

LAIS BILIA PICOLI

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DO REVESTIMENTO DO
FERTILIZANTE POR SUBSTÂNCIAS HÚMICAS**

Botucatu

2017

LAIS BILIA PICOLI

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DO REVESTIMENTO DO
FERTILIZANTE POR SUBSTÂNCIAS HÚMICAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador(a): Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P598d Picoli, Lais Bilia, 1990-
Disponibilidade de fósforo em função do revestimento do fertilizante por substâncias húmicas / Lais Bilia Picoli. - Botucatu: [s.n.], 2017
75 p.: grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Ciro Antonio Rosolem
Inclui bibliografia

1. Plantas - Efeito do fósforo. 2. Substâncias húmicas. 3. Fertilizantes fosfatados. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DO REVESTIMENTO DO FERTILIZANTE COM SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

AUTORA: LAÍS BILIA PICOLI

ORIENTADOR: CIRO ANTONIO ROSOLEM

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM

Depto de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DO NASCIMENTO

Pós-doutorando - Dep Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Pesquisador ESTÉVÃO VICARI MELLIS

Centro de Solos e Recursos Agroambientais, Fertilidade do Solo / Instituto Agrônômico de Campinas, SP

Botucatu, 01 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e proteção.

Aos meus queridos pais, Helio Luiz Picoli e Sebastiana Conceição Bilia Picoli, pelo apoio incondicional, por todo trabalho e dedicação.

À minha irmã, Leticia Bilia Picoli, por todo o apoio e incentivo.

Ao meu namorado, Caio Cesar Reis, por todo amor, compreensão, apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela orientação e pelos ensinamentos durante todos os anos de graduação e pós graduação.

À Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA – UNESP e ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal por todo o apoio durante todos os anos de estudos.

Aos amigos e colegas que contribuíram para a execução desse trabalho, em especial Leontino de Oliveira Neto, Murilo de Souza, Danilo Almeida e Kassiano Rocha.

Ao Dorival Pires de Arruda por todo o ensinamento e ajuda no desenvolvimento das atividades laboratoriais.

Aos funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal Casemiro, Mateus, Cirinho, Julia e Vinicius.

A todos os não mencionados, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

Obrigada.

RESUMO

O fósforo (P) é um dos elementos de maior importância para as plantas por desempenhar funções fisiológicas essenciais. No entanto, devido às condições dos solos tropicais altamente intemperizados, este é um dos nutrientes mais limitantes às plantas, havendo, portanto, uma necessidade evidente de se aumentar a eficiência de fertilizantes fosfatados e entender a dinâmica desse nutriente no solo. Nesse cenário, objetivou-se com esse estudo analisar o fluxo difusivo e a disponibilidade do P em resposta a localização de aplicação de P, ao teor de água no solo e a presença de substâncias húmicas revestindo o fertilizante fosfatado. Para o presente trabalho, foram desenvolvidos dois experimentos. No primeiro experimento, grânulos do fertilizante fosfatado foram depositados ao centro de placas de Petri, que foram preenchidas com solo e incubadas, e as amostras de solo foram obtidas em círculos concêntricos partindo do local de deposição dos grânulos. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x2, com quatro repetições, sendo quatro umidades baseadas na capacidade máxima de retenção de água gravitacional (20, 40, 60 e 80%) e dois fertilizantes, um na forma convencional e outro revestido por substâncias húmicas. As distâncias de amostragem foram analisadas separadamente. Para o segundo experimento, plantas de milho foram conduzidas em plant growth containers (PGCs) a fim de se avaliar o comportamento do P no ambiente rizosférico, por meio da extração sequencial de P, e o estado nutricional das plantas. O delineamento experimental adotado foi blocos ao acaso com quatro repetições em parcelas subdivididas, sendo os fertilizantes fosfatados, um na forma convencional e outro revestido por substâncias húmicas, considerados como parcela, e as distâncias de amostragem as subparcelas. Os fertilizantes fosfatados foram aplicados em diferentes profundidades e estas foram analisadas separadamente. O fertilizante revestido por substâncias húmicas proporcionou maior disponibilidade e difusão de P em relação ao fertilizante convencional, em função da umidade contida no solo e a localização de aplicação do fertilizante. Os valores de massa de matéria seca e teor de P em parte aérea e raiz das plantas de milho foram maiores na presença de substâncias húmicas. O fertilizante convencional acumulou maiores teores de P NaHCO_3 e P HCl, formas menos lábeis, enquanto o fertilizante revestido por substâncias húmicas proporciona maiores teores de P lábil (RTA).

Palavras chave: substâncias húmicas; disponibilidade de fósforo; mobilidade do fósforo; fracionamento do fósforo.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is one of the most important nutrients for plants to ensure some essential physiological activities. However, due to the conditions of highly weathered tropical soils, this is one of the most limiting nutrients to crops and, understanding the dynamics of this nutrient in the soil, is important to improve the efficiency of phosphate fertilizers. In this context, this study aimed to analyze the diffusive flux and the availability of P in response to the placement of the fertilizer in the soil, the water content and the presence of humic substances coating the fertilizer. The present study was divided in two experiments. At the first one, the fertilizer was applied in the center of Petri dishes filled with soil and incubated. Soil samples were obtained in concentric circles starting from the center. The experimental design was completely randomized in a 4x2 factorial scheme with four replications. Treatments consisted in four water content based on the maximum water holding capacity, and two sources of P, conventional and coated by humic substances. For the second experiment, maize plants were conducted in plant growth containers (PGCs) in order to evaluate the behavior of P in rhizospheric environment, through sequential extraction of P, and the nutritional state of plants. The study was carried out in a split plot in randomized blocks design, with four replicates. Phosphate fertilizers were the main plot and the different distances from the plant roots were the split plots. Fertilizer coated by humic substances provided higher availability and diffusion of P compared to the conventional fertilizer, especially in high water content and when applied close to the plant roots. The values of dry matter and P content in maize plants were higher in the presence of humic substances. Conventional fertilizer accumulated higher levels of P NaHCO_3 and P HCl, while fertilizer coated by humic substances provided higher levels of labile P.

