8	0,13	0,12	15,37	0,85
CV (%)	7,3	16,2	23,1	25,4	35,7	5,6	6,2	22,5	15,0	11,8

TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja em 2009 e 2010. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Tabela 4 - Alterações no pH em CaCl_2 e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2011, de acordo com tratamentos de fósforo.

Tratamento	pH (CaCl_2)	Ca trocável	Mg trocável	K trocável	P resina	C orgânico	Cu DTPA	Zn DTPA	Fe DTPA	Mn DTPA
		----- mmol _c dm ⁻³ -----			mg dm ⁻³	g dm ⁻³		----- mg dm ⁻³ -----		
0-5 cm										
Controle	5,4	17,7	13,3	3,1	3,6	12,6	0,49	0,26	28,43	3,20
FR - Aveia	5,3	19,0	10,0	3,3	30,4	12,6	0,45	0,35	26,58	3,54
TM - Aveia	5,4	19,0	11,7	3,8	22,9	12,7	0,49	0,26	31,81	3,44
ST - Aveia	5,3	17,3	10,0	3,8	24,2	13,4	0,44	0,26	25,49	3,48
FR - Soja	5,3	18,3	12,0	4,1	17,6	12,9	0,52	0,30	22,09	3,74
TM - Soja	5,5	19,0	10,3	3,6	37,3	11,7	0,45	0,43	20,17	3,05
ST - Soja	5,4	17,7	9,7	4,2	34,6	12,1	0,49	0,29	21,93	3,08
DMS	0,4	7,1	7,6	1,2	37,0	2,4	0,16	0,23	18,87	1,15
CV (%)	2,7	13,6	24,2	10,9	53,1	6,6	12,0	26,5	26,2	11,9
5-10 cm										
Controle	5,5	16,0	11,3	2,6	3,1b	12,2	0,48	0,18	24,60	3,75
FR - Aveia	5,5	17,7	11,7	2,5	4,9b	11,3	0,49	0,24	18,35	3,15
TM - Aveia	5,4	17,7	10,0	2,7	4,7b	11,1	0,49	0,14	27,87	2,58
ST - Aveia	5,3	16,0	12,0	2,3	5,5b	11,9	0,44	0,14	32,76	2,41
FR - Soja	5,2	15,7	8,0	2,6	29,6a	12,1	0,52	0,18	23,19	2,78
TM - Soja	5,6	14,0	12,7	2,4	36,3a	10,8	0,49	0,25	22,05	3,35
ST - Soja	5,4	16,0	9,0	2,3	36,2a	11,5	0,50	0,28	28,69	2,75
DMS	0,6	6,5	7,1	1,1	24,0	2,1	0,11	0,21	25,47	1,69
CV (%)	4,0	14,1	23,2	15,4	48,8	6,5	7,8	36,2	35,1	19,9
10-20 cm										
Controle	5,0	10,3	8,3	1,5	3,1	10,3	0,53	0,15	33,29	2,46
FR - Aveia	5,0	11,3	8,7	1,6	3,1	10,4	0,53	0,13	21,68	2,01
TM - Aveia	4,9	10,7	8,0	1,5	3,0	10,5	0,55	0,09	29,18	2,01
ST - Aveia	4,9	12,3	6,3	1,4	2,7	10,2	0,50	0,10	27,50	1,61
FR - Soja	4,8	9,7	8,7	1,7	4,0	10,4	0,58	0,15	25,04	2,45
TM - Soja	5,2	10,3	6,0	1,6	4,5	10,0	0,45	0,11	23,65	1,91
ST - Soja	5,0	11,7	8,7	1,4	5,7	9,9	0,51	0,13	21,93	2,34
DMS	0,9	4,7	7,4	0,7	4,4	1,1	0,13	0,07	18,19	1,17
CV (%)	6,5	15,0	32,9	16,4	41,0	3,9	8,9	18,7	24,4	19,3

TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja em 2010 e 2011. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Tabela 5 - Alterações no pH em CaCl_2 e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2012, de acordo com tratamentos de fósforo.

Tratamento	pH (CaCl_2)	Ca trocável	Mg trocável	K trocável	P resina	C orgânico	Cu DTPA	Zn DTPA	Fe DTPA	Mn DTPA
		----- mmol _c dm ⁻³ -----			mg dm ⁻³	g dm ⁻³		----- mg dm ⁻³ -----		
0-5 cm										
Controle	5,1	15,7	8,0	3,1b	5,3b	12,6	0,49	0,97	26,00	2,90
FR - Aveia	5,2	18,0	8,0	3,6ab	11,3ab	14,1	0,45	0,67	27,11	3,20
TM - Aveia	5,2	17,0	8,3	4,4a	10,3ab	14,0	0,49	1,17	24,00	3,80
ST - Aveia	5,0	15,7	7,3	4,3a	17,2a	13,0	0,44	0,73	27,73	3,83
FR - Soja	5,1	18,0	7,7	4,0ab	5,2b	12,3	0,52	0,90	26,88	3,80
TM - Soja	5,3	18,7	8,3	4,0ab	10,6ab	14,1	0,46	0,67	22,24	3,83
ST - Soja	5,1	16,7	8,0	4,2ab	12,6ab	13,7	0,49	0,70	27,48	3,83
DMS	0,4	4,5	5,1	1,2	9,8	2,2	0,16	1,40	9,42	1,44
CV (%)	2,8	9,1	22,7	10,6	33,0	5,7	12,0	59,1	12,7	14,3
5-10 cm										
Controle	5,2ab	12,7b	7,0	3,0	5,2b	11,1	0,53	0,67	27,86	2,13b
FR - Aveia	5,2ab	15,0ab	8,0	3,1	11,7ab	12,6	0,52	0,60	28,18	2,70ab
TM - Aveia	5,2ab	13,7b	9,0	3,3	10,0ab	11,6	0,56	0,60	26,98	2,30b
ST - Aveia	5,0b	15,0ab	6,0	3,5	8,2ab	11,3	0,56	0,50	30,39	2,20b
FR - Soja	5,2ab	15,3ab	8,0	3,3	7,0ab	12,1	0,52	0,43	28,87	2,87ab
TM - Soja	5,5a	18,3a	9,7	3,3	13,0ab	11,8	0,48	0,53	22,80	3,57a
ST - Soja	5,1ab	14,0b	6,3	3,5	15,4a	11,5	0,49	0,47	28,28	2,57ab
DMS	0,4	3,9	5,0	1,2	8,7	2,4	0,18	0,93	12,00	1,02
CV (%)	2,8	9,1	22,8	12,4	30,2	7,1	11,9	59,9	15,2	13,6
10-20 cm										
Controle	4,9b	11,0	6,0	2,2	2,9	11,1	0,64	0,73	32,62	1,83
FR - Aveia	5,0ab	9,7	6,7	2,0	4,5	10,9	0,54	0,77	29,88	2,03
TM - Aveia	5,2ab	10,7	7,0	1,8	3,8	11,0	0,58	0,53	29,68	1,90
ST - Aveia	4,7b	10,3	5,0	2,3	3,1	10,5	0,61	0,50	27,78	1,83
FR - Soja	5,0ab	10,7	6,7	2,4	6,7	10,9	0,55	0,60	29,58	2,13
TM - Soja	5,6a	15,0	9,4	2,5	6,8	10,9	0,51	0,53	25,15	2,17
ST - Soja	4,9b	11,3	5,3	2,4	7,6	11,5	0,61	0,53	27,31	2,40
DMS	0,6	7,3	5,4	1,0	7,6	2,6	0,22	0,70	12,46	0,92
CV (%)	4,3	22,8	28,7	16,0	52,1	8,2	13,2	41,0	15,1	15,8

TM: termofosfato magnésiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja em 2011 e 2012. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Tabela 6 - Alterações no pH em CaCl_2 e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, P-resina e C-orgânico, e de Cu, Zn, Fe e Mn (DTPA), em diferentes profundidades do solo em 2013, de acordo com tratamentos de fósforo.

Tratamento	pH (CaCl_2)	Ca trocável	Mg trocável	K trocável	P resina	C orgânico	Cu DTPA	Zn DTPA	Fe DTPA	Mn DTPA
		----- mmolc dm^{-3} -----		-----	mg dm^{-3}	g dm^{-3}	-----	mg dm^{-3} -----		
0-5 cm										
Controle	4,6	14,3	4,7	2,6b	5,6c	16,7	0,83	0,40	43,57ab	5,57
FR - Aveia	4,7	18,3	6,7	3,0ab	19,5bc	18,0	0,73	0,47	45,87ab	4,73
TM - Aveia	4,8	17,7	4,7	3,4a	28,8bc	17,4	0,73	0,63	42,83ab	6,83
ST - Aveia	4,6	18,7	6,3	2,9ab	18,6bc	19,3	0,80	0,47	49,83ab	6,67
FR - Soja	4,7	16,7	5,7	3,0ab	67,6a	17,1	0,83	0,57	43,93ab	5,57
TM - Soja	4,7	16,3	7,0	2,8ab	42,0ab	18,8	0,67	0,57	40,70b	6,43
ST - Soja	4,5	13,3	5,7	2,7b	32,7bc	18,7	0,77	0,43	55,47a	6,93
DMS	0,4	6,7	3,8	0,7	30,1	3,4	0,29	0,36	14,26	3,09
CV (%)	2,9	14,2	23,1	8,1	34,3	6,5	13,0	25,2	10,8	17,7
5-10 cm										
Controle	4,9ab	15,3	6,3	2,7	5,0c	16,0	0,73	0,17b	37,97ab	3,60
FR - Aveia	4,8ab	15,7	5,7	2,4	7,7c	15,1	0,67	0,27ab	40,20ab	3,93
TM - Aveia	5,0ab	16,0	6,0	2,7	9,5bc	15,9	0,87	0,27ab	33,70b	3,90
ST - Aveia	4,8ab	17,0	6,0	2,5	20,0bc	15,8	0,83	0,23ab	43,27ab	4,90
FR - Soja	4,9ab	17,3	6,7	2,5	50,5a	15,5	0,73	0,23ab	45,03ab	4,67
TM - Soja	5,1a	18,3	7,5	2,4	50,7a	16,7	0,73	0,37a	38,93ab	4,33
ST - Soja	4,7b	14,3	5,0	2,3	37,8ab	15,5	0,93	0,30ab	48,23a	4,83
DMS	0,4	5,4	4,1	0,8	29,7	3,1	0,31	0,17	13,30	1,69
CV (%)	2,7	11,6	23,1	11,0	40,1	6,9	13,9	22,6	11,3	13,7
10-20 cm										
Controle	4,8	11,0	5,3	2,3	7,7	14,6	0,77	0,17	38,90	2,63
FR - Aveia	4,7	14,0	5,3	2,1	8,5	14,6	0,73	0,20	40,67	2,83
TM - Aveia	4,9	10,3	4,7	2,3	2,9	14,3	0,70	0,10	36,27	2,67
ST - Aveia	4,7	13,0	4,0	2,1	2,6	15,8	0,87	0,20	41,57	2,77
FR - Soja	4,8	12,0	5,0	2,3	2,6	14,5	0,90	0,23	41,67	3,00
TM - Soja	5,0	14,0	6,0	2,2	3,3	15,1	0,77	0,20	36,10	2,33
ST - Soja	4,8	12,0	6,0	1,9	4,1	14,8	0,90	0,17	43,30	2,97
DMS	0,5	4,5	4,6	0,5	6,1	2,4	0,35	0,18	8,36	1,65
CV (%)	3,9	12,9	31,3	8,5	47,2	5,6	15,0	34,8	7,4	21,0

TM: termofosfato magnésiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja em 2012 e 2013. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Nas amostragens realizadas em 2010, 2011 e 2013, não houve alterações significativas no teor de Ca trocável no solo em função dos tratamentos de adubação fosfatada. Porém, em 2012, a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionou teor de Ca trocável mais elevado na camada de 5–10 cm em comparação com o tratamento controle e com as aplicações de ST no sulco de semeadura da soja e de TM no sulco de semeadura da aveia (Tabela 4). A presença de Ca no TM pode resultar em aumento no nível de Ca trocável no solo (MORELLI et al., 1992). O aumento no teor de Ca trocável com a aplicação de TM somente no sulco de semeadura da soja pode estar relacionado com a quantidade proporcionalmente maior do fertilizante aplicado nas linhas da cultura da soja, de forma semelhante à observada para o pH do solo.

O teor de K trocável, nas diferentes camadas de solo, não foi significativamente alterado pelos tratamentos de adubação fosfatada em 2011 (Tabela 4). Porém, nos demais anos de avaliação (2010, 2012 e 2013), o teor de K trocável no solo apresentou alterações significativas na camada superficial do solo (0–5 cm) (Tabela 3, 5 e 6). Em 2010, a aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior teor de K trocável do que os tratamentos sem P e com FR no sulco de semeadura da soja. Em 2012, a aplicação de ST e de TM no sulco de semeadura da aveia proporcionaram teores de K trocável mais elevados em relação ao tratamento sem P. Em 2013, o teor de K trocável foi maior com a aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de ST no sulco de semeadura da soja. Como a aveia preta foi mantida sobre a superfície do solo e a liberação de K dos resíduos de aveia ocorre de forma relativamente rápida, os aumentos nos teores de K trocável na camada superficial do solo com a adição de P certamente foram decorrentes dos ganhos de matéria seca de aveia ocasionados pela adubação fosfatada. A liberação de K do tecido de plantas de aveia preta foi estudada por Rosolem et al. (2003) através da lixiviação de K da palha em função da quantidade de chuva recebida após o manejo. Os autores verificaram

que a aveia preta possui alta capacidade de ciclagem de K, sendo este liberado com maior velocidade e quantidade logo após o manejo das plantas, permitindo desta forma a nutrição da próxima cultura.

O teor de P-resina foi alterado de forma significativa pelos tratamentos de adubação fosfatada apenas na camada de 5–10 cm, em 2010 e 2011 (Tabelas 3 e 4) e nas camadas de 0–5 e 5–10 cm, em 2012 e 2013 (Tabelas 5 e 6). Em 2010, a aplicação de FR no sulco de semeadura da soja proporcionou maior teor de P-resina em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de fosfato totalmente acidulado (ST) no sulco de semeadura da aveia ou da soja. Em 2011, o teor de P-resina foi significativamente maior com a adubação fosfatada no sulco de semeadura da soja do que o tratamento sem P e com adubação no sulco de semeadura da aveia, independentemente da fonte de P utilizada (FR, TM e ST). Em 2012, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior teor de P-resina em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da soja, na camada de 0–5 cm. Na camada de 5–10 cm houve maior teor de P-resina apenas com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja em relação ao tratamento sem P. No último ano de avaliação (2013), o teor de P-resina, na camada de 0–5 cm, foi maior com a aplicação de FR no sulco de semeadura da soja em relação às fontes de P (FR, TM e ST) aplicadas no sulco de semeadura da aveia, à aplicação de ST no sulco de semeadura da soja e ao tratamento sem P. De modo semelhante, na camada de 5–10 cm, as aplicações de FR e TM no sulco de semeadura da soja proporcionaram maior teor de P-resina em relação às fontes de P aplicadas no sulco de semeadura da aveia e ao tratamento sem P (Tabela 6).

A extração de P do solo por resina parece não ter estimado adequadamente o teor de P disponível no solo decorrente do emprego das fontes fosfatadas. Isso porque o teor de P nas folhas de soja não apresentou correlação muito estreita com o teor de P no solo na camada de 0–10 cm ($r = 0,57$), nos quatro anos da sucessão aveia preta–soja. Problemas relacionados com

a aplicação de fosfato natural na determinação de P disponível pelo método da resina têm sido relatados em razão da intensa moagem do solo, causando desagregação e quebra de partículas, e comprometimento dos resultados analíticos (NOVAIS & SMYTH, 1999). A utilização de extratores ácidos, como a solução de Mehlich 1, também não permitiria estimar de forma adequada o teor de P disponível no solo porque os extratores ácidos podem extrair formas de P no solo ligadas principalmente ao Ca que não se encontram prontamente disponíveis às plantas, superestimando o teor de P em solos previamente adubados com fosfatos naturais (RAIJ, 2011; MOREIRA & MALAVOLTA, 2001; GATIBONI et al., 2003).

Os teores de micronutrientes catiônicos (Cu, Fe, Zn e Mn) nas diferentes camadas de solo, extraídos com DTPA-TEA a pH 7,3, apresentaram comportamentos diferenciados em relação aos tratamentos de adubação fosfatada. Em 2010 (Tabela 3) e 2012 (Tabela 5), apenas o teor de Mn foi influenciado pelos tratamentos com P. Em 2010, a aplicação de FR no sulco de semeadura da soja proporcionou maior teor de Mn na camada de 10–20 cm em relação aos tratamentos que receberam aplicação de TM e ST no sulco de semeadura da aveia. Em 2012, o teor de Mn foi maior na camada de 5–10 cm com a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de TM e ST no sulco de semeadura da aveia. Em 2013, os tratamentos de adubação fosfatada influenciaram de forma significativa os teores de Zn, na camada de 5–10 cm, e de Fe, nas camadas 0–5 e 5–10 cm (Tabela 6). A aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionou maior teor de Zn em relação ao tratamento sem P. Destaca-se que o TM apresenta em sua composição concentração mais alta de Mn do que o ST e o FR, e concentração mais elevada de Zn em relação ao ST (CAMARGO et al., 2000). O teor de Fe no solo foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja em relação ao emprego de TM no sulco da soja, na camada de 0–5 cm, e em relação à aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia, na camada de 5–10 cm. Independentemente das alterações ocorridas nos teores de micronutrientes catiônicos no solo com os tratamentos

de adubação fosfatada, as concentrações de Cu, Fe e Mn se mantiveram em níveis suficientes e, aparentemente, o teor de Zn foi o mais limitante (RAIJ et al., 1996).

4.2. Produção de matéria seca de aveia preta

No primeiro cultivo em 2009, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia preta proporcionou produção de matéria seca estatisticamente superior aos demais tratamentos (Figura 2A). O tratamento com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia promoveu maior produção de matéria seca quando comparado ao tratamento controle, sem adição de P. Cabe destacar que os fosfatos menos solúveis em água apresentam menor eficiência do que os totalmente acidulados, em especial após avaliações de curto prazo, e em culturas que possuem alta demanda de P num curto período de tempo (GOEDERT & LOBATO, 1984; GOEDERT et al., 1986a; SOUSA & LOBATO, 2003). Incrementos na produção de matéria seca de aveia preta em função da aplicação de P em sistema plantio direto também foram observados por Prado et al. (2006). A precipitação pluvial ocorrida durante os meses de desenvolvimento da aveia preta no ano de 2009 foi superior à média mensal histórica registrada para a região, o que contribuiu para o adequado desenvolvimento da cultura (Figura 1).

No segundo cultivo em 2010, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia preta também proporcionou maior produção de matéria seca da parte aérea em relação aos demais tratamentos (Figura 2B). Cabe destacar que a precipitação pluvial ocorrida nos meses de desenvolvimento da cultura de aveia preta em 2010 foi menor do que a média mensal histórica da região (Figura 1). A mais baixa precipitação pluvial pode ter comprometido a produção de matéria seca de aveia, principalmente nos tratamentos que receberam adubação fosfatada apenas na cultura da soja. Entretanto a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja no ano anterior promoveu maior acúmulo de matéria seca de aveia preta quando comparado com o tratamento sem P.