Keywords: humic substances; phosphorus availability; phosphorus mobility; sequential phosphorus extraction.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Temperaturas médias registradas durante a condução do experimento no laboratório de apoio.....30
- Figura 2** - Valores médios de temperatura e umidade relativa registrados durante a condução do experimento em casa de vegetação..... 31
- Figura 3** - Representação Esquemática dos Plant Growth Containers (PGCs).....35
- Figura 4** - Teores médios de P disponível (RTA) para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) e para a testemunha (TEST) sem fertilizante nas umidades de 20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo, nas secções de amostragem 0,0-7,5 mm (A); 7,5-13,5mm (B); 13,5-25,5mm (C) e 25,5-43,0mm (D).....41
- Figura 5** - Distribuição do P disponível em função da interação da aplicação de superfosfato simples convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) e a umidade estabelecida em função da capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo nas distâncias de amostragem (0,0-7,5; 7,5-13,5; 13,5-23,5; 23,5-43,0 mm).....42
- Figura 6** - Teores médios de P-RTA para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.....48
- Figura 7** - Teores médios de P-NaHCO₃ para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes..... 52
- Figura 8** - Teores médios de P-NaOH 0.1 para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes..... 55
- Figura 9** - Teores médios de P-HCl para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes..... 57

Figura 10 - Teores médios de P-NaOH 0.5 para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características granulométricas do solo utilizado nos experimentos.....	28
Tabela 2 - Caracterização química do solo utilizado nos experimentos antes da aplicação de calcário.....	28
Tabela 3 - Caracterização química do solo utilizado nos experimentos após aplicação de calcário.....	28
Tabela 4 - Composição dos fertilizantes fosfatados utilizados na condução dos experimentos.....	29
Tabela 5 - Solução nutritiva adaptada de Hoagland.....	34
Tabela 6 - Valores médios de Ph (CaCl_2) do solo em função do fertilizante fosfatado (CONV e RSH) e das umidades adotadas (20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional) após a incubação das placas de Petri por 50 dias.....	38
Tabela 7 - Resumo da análise de variância (valores de p) em função da aplicação de fertilizantes (CONV e RSH) e as umidades provenientes da capacidade máxima de retenção de água gravitacional (20, 40, 60 e 80%) nas secções de amostragem (0,0-7,5; 7,5-13,5; 13,5-23,5; 23,5-43 mm) após período de incubação.....	39
Tabela 8 - Teores médios de P total do solo em função da aplicação de dois tipos de fertilizante fosfatados, convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) e das umidades adotadas (20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional) após a incubação das placas de Petri por 50 dias.....	44
Tabela 9 - Médias da massa de matéria seca (MMS) das plantas cultivadas em PGCs em função da aplicação de dois tipos de fertilizante fosfatados, convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH), e da profundidade de aplicação.....	46
Tabela 10 - Teores médios de P em parte aérea e raiz de plantas cultivadas em PGCs em função da aplicação de dois tipos de fertilizante fosfatados convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH), e da profundidade de aplicação.....	46
Tabela 11 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P RTA em função da aplicação de fertilizantes CONV e RSH em diferentes profundidades (0, 0,5, 1, 1,5 e 2 cm) nas secções de amostragem a partir da separação das raízes.....	47
Tabela 12 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P NaHCO_3 em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.....	51

Tabela 13 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P NaOH 0.1 em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.....53

Tabela 14 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P HCl em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.....56

Tabela 15 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P NaOH 0.5 em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.....59

Tabela 16 - Teores médios de P total do solo em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.....62

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
2	Revisão Bibliográfica.....	19
2.1	Fósforo no solo e fontes de P	19
2.2	Água no solo e transporte de P.....	21
2.3	Aplicação localizada do P.....	23
2.4	Importância das substâncias húmicas no solo	24
2.5	Fracionamento do fósforo	26
3	Material e Métodos	28
3.1	Coleta, correção e caracterização do solo.....	28
3.2	Caracterização dos fertilizantes.....	29
3.3	Estudo da mobilidade de P em placas de Petri.....	29
3.4	Estudo da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados	30
3.5	Implantação e condução do experimento.....	31
3.5.1	Incubação das placas de petri e avaliação da mobilidade do fósforo	31
3.5.2	Montagem dos PGCs e avaliação da eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados.....	33
3.6	Análise Estatística	35
4	Resultados e Discussão	37
4.1	Estudo da mobilidade de P em placas de Petri.....	37
4.1.1	pH do solo.....	37
4.1.2	P disponível	39
4.1.3	P total	43
4.2	Estudo da mobilidade de P em PGCs.....	44
4.2.1	Planta	44
4.2.2	Extração Sequencial de P	47
4.2.2.1	P extraído por resina trocadora de íons (P-RTA) – P lábil.....	47
4.2.2.2	P extraído por bicarbonato de sódio (P-NaHCO ₃) – P moderadamente lábil.....	50
4.2.2.3	P extraído por NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (P NaOH 0,1) – P moderadamente lábil ligado ao Fe e Al.....	53

4.2.2.4	P extraído por HCl (P HCL) – P ligado ao Ca.....	56
4.2.2.5	P extraído por NaOH 0,5 mol L-1 (P NaOH 0,5) – P ocluso pouco lábil.....	58
4.2.2.6	P total do solo	61
5	Conclusão.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

O fósforo participa de diversos processos fisiológicos e metabólicos da planta, tendo papel ativo e direto no seu crescimento e desenvolvimento, de forma que sua deficiência resulta em prejuízo no crescimento e na produtividade.