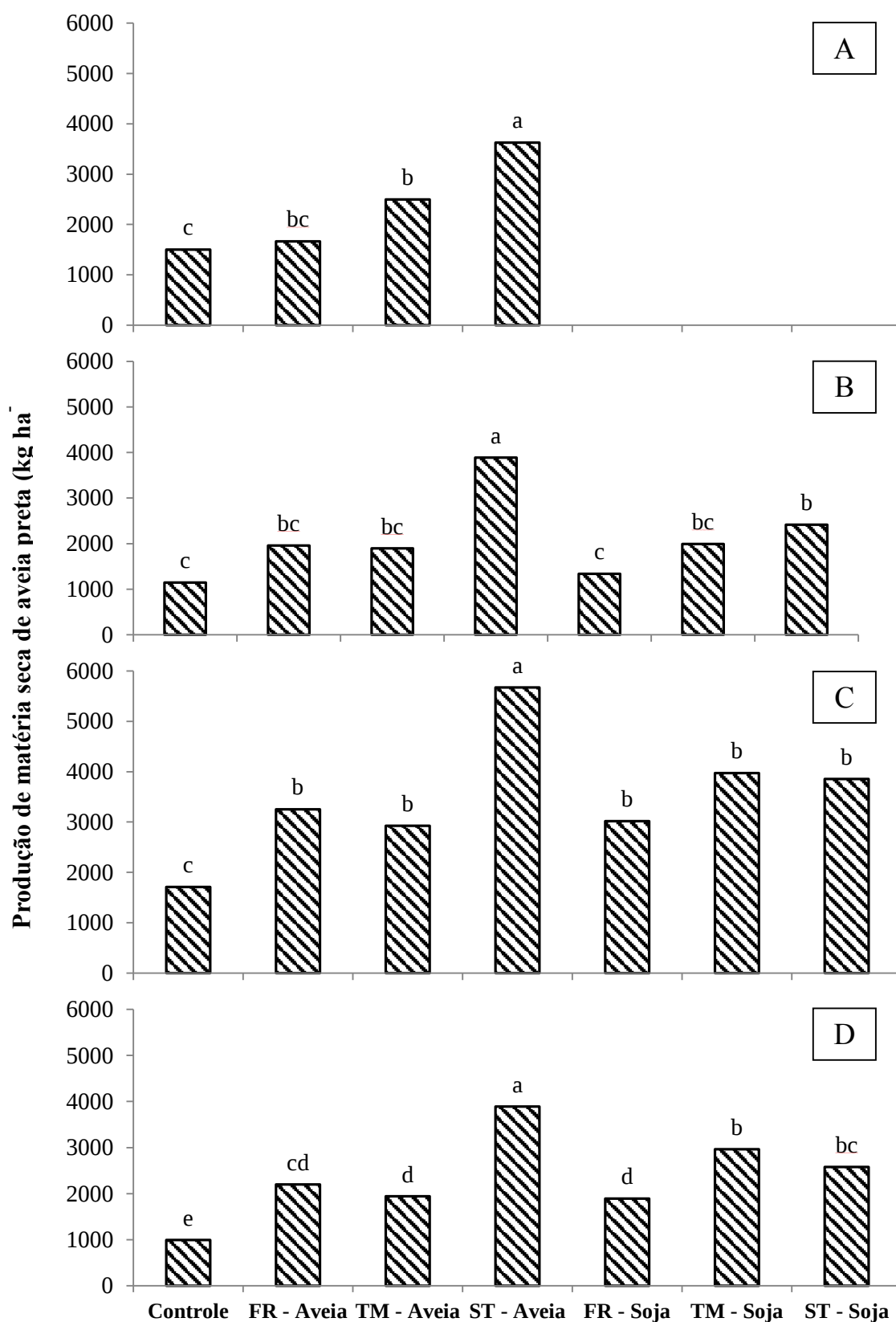


Figura 2 - Produção de matéria seca de aveia preta em 2009 (A), 2010 (B), 2011 (C) e 2012 (D) de acordo com as fontes de P com termofosfato magnesiano (TM), fosfato natural reativo (FR) e superfosfato triplo (ST), na semeadura da aveia ou da soja. Médias seguidas de letras iguais para cada tratamento de adubação fosfatada não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

As plantas de aveia preta possuem um sistema radicular bastante agressivo, o que proporciona maior ciclagem de nutrientes pela cultura e maior aproveitamento do P aplicado na cultura anterior (FLOSS, 2000; SÁ, 1997).

Mesmo considerando perdas de P por processos de adsorção e fixação, a capacidade da aveia preta em recuperar parte deste nutriente aplicado em culturas anteriores comprova a sua rusticidade e menor exigência em P (DERPSCH & CALEGARI, 1992).

No terceiro cultivo em 2011, foram alcançados os maiores tetos de produção de matéria seca de aveia preta, considerando todos os anos de estudo (Figura 2C). Novamente, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior produção de matéria seca em relação aos demais tratamentos. A produção de matéria seca de aveia preta foi semelhante com a aplicação de TM e FR no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja e a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja, porém superior ao tratamento sem P. A alta precipitação pluvial ocorrida durante o início de desenvolvimento da cultura de aveia preta em 2011 (Figura 1), principalmente nos meses de julho e agosto, certamente contribuiu para alavancar as maiores médias de produção de matéria seca da cultura.

No quarto e último cultivo em 2012, do mesmo modo que nos cultivos anteriores, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou a maior produção de matéria seca de aveia preta (Figura 2D). Entretanto, a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionou produção de matéria seca superior à aplicação de FR no sulco de semeadura da soja e de TM no sulco de semeadura da aveia. Diferentemente do ano anterior, a cultura de aveia preta em 2012 passou por um período de falta de chuvas durante seu desenvolvimento inicial (Figura 1), principalmente no mês de agosto, o que contribuiu para a redução do teto de produção de matéria seca de aveia quando comparado com o ano anterior.

A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia preta promoveu maior desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, maior produção de matéria seca da parte

aérea, proporcionando adequada cobertura do solo e consolidando uma das bases do sistema plantio direto (MUZILLI, 1981). A maior produção de palhada de aveia preta pode resultar em acúmulo de matéria orgânica, melhorando a conservação do solo, a manutenção de umidade e a ciclagem de nutrientes (SILVA & ROSOLEM, 2001). Também são benefícios proporcionados pela cobertura de aveia preta: (i) o controle de plantas daninhas; (ii) a redução da erosão e do escoamento superficial; e (iii) o aumento da infiltração de água (BAYER & AMARAL, 2003; BORKERT et al., 2003; SANTI et al., 2003). Destaca-se ainda que os resíduos de aveia preta também podem amenizar a acidez do solo e os efeitos nocivos do Al (MIYAZAWA et al., 1993; FRANCHINI et. al., 1999).

4.3. Extração de nutrientes pela aveia preta

A extração média de nutrientes pela parte aérea da aveia preta cultivada em 2009, 2010, 2011 e 2012, de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada, é mostrada na tabela 7. A extração de boa parte dos nutrientes pela parte aérea da aveia preta foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia preta, principalmente por influência da maior produção de matéria seca (Figura 2).

No primeiro cultivo de aveia preta em 2009, as extrações de N, P, S, Fe e Mn não foram alterados pelos tratamentos (Tabela 7). A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia aumentou as extrações de K, Ca e Zn em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia. A extração de Mg foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia do que com qualquer outro tratamento. Entretanto, a extração de Cu pela aveia preta foi maior quando o FR foi aplicado no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia.

Tabela 7 - Extração de nutrientes pela parte aérea da aveia preta cultivada em 2009, 2010, 2011 e 2012 de acordo com tratamentos de adubação fosfatada.

Com tratamentos de adubação fosfatada.										
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn
	----- kg ha ⁻¹ -----					----- g ha ⁻¹ -----				
Aveia preta 2009										
Controle	32,4	2,3	40,9b	2,6b	2,7b	3,1	28,4b	283,9	42,8b	104,2
FR - Aveia	34,3	2,4	44,6b	2,9b	2,8b	3,2	63,1a	485,9	45,2b	124,6
TM - Aveia	44,2	3,7	55,1ab	4,1ab	3,7b	3,3	33,4b	534,0	61,9ab	182,4
ST - Aveia	47,6	4,8	87,6a	7,3a	6,7a	3,2	43,9ab	677,0	77,3a	228,5
DMS	26,6	2,6	34,7	3,7	2,4	2,2	25,59	375,26	31,46	172,29
CV (%)	23,8	28,0	21,5	30,5	21,7	24,6	21,5	26,8	19,6	38,1
Aveia preta 2010										
Controle	24,2b	2,3c	26,7c	1,5b	1,3b	0,9b	2,7b	132,3b	12,4b	45,1b
FR - Aveia	38,6ab	3,9c	39,0bc	2,4b	2,2b	1,1b	5,2ab	89,0b	22,2ab	87,5ab
TM - Aveia	34,7ab	4,1c	41,6bc	2,2b	1,7b	0,9b	5,1ab	148,8b	17,6ab	72,0ab
ST - Aveia	56,9a	13,9a	81,9a	6,2a	4,6a	2,1a	9,2a	191,9b	35,5a	143,6a
FR - Soja	26,7b	2,4c	25,9c	1,7b	1,5b	1,0b	3,1b	89,6b	13,1b	76,6ab
TM - Soja	38,8b	3,4c	43,1bc	3,6ab	2,4b	0,8b	3,3b	127,6b	12,8b	69,1ab
ST - Soja	37,3ab	6,8b	52,3b	3,1b	2,5b	1,3ab	6,5ab	437,4a	26,0ab	99,7ab
DMS	19,7	2,7	21,1	2,7	1,7	29,9	4,19	117,89	20,44	83,75
CV (%)	18,7	18,1	16,6	32,1	25,4	1,0	29,4	23,7	35,8	34,5
Aveia preta 2011										
Controle	25,8d	2,5b	41,7c	3,4c	1,6c	1,7b	6,4d	259,4	30,2c	103,1b
FR - Aveia	43,2bc	6,4b	74,3bc	7,7bc	3,5bc	1,8b	10,0bcd	206,5	41,8bc	170,6b
TM - Aveia	40,4c	5,2b	68,8bc	7,0bc	3,3bc	2,2b	9,2cd	162,9	35,5bc	189,7ab
ST - Aveia	76,8a	22,2a	143,2a	15,6a	9,4a	4,8a	20,6a	319,5	58,8a	325,1a
FR - Soja	40,6c	4,8b	70,0bc	5,5bc	2,9bc	1,8b	11,3bc	165,1	40,4bc	205,9ab
TM - Soja	52,5b	7,5b	94,0b	8,5b	4,7b	2,5b	13,3b	258,1	46,0b	200,3ab
ST - Soja	47,2bc	7,0b	89,7b	8,4b	4,0bc	2,5b	11,4bc	200,8	47,4ab	242,8ab
DMS	11,4	8,8	34,2	4,6	2,4	1,6	3,69	220,29	12,80	150,96
CV (%)	8,5	38,6	14,4	19,9	20,0	22,6	11,0	34,3	10,4	25,7
Aveia preta 2012										
Controle	23,9d	2,4c	26,1d	1,7d	1,3d	2,6c	5,3c	169,0b	28,0d	143,6c
FR - Aveia	51,6bc	8,3b	59,4c	3,8cd	2,9c	4,5bc	11,8b	193,7ab	57,5bc	281,8bc
TM - Aveia	39,5c	7,0b	51,6c	3,6cd	2,4c	4,2bc	10,9b	175,4b	49,1c	261,2bc
ST - Aveia	77,0a	17,6a	111,5a	9,1a	5,5a	7,1a	18,7a	668,8a	79,6a	448,9a
FR - Soja	42,3c	6,1b	50,3c	3,3cd	2,3c	3,5bc	9,2bc	162,5b	43,2cd	236,5bc
TM - Soja	63,9ab	9,2b	85,3b	6,3b	4,1b	5,4ab	13,7ab	353,2ab	67,2ab	316,6ab
ST - Soja	57,1b	9,1b	63,3c	5,5bc	3,8b	4,3bc	11,2b	233,0ab	54,7bc	274,2bc
DMS	14,6	3,3	21,1	2,2	1,0	2,1	5,22	486,99	15,97	147,67
CV (%)	10,0	13,7	11,5	16,0	10,4	16,1	15,8	61,0	10,3	18,4

Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

A maior extração de nutrientes pelas plantas possivelmente está associada à formação de um sistema radicular mais longo e com raízes mais finas, as quais possuem maior eficiência na absorção de nutrientes do solo, promovida pela adubação fosfatada (VILELA E ANGHINONI, 1984). A grande capacidade da aveia preta em reciclar nutrientes está relacionada ao seu alto teor de nitrogênio total (e consequentemente maior relação C:N) e a maior capacidade de absorção de seu sistema radicular (CALEGARI et al.,1993).