Como resultado do alto grau de intemperismo, os solos tropicais apresentam grandes quantidades de óxidos de Fe e Al que possuem alta capacidade de fixação de fósforo (P), o que torna este um dos elementos mais limitantes para a produtividade das culturas. Dessa forma, para suprir a necessidade de fósforo das plantas, a aplicação deste nutriente via fertilizante têm-se mostrado importante. Entretanto, devido à sua baixa eficiência de aproveitamento pelas plantas, geralmente aplica-se uma quantidade maior de P do que aquela exportada. No entanto, as fontes do nutriente são finitas e há riscos ambientais com o uso excessivo de P (FIXEN, 2009), havendo, portanto, a necessidade de estudos que busquem aumentar a eficiência do aproveitamento do fósforo pela planta. A associação do fertilizante fosfatado a substâncias orgânicas, dentre elas as substâncias húmicas, que visam a diminuição da fixação de fósforo, podem ser utilizadas como ferramenta para aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados.

Muitas vezes, as limitações no fornecimento de P às plantas também estão associadas às restrições no transporte do elemento até as raízes, visto que o fósforo do solo é transportado basicamente por difusão, sendo, portanto, um nutriente pouco móvel no solo, o que faz da água um recurso importante para manter o equilíbrio do sistema, já que a falta desta afeta diretamente a difusão. Além do adequado fornecimento de água facilitar o transporte do nutriente às raízes das plantas, a localização do fosfato também afeta de forma importante o acesso das raízes ao nutriente, assim como a eficiência da adubação e quantidade a ser aplicada. Sendo assim, a presença de água no sistema e a localização do fosfato no solo são de suma importância para o fornecimento adequado deste nutriente às plantas.

Buscando encontrar informações mais precisas sobre a mobilidade do fósforo oriundo de fertilizantes fosfatados, sua relação na efetividade de disponibilidade às plantas, bem como seu comportamento e suas interações no ambiente rizosférico, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de fertilizantes fosfatados em função do revestimento do fertilizante com substâncias húmicas em situações

críticas de potencial hídrico do solo e localização da aplicação de fósforo em diferentes profundidades.

A pesquisa foi realizada com base nas seguintes hipóteses: (i) a aplicação do fertilizante fosfatado revestido por substâncias húmicas aumenta a concentração da fração lábil de P no solo, (ii) em situações de baixa umidade, o revestimento do fertilizante fosfatado com substâncias húmicas pode criar uma barreira na solubilização do mesmo e prejudicar o movimento do nutriente no solo; (iii) o revestimento do P com substâncias húmicas pode aumentar a disponibilidade de P para as plantas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fósforo no solo e fontes de P

Segundo Malavolta (1980), o fósforo é um elemento essencial ao metabolismo das plantas que desempenha funções estruturais, tais como armazenamento e transferência de energia na célula e participa ativamente nos processos de respiração e fotossíntese. O P é um elemento essencial ao crescimento, desenvolvimento e reprodução das plantas (LÓPEZ-BUCIO et al. 2002), e pode ainda estimular o desenvolvimento radicular, o que acaba tendo grande impacto no desenvolvimento da planta e incremento da produção (RAIJ, 1991). O fósforo é componente de diversos compostos armazenadores de energia, como ATP, que são importantes para a germinação, fotossíntese e síntese de compostos orgânicos (MALAVOLTA, 2004). Desse modo, restrições no fornecimento desse nutriente no início do ciclo da cultura podem afetar o desenvolvimento da mesma, de forma que a planta não consegue se recuperar mesmo com o posterior fornecimento adequado de P (GATIBONI et al, 2007). Pelo fato de o P ser ligado a diversos processos metabólicos, este é um elemento móvel na planta e fica concentrado nas áreas mais ativas de crescimento. Sendo assim, grande parte do P absorvido é transferido e armazenado nos frutos e grãos, que serão colhidos, de forma que o P é extraído do solo (YAMADA, 2004). Daí vê-se a necessidade do fornecimento de P. No entanto, as quantidades aplicadas superam muito a extração e exportação pelas culturas.

Como produto da intensa intemperização, os solos de regiões tropicais geralmente apresentam baixa fertilidade natural e baixo pH. Assim, devido ao seu material de origem e a forte interação do elemento com o solo, os solos brasileiros são pobres em P (RAIJ, 1991), o que faz com que este seja um dos nutrientes mais limitantes às produtividades das culturas (MEURER; RHEINHEIMER; BISSINI, 2012). Além da baixa disponibilidade de P em solos tropicais, a deficiência deste elemento no solo também está associada às reações de adsorção/fixação do fosfato pelos minerais de argila, compostos em sua maioria por óxidos de Fe e Al que formam compostos insolúveis com o P (NOVAIS; SMYTH, 1999; BASTOS, 2008), reduzindo assim sua disponibilidade às plantas.

Elevadas doses de P poderiam ser aplicadas no solo a fim de se aumentar as reservas deste nutriente. No entanto, essa não é medida eficiente visto que, se o teor de P no solo for naturalmente baixo, em solos com alta capacidade de fixação,

haveria considerável transformação do P lábil em P não lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999), especialmente quando se aplica no solo fontes de fósforo solúveis (GONÇALVES et al., 1985; CORREA et al., 2008). Embora muitas vezes a quantidade de P no solo se mostre alta, grande parte desse P se encontra em forma não-lábil, limitando sua disponibilidade (LÓPEZ-BUCIO et al., 2002). Isso ocorre devido a diversos fatores como a precipitação por ferro e alumínio, adsorção na superfície dos coloides e a difusão nas superfícies dos cristais. O grau de labilidade do P no solo está diretamente ligado ao intemperismo sofrido, ao conteúdo de matéria orgânica, às características químicas e físicas do solo, à atividade dos microrganismos entre outros (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001). À medida que o P da solução do solo é absorvido pelas plantas, o P de formas menos lábeis vai sendo disponibilizado. No entanto, quanto maior a força de interação do P com os coloides do solo, menor é a velocidade de reposição do fósforo na solução, o que evidencia o fato de que o P não lábil presente nos solos não é suficiente para suprir a necessidade deste nutriente para as culturas (GATIBONI et al, 2007).