No segundo cultivo de aveia preta em 2010, aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior extração de P, K e Mg do que os tratamentos sem P e com TM e FR aplicados no sulco de semeadura da aveia ou da soja (Tabela 7). A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia preta proporcionou maior extração de N pelas plantas de aveia em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da soja. A extração de Ca foi maior quando o ST foi aplicado no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia ou da soja, de TM no sulco de semeadura da aveia e de ST no sulco de semeadura da soja. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia também proporcionou maior extração de S em relação à aplicação de FR e TM, com ou sem antecipação, e ao tratamento sem P. A extração de Cu foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P e àqueles que receberam aplicação de FR e TM no sulco de semeadura da soja. A extração de Fe pelas plantas de aveia preta foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja em relação aos demais tratamentos. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia também promoveu maior extração de Zn em relação à aplicação de fontes menos solúveis (FR e TM) no sulco de semeadura da soja, e ao tratamento controle. A extração de Mn foi superior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação ao tratamento sem adição de P. Cabe destacar que o efeito residual do ST aplicado no sulco de semeadura da soja proporcionou extração de

todos os nutrientes igual ou superior às fontes fosfatadas menos solúveis (FR e TM) aplicadas no sulco de semeadura da aveia.

No terceiro cultivo de aveia preta em 2011, apenas a extração de Fe não foi influenciada pelos tratamentos de adubação fosfatada (Tabela 7). A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou maior extração de N, P, K, Ca, Mg, S e Cu pela parte aérea das plantas de aveia do que os demais tratamentos. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia também promoveu maior extração de Zn pelas plantas de aveia em relação às fontes menos solúveis (FR e TM), com ou sem antecipação, e ao tratamento sem P. A extração de Mn pela aveia foi superior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação à aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia e ao tratamento sem P.

No quarto e último cultivo de aveia preta em 2012, a extração de todos os nutrientes foi afetada pelos tratamentos de adubação fosfatada (Tabela 7). A extração de P, K, Ca e Mg pelas plantas de aveia foi maior quando o ST foi aplicado no sulco de semeadura da aveia em relação aos demais tratamentos. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia também promoveu maior extração de N, S, Cu, Zn e Mn pela aveia em relação aos tratamentos sem P e com ST no sulco de semeadura da soja, FR no sulco de semeadura da aveia ou da soja e TM no sulco de semeadura da aveia. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia aumentou a extração de Fe pelas plantas de aveia em relação aos tratamentos sem P e com FR no sulco de semeadura da soja e TM no sulco de semeadura da aveia.

Em um estudo envolvendo a antecipação total ou parcial da adubação da soja para o capim-pé-de-galinha, em um Latossolo Amarelo distrófico da região de Piracicaba (SP), Francisco et al. (2007) verificaram que a adubação fosfatada recomendada para a cultura da soja de forma antecipada para a semeadura do capim-pé-de-galinha não afetou o acúmulo de matéria seca e de nutrientes pelo capim-pé-de-galinha. Nesse mesmo estudo, o capim-pé-de-galinha extraiu do solo, em média, em ordem decrescente (kg ha^{-1}): $\text{K (109,5)} > \text{N (93,4)} > \text{Ca}$

(34,7) > Mg (15,75) > S (11,6) > P (7,7), tomando por base a produção média de matéria seca de 4815 kg ha⁻¹.

No presente trabalho, a aplicação de ST de forma antecipada extraiu, em média, durante os quatro cultivos de aveia, em ordem decrescente (kg ha⁻¹): K (106,1) > N (64,6) > P (14,6) > Ca (9,6) > Mg (6,6) > S (4,3), tomando por base a produção média de matéria seca de 4270 kg ha⁻¹. Os valores médios de extração encontrados no presente estudo corroboram com os obtidos por Borkert et al. (2003). Nesse estudo, considerando a média observada, a média estimada e o intervalo de confiança de 95% para cada nutriente (N, P, K, Ca e Mg), dentro de cada classe de produção de matéria seca de aveia preta, os autores verificaram que, para produção inferior a 5000 kg ha⁻¹ de matéria seca, a extração de cada nutriente, em ordem decrescente (kg ha⁻¹) foi: K (0 a 155) > N (37 a 90) > Ca (0 a 42) > Mg (0 a 20) > P (0 a 16).

4.4. Concentração de nutrientes nas folhas de soja

As concentrações de nutrientes no tecido foliar da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013, de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada, são mostrados na tabela 8.

No primeiro cultivo de soja, em 2009–2010, as concentrações de N, K, Ca, Mg, S e Cu nas folhas não foram alteradas de forma significativa pelos tratamentos de adubação fosfatada. A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja proporcionou maior concentração de P nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia preta. A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia reduziu o teor de Fe nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da soja.

Tabela 8 - Concentrações de nutrientes nas folhas da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013 de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----				
Soja 2009–2010										
Controle	48,9	1,5b	22,1	10,5	5,1	2,3	7,8	399,7a	62,0a	56,6b
FR - Aveia	46,4	2,0ab	24,2	10,3	5,2	2,1	7,5	275,0ab	72,7a	71,6ab
TM - Aveia	45,9	1,6b	22,0	10,8	5,1	2,4	7,8	215,3ab	59,0ab	60,6b
ST - Aveia	47,8	1,9ab	22,0	10,7	5,0	2,3	7,7	104,7b	35,1c	72,9ab
FR - Soja	48,1	2,2ab	23,8	9,8	5,5	2,6	8,3	400,3a	73,7a	103,8a
TM - Soja	47,3	2,1ab	22,1	10,7	5,4	2,0	8,2	189,7ab	52,7abc	79,9ab
ST - Soja	50,3	2,7a	23,8	10,6	6,0	1,8	9,0	164,3ab	39,4bc	105,5a
DMS	10,6	1,1	3,8	3,5	1,6	1,0	2,5	236,5	21,3	42,6
CV (%)	7,7	18,3	5,8	11,7	10,4	15,7	10,9	33,1	13,2	18,9
Soja 2010–2011										
Controle	18,7c	1,7b	10,3c	4,1b	2,6c	1,7a	1,8b	111,7	9,3	13,1c
FR - Aveia	34,8abc	3,3ab	21,0abc	7,3ab	5,2abc	1,3b	3,9ab	130,1	15,3	23,6abc
TM - Aveia	27,0abc	2,5b	15,1c	4,7b	3,3bc	0,9c	3,1ab	109,5	11,4	18,5c
ST - Aveia	48,6ab	6,3a	32,3ab	11,5a	8,2a	1,0c	5,7ab	140,6	16,4	41,2ab
FR - Soja	25,3bc	2,6b	17,1bc	6,2ab	4,5abc	1,0bc	3,0ab	112,4	11,8	22,0bc
TM - Soja	36,9abc	3,9ab	21,8abc	8,7ab	5,6abc	0,9c	4,2ab	126,1	13,6	29,4abc
ST - Soja	55,0a	5,9a	32,5a	9,7ab	7,7ab	1,1bc	6,5a	116,2	15,6	42,9a
DMS	28,4	3,1	15,3	6,3	4,5	16,4	4,5	106,0	12,4	19,8
CV (%)	28,2	29,0	25,0	29,6	29,3	29,8	38,9	30,7	32,4	25,5
Soja 2011–2012										
Controle	35,4b	3,9bc	24,0	6,7	3,3	2,2a	5,9	137,2	37,2a	40,0b
FR - Aveia	41,4ab	3,6bc	27,1	6,5	2,8	1,6b	6,0	105,9	26,7b	46,2ab
TM - Aveia	42,3ab	4,1bc	25,0	6,4	2,8	1,7ab	6,5	101,9	22,7bc	40,17b
ST - Aveia	46,3a	6,4a	25,0	5,6	3,3	1,8ab	6,8	107,6	23,1bc	49,1a
FR - Soja	41,4ab	3,3c	26,3	6,5	2,9	1,5b	6,0	104,1	24,6bc	45,1ab
TM - Soja	43,2ab	4,0bc	24,0	5,6	2,8	1,9ab	6,4	106,4	25,6b	44,9ab
ST - Soja	44,5a	5,4ab	26,8	6,7	3,2	1,7ab	6,1	104,5	20,8c	47,1ab
DMS	8,7	1,9	5,2	2,4	0,7	0,5	1,7	37,3	4,7	8,4
CV (%)	7,2	15,0	7,2	13,1	7,9	10,6	9,2	11,9	6,4	6,6
Soja 2012–2013										
Controle	48,6	3,6	19,9	4,5	1,9	1,8	10,1	149,4	38,4a	53,6c
FR - Aveia	52,0	4,6	21,5	5,1	1,9	1,5	10,2	114,9	28,9b	58,4bc
TM - Aveia	52,1	5,7	29,4	5,4	2,3	1,5	10,0	122,8	27,2b	51,7c
ST - Aveia	56,0	5,7	25,0	4,8	2,1	1,8	9,8	136,1	25,8b	80,2a
FR - Soja	52,1	4,7	19,9	5,0	1,9	1,6	9,4	127,9	28,1b	59,2abc
TM - Soja	53,5	5,3	20,2	4,8	2,1	1,6	9,2	131,1	23,8b	55,8bc
ST - Soja	54,5	5,8	26,6	4,8	2,3	1,6	9,7	120,2	23,1b	76,5ab
DMS	9,9	2,9	12,7	1,2	0,6	0,5	3,6	44,2	6,1	21,7
CV (%)	6,6	19,9	19,1	8,3	12,3	9,7	12,9	12,0	7,7	12,2

Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

O teor de Zn nas folhas também foi reduzido com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P e com a aplicação de FR e TM no sulco de semeadura da aveia, e FR no sulco de semeadura da soja. Já, a aplicação de FR e ST no sulco de semeadura da soja elevou o teor de Mn nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia.

No segundo cultivo de soja, em 2010–2011, apenas as concentrações de Fe e Zn não foram influenciadas pelos tratamentos (Tabela 8). A concentração de N foi maior com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja em relação ao tratamento sem P, porém esta não diferiu significativamente dos tratamentos com aplicação de FR, TM e ST no sulco de semeadura da aveia preta e do tratamento com aplicação de TM no sulco de semeadura da soja. Possivelmente, a maior absorção de P promovida pela adubação fosfatada induziu à maior absorção de N, pois a interação entre esses nutrientes é positiva (ABREU et al., 2002). A aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia ou da soja proporcionou maior concentração de P nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P e com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia e FR no sulco de semeadura da soja, devido ao aumento na disponibilidade de P no solo, o que resulta em melhor desenvolvimento das plantas e maior absorção desse nutriente (ERNANI et al., 2000). A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja também aumentou a concentração de K nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P, com TM no sulco de semeadura da aveia e FR no sulco de semeadura da soja. Os teores de Ca e de Mg nas folhas de soja foram maiores quando o ST foi aplicado no sulco de semeadura da aveia em comparação com os tratamentos sem P e com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia. O teor foliar de S foi menor com a adubação fosfatada, independentemente da fonte e da época de aplicação. Como a adsorção de fosfato é mais forte que a de sulfato, é comum, em solos tropicais, ocorrer mais baixa concentração de S nas camadas superficiais do solo e aumento de sua concentração em camadas do subsolo. Tal fato é potencializado pela aplicação de calcário

e fósforo, pois o aumento no pH e a competição aniônica do fosfato nas camadas superficiais promovem lixiviação de sulfato que acaba sendo adsorvido pelas cargas positivas em camadas mais profundas (RHEINHEIMER et al., 2005).