No geral, o movimento do fósforo no solo é um processo relativamente lento em função da sua alta reatividade no solo, mantendo baixa a concentração de P em solução, geralmente em teores inferiores ao recomendado para maioria das culturas (HISINGER, 2001). Esse fator é ainda mais recorrente em solos tropicais (LÓPEZ-BUCIO et al., 2002), onde essa interação acaba sendo maior. Dessa forma, a baixa mobilidade do P tem afetado a nutrição das culturas.

Visto que os solos tropicais possuem baixa fertilidade natural, e, portanto, baixos níveis de P disponível para as plantas, é importante que seja feito um bom manejo de adubação. Uma forma de minimizar a deficiência de P é a utilização de fontes fosfatadas de elevada solubilidade, pois estas apresentam maior eficiência em curto espaço de tempo (NOVAIS et al., 2007). No entanto, devido ao fato de que somente parte do aplicado é realmente absorvido pelas plantas, a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados é considerada baixa visto que a quantidade aplicada no solo é bem maior do que a quantidade exportada pela cultura (ROSETTO; DIAS; VITTI, 2008). A adubação fosfatada tem como base duas principais fontes, que variam de acordo com sua solubilidade: fosfatos naturais reativos e fosfatos acidulados, estes últimos considerados totalmente solúveis. As fontes solúveis correspondem à maior parte do total de P utilizados na agricultura brasileira devido a sua elevada

quantidade de P disponibilizada para as plantas em um curto espaço de tempo (ALVAREZ; ARRUDA; WUTKE, 1965; LOPES; SILVA; BASTOS, 2004).

Os fertilizantes fosfatados minerais são provenientes de depósitos de rochas ígneas (15%) e de rochas sedimentares (85%) (LOPES; SILVA; BASTOS, 2004), que são recursos naturais não renováveis, o que faz com que a busca por tecnologias e alternativas para aumentar a eficiência na utilização destes recursos seja incessante (ZAPATA; ROY, 2004). É a partir da solubilização desses minerais fosfatados que são liberadas as formas iônicas de P capazes de serem absorvidas pelas plantas (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) (SCHUMACHER; CECONI; SANTANA, 2003). Dentre os fosfatos solúveis, os que são mais comumente utilizados são o superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), fosfato monoamônio (MAP) e fosfato diamônio (DAP) (BOLAN; WHITE; HEDLEY, 1990; CHIEN et al., 2011). Esses materiais, por terem solubilização e liberação considerada rápida, reduzem uma possível deficiência de P no solo.

2.2 Água no solo e transporte de P

A absorção de P pelas plantas só ocorre quando este se encontra na solução do solo na forma iônica, em contato com a raiz, o que ocorre basicamente pela interceptação radicular, fluxo de massa ou por difusão (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2011). A contribuição da interceptação radicular e do fluxo de massa ao suprimento de fósforo para as plantas, mesmo em solos com alta disponibilidade, é, em geral, menor do que 10 % (BARBER, 1995). O restante, mais de 90 % do P, é suprido por difusão, e, ao absorver o P da solução do solo em contato com a raiz, diminui o teor, formando um gradiente que propicia a difusão de um ponto de maior concentração para um de menor, em um processo dinâmico.

A presença de água no solo é essencial e determinante para o desenvolvimento das culturas e transporte de nutrientes (PROCÓPIO et al., 2002). O crescimento das plantas depende de processos químicos e nutricionais que são sensíveis ao estresse hídrico, dentre eles a divisão e expansão celular, que são diretamente inibidos pelo estresse hídrico (ZHU, 2001; SAUSEN, 2007).

O nutriente chega até a superfície radicular, para ser absorvido, de duas maneiras: por meio de fluxo de massa, em resposta à diferença de potencial hídrico gerado pela transpiração da planta, e por difusão, que diferentemente do primeiro, é

em resposta ao gradiente de concentração (MEURER, 2007). Condições adequadas de umidade é fator que estimula a absorção de nutrientes e favorece seu transporte no solo, em especial daqueles cujo mecanismo principal de transporte no solo é a difusão.

A eficiência da absorção de fertilizantes fosfatados pelas plantas é influenciada pelo seu movimento no solo (FARIA; PEREIRA, 1993). O P é um nutriente que se desloca e é absorvido basicamente pelo processo de difusão, no qual o elemento caminha curtas distâncias numa fase aquosa a favor do gradiente de concentração (BARBER, 1974). Se o volume de água sair da faixa ideal, o coeficiente de difusão de P, bem como a concentração do nutriente na solução, sofrerão alterações. Essas características variam com o conteúdo volumétrico de água no solo. Segundo Nye & Tynker (1977), em solos mais secos, o fluxo difusivo de elementos como o P aproxima-se de zero. Portanto, o conteúdo volumétrico de água tem influência direta no fluxo difusivo, de forma que quanto mais úmido for o solo, maior será o processo de difusão (NYE; TINKER, 1977; BARBER 1995, NOVAIS; SMYTH, 1999).

A presença ou ausência de fósforo altera o desenvolvimento das plantas, estimulando a produção de fitomassa da raiz ou forçando mudanças na arquitetura das mesmas (LÓPEZ-BUCIO et al., 2002). Experimentos realizados mostraram que, sob condições de baixa disponibilidade de P, há maior exploração do solo pelas raízes em busca de nutrientes, enquanto que onde havia maior disponibilidade de P, houve maior ramificação, maximizando assim a utilização do solo (LYNCH, 1995; TERUEL et al., 2000). Segundo Mackay e Barber (1985), a umidade do solo interfere diretamente no desenvolvimento radicular. Portanto, a umidade do solo atua de forma direta e indireta no fornecimento de P para as plantas, visto que este é absorvido em sua maioria pelo processo de difusão, que depende da presença de água e da superfície radicular (BARBER, 1974; GAHOONIA, 1994).

O fósforo se movimenta no solo tanto no sentido horizontal quanto no sentido vertical (BAR-YOSEF; SHEIKHOLSLAMI, 1976). Isso pode ser explicado pelo fato de o movimento do P ser muito influenciado pelo fluxo de água.

O efeito do conteúdo de água do solo sobre a difusão de P foi estudado por Ruiz (1986). O estudo, que contou com três potenciais matriciais de água no solo e quatro doses de P, em vasos cultivados com plantas de soja, mostrou que, mesmo com doses mais elevadas de P, as respostas à absorção foram mais acentuadas quando houve alteração no volume de água no solo. Costa et al. (2006), estudando o efeito

dos níveis de umidade e das doses de P sobre o fluxo difusivo de fósforo, verificaram que o fluxo difusivo do fósforo sofreu influência da umidade do solo e das doses de fósforo, sendo os maiores níveis os mais eficientes na difusão. Em trabalho realizado por Miola et al. (2000), onde estudava-se a o teor de água sobre a extração de fósforo, observou-se que em solo saturado com água, a extração de P foi consideravelmente maior do que no solo com 75% da capacidade de campo, o que pode ser explicado pelo maior fluxo difusivo.

2.3 Aplicação localizada do fósforo

Nos solos mais intemperizados, com baixa fertilidade natural, as limitações nutricionais geralmente estão ligadas tanto à própria baixa disponibilidade de nutrientes quanto às restrições no transporte de nutrientes da solução do solo até a superfície das raízes (CARVALHO, 1998). Sendo assim, o P merece maior atenção devido a sua baixa mobilidade no solo, levando em consideração sua localização em relação à semente ou raiz da planta, o que não tem tanta importância para elementos como o nitrogênio, de grande mobilidade no solo.

O fósforo movimenta-se basicamente por difusão e a curtas distâncias. Em vista disso, o fosfato que está próximo da zona de absorção de raiz encontra-se em posição disponível para absorção (BARBER, 1995).

Segundo Prado et al. (2001), o modo de aplicação de P no solo, a lanço ou localizado é muito discutido. Na aplicação a lanço, o fertilizante fosfatado vai entrar em contato com uma maior área de solo, tendo como consequência aumento na adsorção e diminuição no aproveitamento do nutriente pela planta. Já a aplicação localizada, por entrar em contato com um menor volume de solo, possibilita diminuição na adsorção de P e maior aproveitamento deste, visto que o sistema radicular estará mais próximo do fósforo proveniente do adubo (MALAVOLTA, 1980; LEITE et al., 2009).

A forma de localizar fertilizantes fosfatados solúveis em parte do volume de solo cultivado, no sentido de otimizar o uso de P pelas plantas, é prática recomendável para a exploração da maioria dos solos brasileiros, deficientes e com elevado poder tampão para este nutriente (LEITE et al., 2006).

A aplicação localizada de P, em menor volume de solo, tem a vantagem de retardar e diminuir sua adsorção pelas partículas do solo, uma vez que se reduz o

contato do mesmo com os potenciais sítios de adsorção. No entanto, isso pode influenciar a taxa de absorção do nutriente pela planta visto que apenas parte do sistema radicular entra em contato com a área de alta concentração de P.

Alguns trabalhos realizados demonstraram que o suprimento de P localizado, estando exposto a apenas parte do sistema radicular, resultou em menor produção de matéria seca e menor concentração de P na parte aérea (JUNGK & BARBER, 1974; ANGHINONI; BARBER, 1980; NOVAIS et al., 1985). No entanto, o menor volume de solo com aplicação de P é compensado pela maior densidade e crescimento de raízes na área fertilizada, o que pode compensar a baixa disponibilidade de P na área sem contato com o fertilizante fosfatado (ANGHINONI; BARBER, 1980).

Em estudo realizado por Alves et al. (1999), comparando o fornecimento de P para parte ou todo o sistema radicular em plantas de milho, apesar de não diferir na produção de matéria seca, verificou-se que o acúmulo de P na parte aérea foi maior quando este elemento foi fornecido a todo o sistema radicular, e não só parcialmente. Além disso, constatou-se também que, quando apenas parte do sistema radicular estava em contato com o P fornecido, a parte do sistema radicular suprida com P não foi capaz de suprir sozinha, adequadamente, a porção que não estava em contato com o nutriente. Resultados semelhantes foram obtidos por Prado et al. (2001). Avaliando a resposta do milho ao modo de aplicação do adubo fosfatado, esses autores observaram que o teor foliar de P foi maior na aplicação localizada.

Quando uma fonte fosfatada é aplicada de forma localizada, no sulco ou cova, inicialmente a planta estará exposta a uma região do solo com alta disponibilidade de P, o que diminui a medida que a planta cresce e passa a explorar um volume de solo com menor disponibilidade deste nutriente, o que, segundo Zhang & Barber (1992), pode restringir o crescimento de raiz e parte aérea.

Kaminski e Peruzzo (1977) apresentaram resultados, na cultura da soja, em que aplicações de um fosfato reativo na linha de plantio promoveram maior rendimento de grãos do que quando o produto foi aplicado a lanço. Isso pode ser explicado pelo fato de o fertilizante ter contato com um menor volume de solo e, portanto, ser menos passível de ser fixado pelo mesmo.