O teor de Cu foi maior quando o ST foi aplicado no sulco de semeadura da soja em relação ao tratamento sem P. A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja também proporcionou maior teor de Mn nas folhas de soja em relação aos tratamentos sem P, com FR no sulco de semeadura da soja e com TM no sulco de semeadura da aveia. A maior absorção de P decorrente da aplicação de fosfato totalmente acidulado (ST) certamente favoreceu o crescimento radicular das plantas, promovendo exploração de maior volume de solo e maior absorção dos demais nutrientes (FRANCISCO et al., 2007).

No terceiro cultivo de soja, em 2011–2012, os tratamentos de adubação fosfatada não ocasionaram alterações significativas nos teores de K, Ca, Mg, Cu e Fe nas folhas de soja (Tabela 8). A aplicação de ST no sulco da aveia ou da soja proporcionou maior concentração de N nas folhas de soja em relação ao tratamento sem P. Já, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia aumentou a concentração de P nas folhas de soja em relação à aplicação de FR e TM, com ou sem antecipação, e ao tratamento sem P. A aplicação de FR, com ou sem antecipação, reduziu o teor de S em relação ao tratamento sem P. A adubação fosfatada, independentemente da fonte e da época de aplicação, proporcionou redução na concentração de Zn nas folhas de soja em relação ao tratamento sem P. No Brasil, a concentração de Zn nos solos é naturalmente baixa, e isto é reforçado pela utilização de quantidades relativamente elevadas de calcário para correção da acidez e pelo uso de fertilizantes fosfatados, uma vez que há antagonismo entre P e Zn (FAGERIA, 2000). A adubação fosfatada também pode induzir à formação de precipitados pouco solúveis de H_2PO_4^- com cátions metálicos (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} e Mn^{2+}), reduzindo a disponibilidade desses nutrientes no solo (ERNANI, 2008). A concentração

de Mn nas folhas de soja foi maior quando houve aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação à aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia e ao tratamento sem P.

As concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Fe nas folhas de soja não foram influenciadas pelos tratamentos de P no último cultivo, em 2012–2013 (Tabela 8). A concentração de Zn nas folhas de soja foi maior no tratamento sem P em relação aos demais tratamentos que receberam adubação fosfatada, com ou sem antecipação. Assim como na safra anterior (2011/2012), a adubação fosfatada promoveu efeito antagônico na absorção de Zn, contribuindo para menor absorção deste nutriente. A aplicação de P de forma concentrada no sulco de semeadura da cultura possivelmente contribuiu para a redução na absorção de Zn. Carneiro et al. (2008), estudando fontes, doses e modos de aplicação de P na interação P-Zn na cultura do milho, constataram que a aplicação localizada de P no sulco de semeadura da cultura ocasionou redução na absorção de Zn, sem, contudo, afetar a produção de matéria seca e de grãos de milho. Para o Mn, houve maior concentração deste nutriente nas folhas de soja quando o ST foi aplicado no sulco de semeadura da aveia em relação aos tratamentos sem P, com aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia ou da soja e com aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia. Além da maior absorção de nutrientes promovida pelo maior crescimento de raízes e maior volume de solo explorado por estas (FRANCISCO et al., 2007), a dissolução do ST pode reduzir o pH ao redor do grânulo do fertilizante (FIGUEIREDO, 1985). Com isso, poderia ocorrer redução no pH rizosférico, favorecendo o aumento da concentração de Mn^{2+} e sua absorção pelas plantas (SOUZA et al., 2010).

De modo geral, o P foi limitante ao desenvolvimento da soja nos dois primeiros anos de cultivo, e os teores dos demais nutrientes nas folhas se mantiveram em níveis relativamente adequados para a cultura, nos quatro anos de estudo (MALAVOLTA et al., 1997).

4.5. Concentração de nutrientes nos grãos de soja

As concentrações de nutrientes nos grãos da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013, de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada, estão apresentadas na tabela 9.

As concentrações de N, P, K, Mg, Cu, Fe e Mn nos grãos de soja no primeiro cultivo, em 2009–2010, não foram alteradas significativamente pelos tratamentos de adubação fosfatada (Tabela 9). A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja proporcionou teor de Ca nos grãos de soja mais baixo em relação ao tratamento sem P, porém este não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos com P. Provavelmente este resultado foi ocasionado pela diluição do nutriente em função da maior produtividade de grãos proporcionada pela aplicação de ST. A aplicação de FR no sulco de semeadura da soja proporcionou aumento no teor de S em relação aos tratamentos sem P, com ST no sulco de semeadura da aveia ou da soja e com TM no sulco de semeadura da soja. A aplicação de ST e TM no sulco de semeadura da soja proporcionou aumento no teor de Zn nos grãos de soja em relação ao tratamento com aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia ou da soja.

As concentrações de N, P, K, Ca, Fe e Mn nos grãos de soja não foram influenciadas pelos tratamentos de P no segundo cultivo de soja, em 2010–2011 (Tabela 9). O teor de Mg nos grãos de soja foi maior quando foram aplicados o TM no sulco de semeadura da soja e o ST no sulco de semeadura da aveia ou da soja em relação ao tratamento sem P (controle). A concentração de S nos grãos de soja foi maior no tratamento sem adubação fosfatada em relação ao tratamento com aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia. A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja elevou a concentração de Cu nos grãos de soja em relação ao tratamento com aplicação de FR no sulco de semeadura da soja. A concentração de Zn nos grãos de soja foi maior no tratamento sem P em relação aos tratamentos com aplicação de FR e ST no sulco de semeadura da aveia e de ST no sulco de semeadura da soja.

Tabela 9 - Concentrações de nutrientes nos grãos da soja cultivada em 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 e 2012–2013 de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
Soja 2009–2010										
Controle	57,8	7,1	17,1	2,8a	1,8	2,0b	12,5	157,0	64,4ab	19,8
FR - Aveia	55,8	7,6	18,4	2,4ab	1,8	1,9b	12,5	154,5	59,3b	19,6
TM - Aveia	54,7	7,6	18,3	2,5ab	1,9	2,4ab	10,4	286,8	63,9ab	18,7
ST - Aveia	64,4	9,4	17,8	2,3ab	1,9	1,7b	10,2	168,9	69,0ab	19,9
FR - Soja	66,4	9,4	17,9	2,3ab	1,9	3,1a	9,0	192,0	59,0b	21,7
TM - Soja	59,9	7,6	17,6	2,4ab	1,8	2,0b	10,6	119,7	71,5a	17,3
ST - Soja	64,4	9,3	18,3	2,0b	1,9	1,9b	8,6	209,9	72,3a	17,9
DMS	19,6	3,9	3,6	0,6	0,2	0,9	5,0	201,8	10,1	7,4
CV (%)	11,4	16,4	7,1	8,5	3,1	14,5	16,6	38,3	5,4	13,4
Soja 2010–2011										
Controle	45,7	5,4	15,9	2,0	1,7b	2,5a	4,1ab	118,0	23,3a	11,0
FR - Aveia	43,9	5,6	14,3	1,9	1,9ab	2,0ab	4,3ab	143,0	18,3bc	10,1
TM - Aveia	42,3	5,4	15,2	1,9	1,9ab	1,9ab	4,2ab	100,9	21,1ab	10,3
ST - Aveia	46,0	5,9	15,9	1,8	2,1a	1,7b	4,6ab	130,3	17,9bc	12,2
FR - Soja	45,2	5,8	15,5	2,0	1,9ab	2,2ab	4,0b	104,4	22,1ab	11,0
TM - Soja	46,0	6,3	15,7	1,8	2,1a	2,1ab	4,0ab	102,6	20,1abc	12,0
ST - Soja	46,6	6,2	15,7	1,9	2,1a	1,9ab	5,0a	130,3	15,4c	10,1
DMS	5,8	1,4	2,3	0,6	0,3	0,8	1,0	62,9	4,9	4,7
CV (%)	4,5	8,5	5,1	10,6	4,5	13,4	8,0	18,5	8,7	15,1
Soja 2011–2012										
Controle	56,0	5,9ab	29,8	2,7	1,9b	2,0a	8,3	156,2	45,4	19,3
FR - Aveia	50,5	5,5b	29,3	2,6	2,0ab	1,0b	7,5	240,5	34,8	18,3
TM - Aveia	56,8	6,3ab	30,6	2,3	2,0ab	1,2b	9,2	211,3	33,7	19,6
ST - Aveia	52,5	7,4ab	29,5	2,5	2,2a	1,3b	7,5	199,3	34,7	21,9
FR - Soja	56,5	6,3ab	29,6	2,4	2,1a	1,4b	7,9	113,4	34,5	18,9
TM - Soja	48,4	8,1a	34,7	2,6	2,2a	1,5ab	7,0	179,4	36,9	16,8
ST - Soja	49,5	6,4ab	34,6	2,5	2,1a	1,4b	7,3	109,1	31,1	18,3
DMS	9,8	2,4	10,0	0,5	0,2	0,6	5,5	241,7	19,6	9,5
CV (%)	6,5	12,6	11,2	6,3	3,6	15,0	24,5	48,9	19,1	17,5
Soja 2012–2013										
Controle	58,8	5,8	21,2	3,7	2,4b	2,0	12,1	55,2b	46,8a	32,3
FR - Aveia	60,9	7,3	25,1	3,3	2,8a	1,7	10,0	75,8ab	32,6b	37,6
TM - Aveia	65,4	6,9	23,5	3,2	2,8a	1,5	9,7	69,5ab	31,0b	34,1
ST - Aveia	59,2	8,1	23,3	3,5	3,0a	1,4	12,0	73,1ab	30,0b	41,8
FR - Soja	60,8	6,6	22,3	3,1	2,8a	1,5	10,6	80,9a	34,6b	36,9
TM - Soja	63,8	7,8	23,3	3,1	2,8a	1,4	10,5	77,7a	30,3b	34,3
ST - Soja	58,7	7,5	22,8	2,9	2,8a	1,4	10,8	74,9ab	28,0b	37,0
DMS	17,3	2,4	5,8	1,7	0,3	0,7	2,8	22,5	11,7	9,7
CV (%)	9,9	11,6	8,7	18,1	3,9	15,9	8,9	10,8	12,3	9,4

Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

As concentrações de N, K, Ca, Fe e Mn nos grãos de soja no terceiro cultivo, em 2011–2012, não foram alteradas pelos tratamentos de adubação fosfatada (Tabela 9). A concentração de P nos grãos de soja foi maior nos tratamentos que receberam a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja em relação à aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia. A maior concentração de P nos grãos de soja também pode estar relacionada à maior absorção de Mg, pois segundo Malavolta (1980), o Mg funciona como carregador de P e na ausência de Mg ocorre pouca translocação do P para as folhas e grãos, acumulando mais P no caule e nas raízes. A aplicação de FR, TM e ST no sulco de semeadura da soja e a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionaram aumento no teor de Mg nos grãos de soja em relação ao tratamento sem P. O teor de S nos grãos de soja foi maior no tratamento sem adubação fosfatada em relação aos tratamentos com aplicação de FR, TM e ST no sulco de semeadura da aveia e de FR e ST no sulco de semeadura da soja. A menor translocação de S para os grãos de soja em presença de fontes de P possivelmente está relacionada com a menor concentração de sulfato nas camadas superficiais do solo decorrente, principalmente, da competição aniônica com o fosfato, promovendo lixiviação de sulfato para as camadas do subsolo (RHEINHEIMER et al., 2005).

As concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Mn nos grãos de soja não foram alteradas pelos tratamentos de adubação fosfatada no último ano de cultivo da soja, em 2012–2013 (Tabela 9). A concentração de Mg nos grãos de soja foi maior com a adubação fosfatada, independentemente da fonte e da época de aplicação, em relação ao tratamento controle sem P. A aplicação de FR e TM no sulco de semeadura da soja proporcionaram maior concentração de Fe nos grãos de soja em relação ao tratamento controle. O teor de Zn nos grãos de soja foi menor com a adubação fosfatada, independentemente da fonte e da época de aplicação, em relação ao tratamento controle, possivelmente devido ao antagonismo entre P e Zn (FAGERIA, 2000).

4.6. Produtividade de grãos de soja

No primeiro cultivo de soja, em 2009–2010, devido às condições climáticas favoráveis e à forte pressão de inóculo, a ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) apresentou alta severidade na cultura da soja, o que reduziu substancialmente a produtividade de grãos, porém o efeito da aplicação de P foi evidente (Figura 3A). A aplicação de ST no sulco de semeadura da soja, no primeiro ano de cultivo, proporcionou maior produtividade de grãos do que os demais tratamentos. Entretanto, a produtividade de grãos de soja no tratamento com adubação fosfatada antecipada no sulco de semeadura da aveia preta foi superior ao tratamento controle.

No segundo cultivo de soja, em 2010–2011, a produtividade de grãos foi muito afetada pela aplicação de ST (Figura 3B). As maiores produtividades de soja foram alcançadas com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia ou da soja, comprovando que o fertilizante totalmente acidulado possui alta eficiência agrônômica sobre quaisquer condições de solo e cultura (BOLLAND & BOWDEN, 1982). A aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia e a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja proporcionaram maior produtividade de grãos de soja somente em relação aos tratamentos controle e com FR no sulco de semeadura da soja. As produtividades de soja obtidas com a aplicação de TM no sulco de semeadura da aveia e de FR no sulco de semeadura da soja não diferiram estatisticamente do tratamento controle.

No terceiro cultivo de soja, em 2011–2012, a menor precipitação pluvial (Figura 1) ocorrida no início do desenvolvimento da cultura, nos meses de novembro e dezembro, pode ter contribuído para a obtenção de tetos mais baixos de produtividade (Figura 3C). Contudo, a maior produtividade de grãos de soja foi alcançada com a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia em relação os tratamentos sem P e com aplicação de FR no sulco de semeadura da aveia ou da soja, e de TM no sulco de semeadura da aveia.

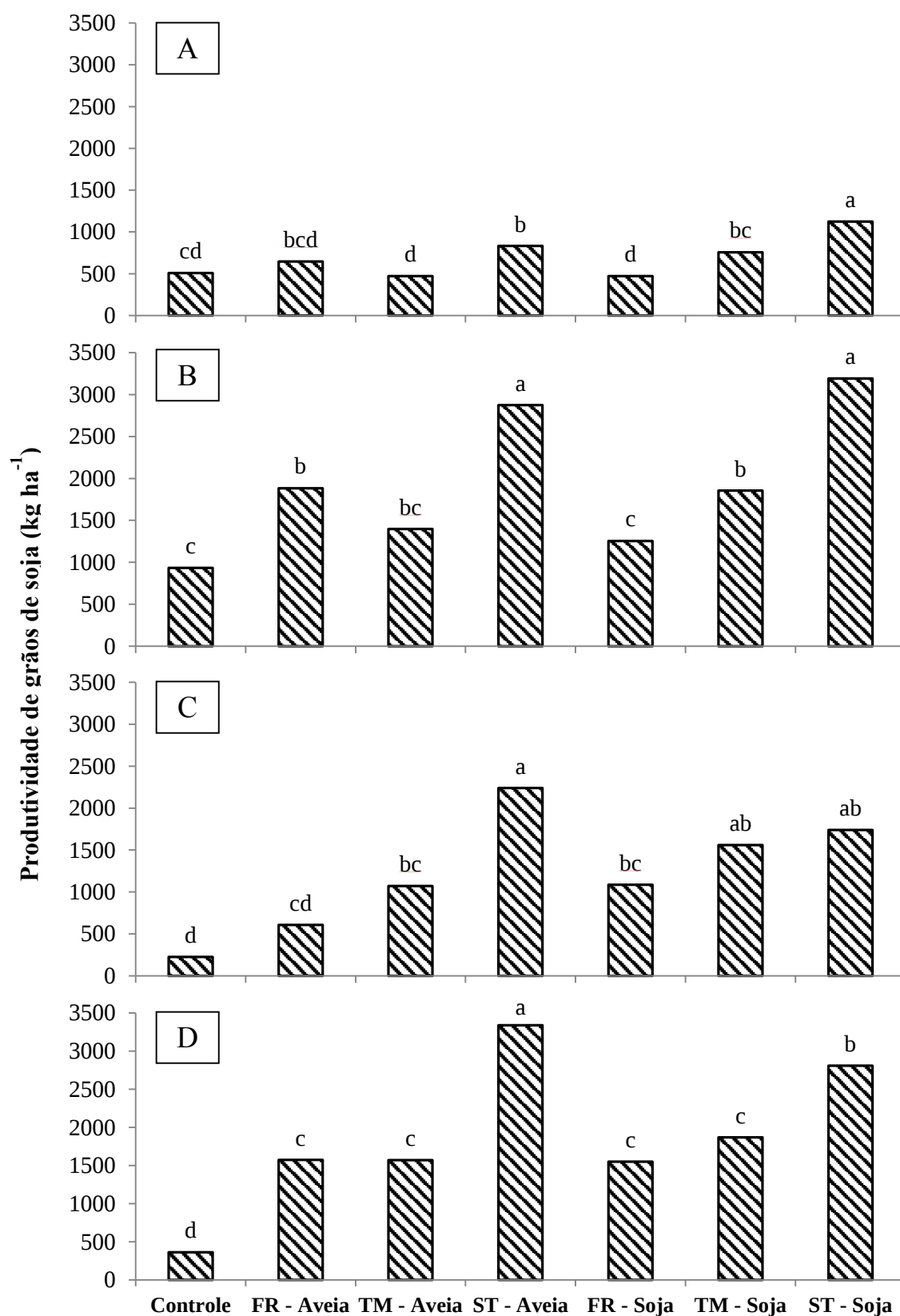


Figura 3 - Produtividade de grãos de soja em 2009–2010 (A), 2010–2011 (B), 2011–2012 (C) e 2012–2013 (D) de acordo com as fontes de P com termofosfato magnésiano (TM), fosfato natural reativo (FR) e superfosfato triplo (ST), na semeadura da aveia ou da soja. Médias seguidas de letras iguais para cada tratamento de adubação fosfatada não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

Porém, a produtividade de soja obtida com a aplicação de ST na aveia não diferiu significativamente da alcançada com a aplicação de ST e TM no sulco de semeadura da soja. A menor resposta na produtividade de grãos de soja com a aplicação de ST no sulco de semeadura da soja pode estar relacionada com a menor quantidade de matéria seca de aveia preta produzida durante o inverno neste mesmo tratamento (Figura 2C). A falta de cobertura adequada do solo, especialmente em períodos de deficiência hídrica, pode contribuir para a redução da produtividade de grãos devido à maior perda de umidade do solo (CAMPOS et al., 1994). Por outro lado, a maior umidade e a menor temperatura em solos cobertos por resíduos de plantas de cobertura favorecem a germinação das sementes e o desenvolvimento inicial das plantas (ARGENTON et al., 2005).

No quarto e último cultivo de soja, em 2012–2013, a aplicação de ST no sulco de semeadura da aveia proporcionou a maior produtividade de grãos de soja em relação aos demais tratamentos. Em seguida, o tratamento com aplicação de ST no sulco de semeadura da soja apresentou produtividade de grãos superior às fontes menos solúveis (FR e TM), com ou sem antecipação da adubação, e ao tratamento sem P. As fontes de menor solubilidade em água (FR e TM), com ou sem antecipação da adubação, somente apresentaram produtividades de grãos superiores ao tratamento controle.

As baixas produtividades de soja obtidas com a aplicação das fontes fosfatadas menos solúveis (FR e TM), com ou sem antecipação, podem estar relacionadas, em parte, ao fato de a acidez do solo ter sido corrigida por meio de aplicação de calcário com incorporação antes da instalação do experimento. Tais fontes necessitam de maior acidez no solo para a dissolução dos fertilizantes e obtenção de maior eficiência (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOUSA & LOBATO, 2004; SOUZA & YASUDA, 1995). A calagem também promove elevação no teor de Ca trocável no solo, reduzindo ainda mais a dissolução do fertilizante fosfatado de baixa solubilidade em água (HOROWITZ & MEURER, 2004).

Os fertilizantes fosfatados menos solúveis (FR e TM) devem apresentar maior eficiência quando aplicados em área total com incorporação. Como o sistema plantio direto não permite o revolvimento do solo, esperava-se que a aplicação de tais fontes de forma antecipada na linha de semeadura de aveia preta teria efeito semelhante ao da incorporação em área total em razão do espaçamento reduzido da cultura de inverno (0,18 m). Porém, isso não aconteceu porque o contato dos fertilizantes de mais baixa solubilidade em água com as partículas do solo não deve ter sido suficiente para acelerar a taxa de dissolução, prejudicando a nutrição de P (OLIVEIRA JUNIOR et al, 2008; HOROWITZ & MEURER, 2004).

A antecipação da adubação fosfatada com a fonte totalmente acidulada (ST) na cultura da aveia preta não ocasionou perda na produtividade da cultura da soja. Esses resultados confirmam os obtidos por Francisco et al. (2007), os quais anteciparam a adubação da soja para a semeadura do capim pé-de-galinha e esta operação não interferiu no acúmulo de matéria seca, na produtividade da soja e na exportação de nutrientes pelos grãos. Resultados semelhantes também foram obtidos por Lana et al. (2003) em um estudo de antecipação de até cinco meses da adubação fosfatada da cultura da soja, sendo que esta prática não interferiu na produtividade de soja em relação à adubação no momento da semeadura. A antecipação da adubação para a cultura da aveia também foi estudada por Trentin et al. (2004), os quais constataram que não houve prejuízos na produtividade de soja quando o P foi aplicado exclusivamente na cultura da aveia.