2.4 Importância das substâncias húmicas nos solos

A matéria orgânica do solo, ao sofrer decomposição, pode ser dividida em dois grupos fundamentais constituídos basicamente por substâncias não húmicas e substâncias húmicas. O primeiro é formado por compostos simples, de estrutura bem definida e em estágio inicial de decomposição (MENDONÇA; MATOS, 2005). O segundo é representado pelo húmus, material este em estágio avançado de decomposição, formando compostos de coloração escura e elevado peso molecular, estáveis e de difícil degradação (STEVENSON, 1994; OLIVEIRA, 2010).

A formação do húmus dá origem a três frações húmicas: ácidos húmicos, fúlvicos e huminas (STEVENSON, 1994). Estes compostos apresentam características semelhantes, mas diferem em peso molecular, solubilidade, reatividade e grupos funcionais (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003). Essas substâncias interagem no solo interferindo nas propriedades químicas, físicas e biológicas (CANELLAS et al, 1999; EYHERAGUIBEL; SILVESTRE; MORARD, 2008).

Nos últimos anos, têm-se discutido bastante sobre o papel das substâncias húmicas na adsorção de P. Estudos têm evidenciado que a presença destes compostos pode diminuir a adsorção de fósforo. Segundo Cessa et al. (2010), a adição de substâncias húmicas no solo aumenta os teores de ácidos húmicos e fúlvicos, que, por competirem pelos mesmos sítios de adsorção que o P, têm papel fundamental na disponibilidade deste elemento no solo. Esse efeito é atribuído ao fato de que, as substâncias húmicas, por possuírem grupos funcionais $-OH$ e $-COOH$, geram cargas negativas e interagem na superfície dos minerais (GUPPY et al., 2005).

No entanto, a eficiência das substâncias húmicas em diminuir a fixação de P não se deve exclusivamente à presença dos grupos carboxílicos que bloqueiam os sítios de adsorção, deve-se também considerar a interação dos ácidos húmicos com o Fe, Al e o Ca livres na solução do solo formando quelatos, o que reduz a precipitação do fosfato em formas insolúveis aumentando a disponibilidade para as plantas (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; BRADY; WEIL, 2013).

O P reage ainda com substâncias orgânicas presentes no solo de modo indireto: uma ponte metálica se forma, geralmente na presença de Fe e Al, e liga o P ao radical orgânico das substâncias húmicas, gerando o chamado complexo P-metal-SH. Diferentemente do que ocorre quando há a adsorção do P nas superfícies dos

óxidos de Fe e Al, esse complexo pode ser dissolvido por ácidos orgânicos, tendo assim grande relevância na disponibilidade do fósforo presente na solução do solo (GERKE, 2010).

É evidente, no entanto, que a eficiência na redução da adsorção de fósforo na presença de ácidos orgânicos, como as substâncias húmicas, é diretamente ligada à concentração destes compostos no solo. Mesmo que em baixas concentrações também haja redução da adsorção de P, quanto maiores forem as concentrações de ácidos orgânicos no solo, maior será a competição pelos sítios de adsorção (STEVENSON, 1994; PAVINATO; ROSOLEM, 2008), bem como formação de complexos com Fe e Al.

Estudos realizados por Andrade et al. (2003) demonstraram que a presença de ácidos orgânicos, dentre eles os ácidos húmicos, fez com que a adsorção de P diminuísse. O mesmo foi observado por Bezerra (2014), onde houve incremento do teor de P disponível no solo em função da aplicação de extrato de turfa em dois solos.

Matias (2010), estudando a eficiência da utilização de ácidos húmicos na disponibilidade de fósforo comprando duas fontes de P e em dois solos, observou que na presença destas substâncias houve menor adsorção e maior eficiência no aproveitamento de P. Cessa et al. (2010) constataram o mesmo, quando estudando a adsorção de P em diferentes minerais de argila e dois tipos de Latossolo, verificaram que a presença de substâncias húmicas reduziu a adsorção de P.

No entanto, Guppy et al. (2005) demonstraram que a adição de substâncias húmicas no solo também pode ter efeito antagônico, de modo que pode diminuir ainda mais a disponibilidade P, dependendo da sua concentração e pH do meio. Isso demonstra a necessidade de novos estudos e resultados envolvendo substâncias húmicas e adubação fosfatada.

2.5 Fracionamento do Fósforo

A utilização das técnicas de fracionamento de P identificam as formas como este elemento encontra-se no solo, como estas estão distribuídas (STEWART; TIESSEN, 1987) e sua contribuição na capacidade de suprimento de P para as plantas. Várias técnicas de fracionamento de P vêm sendo utilizadas, destacando-se os métodos propostos por Chang; Jackson (1957) e por Hedley et al. (1982) modificado por

Condrón e Goh (1989), sendo este último uma das metodologias mais aceitas (GATIBONI et al., 2013). Estas técnicas variam entre si no número de extrações, nas formas de P extraídas, bem como na ordem e tipo de extrator.

Visto que as frações de P tem um comportamento similar em solos diferentes (GUO et al., 2000), independentemente do tipo de solo e dos processos a que este tem sido submetido, o método desenvolvido por Hedley et al. (1982) extrai frações orgânicas e inorgânicas do fósforo de acordo com a sua disponibilidade. A extração a partir da resina trocadora de íons (RTA) e bicarbonato de sódio (NaHCO_3) são consideradas formas lábeis, que estão em equilíbrio com a solução do solo. As formas de P extraídas por hidróxido de sódio (NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$), são consideradas formas moderadamente lábeis quimissorvidas nos óxidos de Fe e Al presentes nos solos. Os extractores NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e HCl 1 mol L^{-1} são as formas consideradas não lábeis, e estes estão oclusos nos minerais de argila e ligados fortemente ao cálcio, respectivamente. No entanto, a separação entre as formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis é apenas uma classificação para demonstrar que o P se liga aos colóides do solo de diferentes maneiras com energias de ligação diferentes, determinando assim a capacidade que as frações de P têm de suprir a solução do solo (GATIBONI et al., 2013).

Cross e Schlesinger (1995) separaram ainda as frações obtidas por meio do fracionamento de Hedley como P geoquímico e P biológico, onde o P geoquímico é a soma das frações inorgânicas (Resina, NaHCO_3 , NaOH $0,1$, NaOH $0,5$ e HCl) com o P residual, e o P biológico representa a soma das frações orgânicas (NaHCO_3 , NaOH $0,1$ e NaOH $0,5$). Em sistemas de produção onde a prática da adubação fosfatada é corriqueira, ocorre um acúmulo de P inorgânico, em especial nas camadas mais superficiais do solo, e a absorção do fósforo pela planta se dá predominantemente nesta forma, ocorrendo acúmulo do P orgânico.

A extração sequencial do fósforo fornece informações importantes sobre a dinâmica da labilidade e mudanças no comportamento das frações de P no solo, o que determina a importância dos processos biológicos e geoquímicos sobre o fósforo no solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

3. Material e Métodos

Foram conduzidos dois experimentos, em laboratório e em casa de vegetação, no Departamento de Agricultura e Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, campus de Botucatu.

3.1 Coleta, correção e caracterização do solo

Para ambos os experimentos, o solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 2006), com baixo teor de P disponível e de textura argilosa, coletado da camada arável (0-20 cm) de uma área em pousio na Fazenda Lageado – UNESP/FCA em dezembro de 2015. Assim que coletado, o solo foi peneirado em peneira com malha de 2 mm, homogeneizado, e uma amostra foi destinada a análises físicas, para determinações granulométricas (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1), e químicas, para determinação das características da fertilidade do solo seguindo procedimentos descritos por Raij et al. (2001) (Tabela 2).

Tabela 1 - Características granulométricas do solo utilizado nos experimentos.

Areia	Argila	Silte	Textura
g Kg⁻¹			
426	463	111	Argiloso

Tabela 2 - Caracterização química do solo utilizado nos experimentos antes da aplicação de calcário

pH	M.O.	P	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
CaCl ₂	g dm ³	mg dm ³	----- mmol _c dm ³ -----						%
3,9	19	5	27	0.5	3	2	6	33	17

A partir de dados obtidos com a caracterização química do solo, foi realizada a aplicação de um calcário calcítico (PRNT 96,8%) visando elevar a saturação por bases a 70% (Raij et al., 1996). Após a incorporação do calcário no solo, este foi umedecido, incubado por 45 dias e, após esse período, uma nova amostra de solo foi coletada e submetida novamente à análise química (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização química do solo utilizado nos experimentos após aplicação de calcário

pH	M.O.	P	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
CaCl ₂	g dm ³	mg dm ³	----- mmol _c dm ³ -----						%
5,8	20	7	23	0.5	36	16	52	75	70

3.2 Caracterização dos fertilizantes

Nesse experimento foram utilizadas duas formas de superfosfato simples, sendo eles nas formas convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH). As substâncias húmicas utilizadas no processo de recobrimento dos grânulos são obtidas a partir da Leonardita. Os materiais foram adquiridos diretamente com o fabricante e os teores de P₂O₅ solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água e dos demais componentes foram fornecidos pelo mesmo (Tabela 4).

Tabela 4 - Composição elementar dos fertilizantes fosfatados utilizados na condução dos experimentos

	P ₂ O ₅ (CNA + água)	N	Ca	S	SH
	----- (%) -----				
CONV*	17	3	16	9	-
CONV**	21	-	17	11	-
RSH***	18	2	18	11	0,5

CONV: fertilizante convencional; RSH: fertilizante revestido por substâncias húmicas

*Fertilizante utilizado no primeiro

**Fertilizante utilizado no segundo experimento

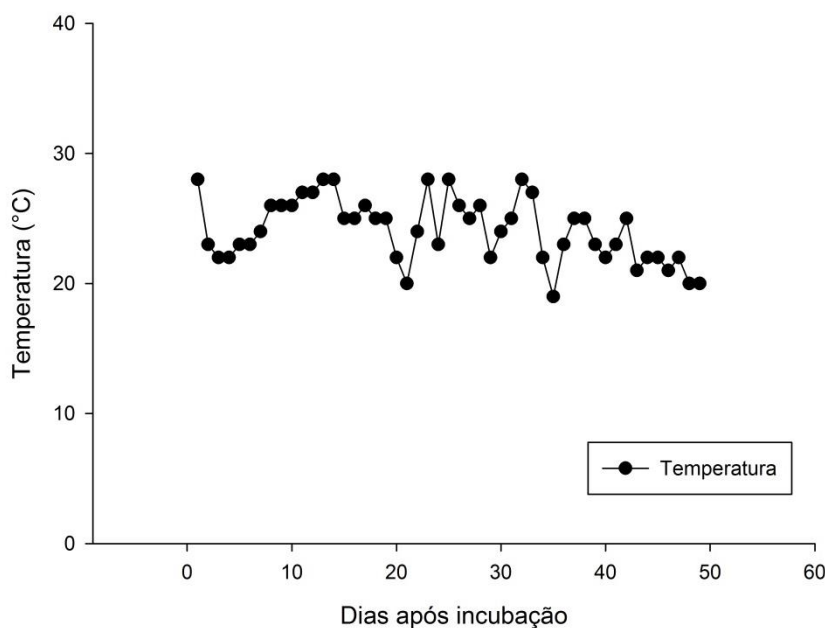
***Fertilizante utilizado em ambos os experimentos

3.3 Estudo da mobilidade de P em placas de Petri

O experimento foi conduzido em laboratório, sem controle de temperatura e umidade. Durante o período de condução do experimento, foram coletados dados diários de temperatura (Figura 1), observando-se temperatura média de 23°C.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado e os tratamentos dispostos em esquema fatorial 4 x 2 com 4 repetições, sendo 4 umidades baseadas na capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo (20, 40, 60 e 80%) e 2 fertilizantes (convencional e revestido por substâncias húmicas).