A adubação fosfatada antecipada no sulco de semeadura da aveia preta possibilita a instalação da cultura da soja de forma mais rápida, pois o rendimento operacional aumenta devido ao menor número de paradas para reabastecer a semeadora-adubadora. Com a antecipação da adubação é possível realizar a semeadura da soja na época recomendada, reduzindo o número de conjuntos necessários para a semeadura, dimensionando melhor o uso de máquinas e aumentando a receita líquida da cultura (MATOS et al., 2006). A antecipação da

adubação possibilita ainda o aproveitamento da umidade do solo ideal para a semeadura e a economia de combustível com menor movimentação de máquinas na propriedade. Destaca-se ainda que a antecipação da adubação na cultura de inverno proporciona maior aproveitamento do P aplicado (LANTMANN et al. 1996), pois além de ocasionar maior acúmulo de resíduos e ciclagem de nutrientes, o P poderá ser redistribuído no solo através da decomposição das raízes e da cobertura vegetal.

4.7. Índice de eficiência agronômica (IEA) e retorno econômico dos fertilizantes fosfatados

Após quatro anos da sucessão aveia preta-soja, a produtividade de soja acumulada foi significativamente afetada pela adubação fosfatada (Tabela 10). A aplicação de ST, com ou sem antecipação para a cultura da aveia preta, proporcionou o maior rendimento acumulado de grãos de soja em relação aos demais tratamentos. A antecipação da adubação fosfatada para a semeadura da aveia preta com a utilização de fosfato totalmente acidulado (ST) proporcionou o maior índice de eficiência agronômica (IEA) (106%). As fontes menos solúveis (FR e TM), quando aplicadas no sulco de semeadura da aveia preta, apresentaram IEA muito baixo, de 39% e 36%, respectivamente. Já, a aplicação de TM no sulco de semeadura da soja apresentou o mais alto IEA (59%) entre as fontes fosfatadas menos solúveis (FR e TM), tomando por base a produtividade de soja acumulada durante os quatro anos da sucessão aveia preta-soja. A utilização de fontes menos solúveis (FR e TM), mesmo após quatro anos da aplicação, com ou sem antecipação, não apresentou ganho de eficiência para se equiparar à fonte totalmente acidulada (ST).

Tabela 10 - Aumento na produtividade de soja, índice de eficiência agrônômica (IEA) e retorno econômico de acordo com os tratamentos de adubação fosfatada após quatro ciclos da sucessão aveia preta-soja.

Tratamento	Aumento na produtividade de soja (4 anos)	Índice de Eficiência Agrônômica (IEA)	Receita bruta (4 anos)	Custo do fertilizante (4 anos)	Retorno econômico (4 anos)
	kg ha ⁻¹	(%)	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
FR - Aveia	2681c	39	2.283,00	364,00	1.919,00
TM - Aveia	2483c	36	2.115,00	2472,00	- 357,00
ST - Aveia	7251a	106	6.175,00	1096,00	5.079,00
FR - Soja	2331c	34	1.985,00	364,00	1.621,00
TM - Soja	4009b	59	3.414,00	2472,00	942,00
ST - Soja	6835a	100	5.821,00	1096,00	4.725,00
DMS	788	-	-	-	-
CV (%)	6,5	-	-	-	-

Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). TM: termofosfato magnesiano; FR: fosfato natural reativo; ST: superfosfato triplo. Adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura da aveia preta ou da soja. Sucessão: aveia preta (2009) – soja (2009/2010), aveia preta (2010) – soja (2010/2011), aveia preta (2011) – soja (2011/2012) e aveia preta (2012) – soja (2012/2013).

IEA = (Prod. tratamento com a fonte de P – Prod. sem P) $\times$ 100/(Prod. ST na soja – Prod. sem P).

Fonte: DERAL (2015a); DERAL (2015b); INDEX MUNDI (2015).

Em um estudo realizado durante quatro anos envolvendo a eficiência agrônômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado, verificou-se que os fosfatos naturais apresentaram baixa eficiência agrônômica, mesmo com o passar do tempo (GOEDERT et al., 1990). Porém, diferentemente dos resultados obtidos no presente trabalho, a eficiência agrônômica dos termofosfatos foi similar à do superfosfato triplo. Em outro estudo com diferentes doses e fontes de P para a soja em solos distintos do cerrado, constatou-se que as fontes de solubilidade mais elevada ocasionaram as maiores produtividades de soja e os mais altos índices de eficiência em relação aos fosfatos naturais (SILVA et al., 2009). No estudo em questão, a aplicação de TM apresentou alto IEA, de 163% no Neossolo Quartzarênico e de 100% no Latossolo Vermelho distroférico típico. No presente trabalho, o TM apresentou IEA relativamente baixo, principalmente quando aplicado de forma antecipada (Tabela 10). Esse efeito pode ter sido consequência de problemas operacionais encontrados na distribuição do fertilizante em linhas, especialmente na cultura de aveia preta, cujo espaçamento foi mais reduzido (0,18 m). O TM apresenta alta densidade e não possui características

adequadas para o seu livre escoamento durante a distribuição do fertilizante nas linhas de semeadura. Esse problema foi minimizado na cultura da soja porque o espaçamento entre as linhas foi maior (0,45 m). Mesmo assim, o TM não demonstrou ser um fertilizante adequado para aplicação nas linhas de semeadura, devendo ter maior eficiência quando aplicado em área total.

Coutinho et al. (1991) estudaram a eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja durante dois anos em um Latossolo Vermelho textura média da região de Jaboticabal (SP) e constataram que a eficiência, em termos de produtividade de grãos de soja, seguiu a seguinte ordem: superfosfato triplo > termofosfato magnesiano > fosfato de Gafsa granulado > fosfato de Patos de Minas.

Souza et al. (2014) estudaram a eficiência agronômica dos fosfatos de Bayóvar e Itafós, aplicados por meio da adubação corretiva, em um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vertissólico com pH (água) = 6 e elevado teor de Ca trocável. Nas parcelas, foram utilizados três tratamentos de fosfatagem, na dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com o fosfato natural reativo de Bayóvar, o fosfato de rocha Itafós e o superfosfato triplo (fonte de referência), além de um tratamento-padrão sem correção de P. Nas subparcelas, foram empregados três níveis de adubação de manutenção (0, 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), anualmente no sulco de semeadura, na forma de superfosfato triplo. Os autores constataram que os índices de eficiência agronômica dos fosfatos de rocha aplicados de maneira isolada foram de 72% e 82% para o Bayóvar e de 43% e 47% para o Itafós, nos anos de 2011 e 2012, respectivamente. Porém, ao longo de dois anos, a aplicação de ST proporcionou elevada economicidade (acima de R\$ 4.500,00 ha⁻¹), devido às altas produtividades alcançadas na cultura do milho.

A receita bruta foi afetada pelo aumento de produtividade da soja, sendo que as maiores receitas foram alcançadas pelas maiores produtividades de grãos (Tabela 10). A receita bruta seguiu a ordem: ST aveia > ST soja > TM soja > FR aveia > TM aveia > FR soja. A ordem de

custo dos fertilizantes fosfatados foi a seguinte: $TM > ST > FR$. Destaca-se o alto custo do TM ser decorrente da menor concentração de P_2O_5 total em sua composição em relação ao ST e ao FR (Tabela 2), necessitando de maior quantidade a ser aplicada para a obtenção da mesma dose de P_2O_5 .

Considerando a receita bruta da cultura da soja e o custo dos fertilizantes fosfatados, o retorno econômico obtido com as fontes de P empregadas, com e sem antecipação, seguiu a ordem: $ST\ aveia > ST\ soja > FR\ aveia > FR\ soja > TM\ soja > TM\ aveia$ (Tabela 10). Esses resultados demonstraram que a fonte que ocasionou maior retorno econômico, em quatro anos da sucessão aveia preta-soja, foi o fosfato totalmente acidulado (ST). O retorno econômico com a utilização de ST aplicado de forma antecipada na semeadura da aveia preta foi aproximadamente 213%, 439% e 8% maior em relação ao FR, TM e ST quando aplicados no sulco de semeadura da soja, respectivamente. Em quatro anos da sucessão aveia preta-soja, a partir do estabelecimento do sistema plantio direto, a adubação antecipada da soja na semeadura de aveia preta demonstrou viabilidade econômica com o uso da fonte totalmente acidulada (ST).

A hipótese de que fontes fosfatadas menos solúveis em água, aplicadas de forma antecipada no sulco de semeadura da cultura de aveia preta, ao longo do tempo, são alternativas viáveis do ponto de vista agrônomo e econômico em comparação à fonte de alta solubilidade em água para a sucessão aveia preta-soja, no estabelecimento do sistema plantio direto não se confirmou. A fonte fosfatada de alta solubilidade em água (ST) apresentou resultados muito superiores aos das fontes menos solúveis (FR e TM), tanto do ponto de vista agrônomo como também econômico, e a antecipação da adubação fosfatada da soja somente apresentou viabilidade com a utilização da fonte solúvel (ST).

5. CONCLUSÕES

1. A aplicação de superfosfato triplo no sulco de semeadura da aveia preta proporcionou maior produção de matéria seca da parte aérea e maior extração de nutrientes pelas plantas de aveia em relação ao emprego de fosfato natural reativo e de termofosfato magnesiano.
2. O superfosfato triplo, com ou sem antecipação da adubação para a sucessão aveia preta–soja, apresentou maior eficiência agronômica e retorno econômico bem mais elevado do que o fosfato natural reativo e o termofosfato magnesiano.
3. Na conversão de pastagem degradada para o sistema plantio direto com a sucessão aveia preta–soja, a adubação fosfatada da soja deve ser feita com fonte totalmente acidulada (superfosfato triplo), e essa fonte pode ser antecipada para o sulco de semeadura da aveia preta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, I.N.; PINTO, J.E.B.P.; FURTINI NETO, A.E.; BERTOLUCCI, S.K.V.; LADEIRA, A.; GEROMEL, C. Nitrogênio e fósforo na produção vegetal e na indução de mucilagem em plantas de insulina. **Horticultura Brasileira**, v.20, p.536-540, 2002.
- AMADO, T.J.C.; SANTI, A.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II – Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1085-1096, 2003.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de latossolo vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.425-435, 2005.
- BAYER, C.; AMARAL, A.S. Amenização da acidez de um latossolo argiloso por extratos aquosos de plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.2, p.88-96, 2003.
- BOLLAND, M.D.A. & BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.33, p.1061-1071, 1982.
- BORKERT, C.M.; GAUDÊNCIO, C.A.; PEREIRA, J.E.; PEREIRA, L.R.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.143-153, 2003.
- BRAGA, J. M.; AMARAL, F.A. Efeito de fontes de fósforo na variação de pH e disponibilidade de fósforo, cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, v.17, p.325-335, 1971.
- BRASMAX, 2014. **Cultivar Apolo RR**. Disponível em: <<http://www.brasmaxgenetica.com.br/producto.php?id=19&r=S>>. Acesso em 1 out. 2014.
- CAIRES E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v.97, p.791-798, 2005.
- CAIRES, E.F. Controle da acidez e melhoria do ambiente radicular no sistema plantio direto. In: DA FONSECA, A.R.; CAIRES, E.F.; BARTH, G. (Ed). **Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Sistema Plantio Direto**, 1 ed., Ponta grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2011.
- CAIRES, E.F.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.89, p.3-12, 2006.
- CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; COSTA, M.B.B. da; MIYASAKA, S.; AMADO, T.J. C. Aspectos gerais da adubação verde. In: COSTA, M. B. B. da (Coord.). **Adubação verde no sul do Brasil**. 2 ed., p.1-56, 1993.
- CAMARGO, M.S.; ANJOS, A.R.M.; ROSSI, C.; MALAVOLTA, E. Adubação fosfatada e metais pesados em Latossolo cultivado com arroz. **Scientia Agricola**, v.57, p.513-518, 2000.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J.A.; NICOLodi, R. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, v.24, p.459-463, 1994.

CARNEIRO, L.F.; NETO, A.E.F.; RESENDE, A.V.; CURI, N.; SANTOS, J.Z.L.; LAGO, F.J. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na interação fósforo-zinco em milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1133-1141, 2008.

CARNEIRO, L.F.; RESENDE, A.V.; NETO, A.E.F.; SANTOS, J.Z.S.; CURI, N.; REIS, H.P.; VALLE, L.A.R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p.483-491, 2011.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW L.I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to increase nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, v.102, p.261-316, 2009.

CONAB, 2015. **Produção de soja no Brasil**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcm_sconteudos>. Acesso: 9 mai. 2015.

COODETEC, 2014. **Cultivar CD 202**. Disponível em: <http://www.coodetec.com.br/php/detalhes_cultivar.php?id=20>. Acesso: 1 out. 2015.

COSTA, A.D.; ALBUQUERQUE, J.A.; ERNANI, P.R.; BAYER, C.; MERTZ, L.M. Alterações físicas e químicas num cambissolo húmico de campo nativo após a correção da acidez. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.5, p.118-130, 2006.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S. & SITTA, D.S.X. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p.1393-1399, 1991.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, v.29, p.83-117, 1977.

DERAL, 2014. **Precipitação de Ponta Grossa**. Disponível em: www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/pluvio.xls. Acesso em: 13 dez. 2014.

DERAL, 2015a. **Histórico dos preços recebidos pelo produtor - soja**. Disponível em: <www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/prpsh95.xls>. Acesso em 15 maio de 2015.

DERAL, 2015b. **Preços pagos pelos produtores**. Disponível em: <www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/ppp.xls>. Acesso em 15 maio de 2015.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno**. IAPAR, Londrina, 80p. (Circular, 73), 1992.

EMBRAPA, 2014a. **Cultivar BRS 184**. Disponível em: <http://www.catalogosnt.cnptia.embrapa.br/catalogo20/catalogo_de_produtos_e_servicos/arvore/CONTAG01_2_26102006135459.html>. Acesso: 1 out. 2014.

EMBRAPA, 2014b. **Cultivar BRS 284**. Disponível em: <http://www.catalogosnt.cnptia.embrapa.br/catalogo20/catalogo_de_produtos_e_servicos/arvore/CONT000fplcvjrm02wyiv800p12zok3q74f4.html>. Acesso: 1 out. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: O Autor, 230p. 2008.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. & CAMILLO, R.J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.537-544, 2000.

FAGERIA, N.K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.390-395, 2000.

FEBRADPD, 2014. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso: 18 ago. 2014.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** - Sistema de Análise de Variância. 2006.

FIGUEIREDO, O.A.L. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno**. 1985, 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

FLOSS, E.L. Benefícios da biomassa de aveia preta ao sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, p.25–29, 2000.

FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.34, p.2267-2276, 1999.

FRANCISCO, E.A.B.; CÂMARA, G.M.S.; SEGATELLI, C.R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v.66, p.259–266, 2007.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; BRUENTTO, G. Superphosphate and rock phosphates as Phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2503-2514, 2003.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003, 231 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUZA, D.M.G. Eficiência agronômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.25, p.521-530, 1990.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G.; REIN, T. A. **Princípios metodológicos para avaliação agronômica de fontes de fósforo**. Planaltina: EMBRAPA-CPA, 22p. (Documentos, 22), 1986b.

GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.97-102, 1984.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (Ed.) **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1986a.

GUARESCHI, R.F.; GAZOLLA, P.R.; SOUCHIE, E.L.; ROCHA, A.C. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Ciências Agrárias**, v.29, p.769-774, 2008.

HANSON, R.G. DRIS evaluation of N, P, K status of determinant soybeans in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.12, p.933-948, 1981.

HAVLIN, J.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2005.

HOROWITZ, N. & MEURER, E.J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., (Ed.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.

IAPAR, 2014. **Médias históricas em estações do IAPAR**. http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm. Acesso: 18 nov. 2014.

IBGE, 2015. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso: 07 mai. 2015.

INDEX MUNDI, 2015 **Preço fosfato natural reativo**. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=60>>. Acesso: 15 mai. 2015.

IPNI, 2015a. **Consumo de fertilizantes no Brasil**. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132>>. Acesso: 9 mai. 2015.

IPNI, 2015b. **Balanco de nutrientes na agricultura brasileira**. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/CB94A790AA6AB82683257A90000C0822/\\$FILE/Page1-11-130.pdf](http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/CB94A790AA6AB82683257A90000C0822/$FILE/Page1-11-130.pdf)>. Acesso: 9 mai. 2015.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L.S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.573-580, 2005.

KIRK, G. J. D. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. **European Journal Soil Science**, v.50, p.369-378, 1999.

LANA, R.M.Q.; VILELA FILHO, C.E.; ZANÃO JÚNIOR, L.A. Adubação superficial com fósforo e potássio para a soja em diferentes épocas em pré-semeadura na instalação do plantio direto. **Scientia Agricola**, v.4, p.53-60, 2003.

LANTMANN, A.F. & CASTRO, C. Resposta da soja à adubação fosfatada. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. S. (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.

LANTMANN, A.F.; ROESSING, A.C.; SFREDO, G.J.; OLIVEIRA, M.C.N. de. **Adubação fosfatada e potássica para sucessão soja-trigo em latossolo roxo distrófico sob semeadura direta**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1996.

LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.421-428, 1978.

LOPES, A.S & GUILHERME L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG; **Sociedade De Ciência do Solo**, p.2-61, 2007.

MAACK, V. **Geografia física do estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio Ed., 1981.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

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

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da soja**. Piracicaba: Ultrafétil, 1978.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed., Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto afetado pela adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563-568, 2007.

MATOS, M.A.; SALVI, J.V. MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.493-501, 2006.

MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Adubação fosfatada em sistemas de produção com semeadura direta. In: DA FONSECA, A.R.; CAIRES, E.F.; BARTH, G. (Ed). **Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Sistema Plantio Direto**, 1 ed., Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2011.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.411-416, 1993.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1519–1527, 2001.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L.A. C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1459-1466, 2002.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana de açúcar e nas propriedades químicas de um Latossolo de textura média Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.187, 1992.

MUZILLI, O. A fertilidade do solo no sistema plantio direto: bases para o manejo sustentável. In: **Simpósio sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000.

MUZILLI, O. Princípios e perspectivas de expansão. In: IAPAR (Ed). **Plantio Direto no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, Circ. 23, 1981.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C.A. Teores de nutrientes na folha e nos grãos de aveia-preta em função da adubação com fósforo e potássio. **Bragantia**, v.64, p.441-445, 2005.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.DE; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agrônômica do fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.623-631, 2008.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F.A. Soja. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed). **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKY, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, (Circular, 76), 1992.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v.34, p.1779-1784, 2004.

PEIXOTO, R. T. G. Consequências do uso e manejo do solo no teor de matéria orgânica e na capacidade de troca iônica. In: **Simpósio sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000.

PÖTTKER, D. **Aplicação de fósforo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa, (Embrapa Trigo, Boletim de Pesquisa, 2), 1999.

PÖTTKER, D.; ROMAN, E.S. Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, p.763–770, 1994.

PRADO, R.M.; ROMUALDO, L.M.; VALE, D.W. Resposta da aveia preta à aplicação de fósforo sob duas doses de nitrogênio em condições de casa de vegetação. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.527-533, 2006.

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

RAIJ, B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed., Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.17, p.547-566, 1986.

RAIJ, B.van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.

RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURTI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, 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.

RHEINHEIMER, D.S.; ALVAREZ, J.W.R.; OSORIO FILHO, B.D.; SILVA, L.S.; BORTOLUZZI, E.C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.35, p.562-569, 2005.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C.; BORTOLUZZI, E.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.797-805, 2000.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.27, p.355-362, 2003.

SÁ, J.C.M. de. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T. & ABDALA, S.R.S., (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.

SÁ, J.C.M. Manejo de nitrogênio na cultura do milho no sistema plantio direto. In: **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: Escola Superior Luiz de Queiroz, 1997.

SANCHEZ, P.A.; LOGAM, T.J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: SANCHEZ, P.A.; LAR, R.M. (Ed). **Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics**. Madison: SSSA; ASA, 1992.

SANTI, A.; AMADO, T.J.C.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I – Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1075-1083, 2003.

SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; IGNACZAK, J.C.; ZOLDAN, S.M. Conversão e balanço energéticos em sistemas de produção de grãos com pastagens sob sistemas de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.743-752, 2000.

SANTOS, J.Z.L.; FURTINI, A.E.N.; VILELA, A.D.R.; CURTI, N.; CARNEIRO, L.F.; GIGANTE, S.E. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivo com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.705-714, 2008.

SILVA, F.N.; FURTINI NETO, A.E.; CARNEIRO, L.F.; MAGALHÃES, C.A.S.; CARNEIRO, D.N.M. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.1220-1227, 2009.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1269-1275, 2001.

SISTEMA DE MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO DA FUNDAÇÃO ABC (smaABC). **Dados climáticos de Ponta Grossa – PR**, 2012.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, (Informações Agronômicas, 102), 2003.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed). **Fertilidade do solo**. 1 ed., Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

SOUZA, E. C. A. de; YASUDA, M. **Uso agrônomo do termofosfato no Brasil**. São Paulo: Fertilizantes Mistui, 1995.

SOUZA, L.H.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; VILLANI, E.M.A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.34, p.1641-1652, 2010.

SOUZA, R.M. DE.; SOBRAL, L.F.; VIÉGAS, P.R.A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. DE; CARVALHO, M.DA.C.S. Eficiência agrônômica de fosfatos de rocha em solo com elevado teor de cálcio trocável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1816-1825, 2014.

TRENTIN, E.E.; CERETTA, C.A.; FUCHINA, L.F.; MOREIRA, I.C.L.; GIROTTO, E.; POCOJESKI, E. **Manejo da adubação fosfatada e potássica em plantio direto na sucessão aveia branca/soja**. In: FERTBIO, 2004. Resumos. Lages: UDESC, 2004.

VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J. Relação de substituição entre calcário e fósforo aplicados ao solo na cultura de soja. **Agronomia Sulriograndense**, v.8, p.187-193, 1972.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio fósforo. **Revista Brasileira de Ciencias do Solo**, v.8, p.91-96, 1984.

VITTI, G.C.; WIT, A.; FERNANDES, B.E.P. Eficiência agronômica dos termofosfatos e fosfatos alternativos. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004.