Figura 1 - Temperaturas médias registradas durante a condução do experimento no laboratório de apoio.



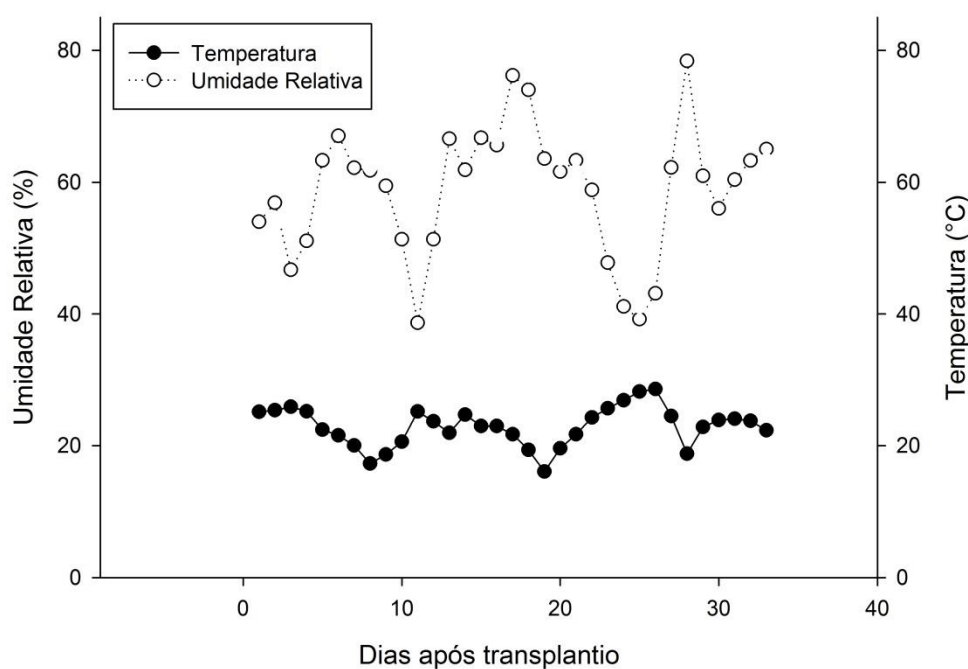
O experimento consistiu na incubação de placas de petri preenchidas com solo, juntamente com o fertilizante fosfatado, em procedimento semelhante ao adotado por Lombi et al. (2004), Degryse et al. (2013) e Silva (2013). Para fins de comparação, foi conduzido também um tratamento controle, representado por placas de petri contendo somente o solo, sem a adição do fertilizante fosfatado, para cada uma das unidades adotadas nos tratamentos.

3.4 Estudo da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com controle parcial de temperatura e sem controle de umidade. A temperatura média e a umidade relativa foram medidas diariamente com o auxílio de um dataloger (Marca EXTECH, modelo RHT10) (Figura 2).

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Considerou-se como parcela principal a aplicação de 2 fertilizantes fosfatados (convencional e revestido por substâncias húmicas), em diferentes profundidades, e as subparcelas como as distâncias de amostragem do ambiente rizosférico a partir da separação das raízes.

Figura 2 - Valores médios de temperatura e umidade relativa registrados durante a condução do experimento em casa de vegetação.



O experimento consistiu na utilização de dispositivos denominados Plant Growth Containers (PGCs), semelhantes aos desenvolvidos por Chen et al., 2002, que criam um ambiente rizosférico passível de ser analisado separadamente das raízes.

3.5 Implantação e condução do experimento

3.5.1 Incubação das placas de petri e avaliação da mobilidade do fósforo

A mobilidade do fósforo foi avaliada em placas de Petri plásticas (86 mm de diâmetro e 13 mm de altura) preenchidas com solo.

A fim de se determinar a capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo, uma amostra de solo peneirado foi coletada e submetida à secagem em estufa de circulação forçada a 105°C até atingir peso constante. Ao atingir peso constante, 50g desse solo seco foram colocados em um funil revestido por um papel filtro, apoiado em um recipiente, e 50g de água deionizada foram adicionados sobre o solo. O conjunto foi coberto, para evitar perdas de água por evaporação e, após 3 horas, a água contida no recipiente foi aferida para se determinar a quantidade de água retida no solo. Um segundo teste, sem a amostra de solo, foi realizado para verificar o volume de água retido no papel filtro, que foi posteriormente descontado

do volume total de água adicionado. Dessa forma, obteve-se então a quantidade máxima de água retida no solo e, a partir desse volume, estabeleceu-se a quantidade de água necessária para atingir as umidades adotadas na incubação do solo nas placas de petri.

Antes de o solo ser adicionado na placa, uma amostra do mesmo foi colocada novamente em estufa de circulação forçada a 105°C para se determinar a umidade presente neste. Após determinada a umidade, com a ajuda de uma balança, adicionou-se o volume de solo necessário para atingir a densidade de 1,2 g cm⁻³. Uma vez preenchidas as placas, com a ajuda de borrifador e conta-gotas, o solo foi umedecido com água deionizada a fim de se atingir as umidades previamente estabelecidas pelo teste de capacidade máxima de retenção de água gravitacional e as placas de Petri foram então fechadas, vedadas com filme plástico e incubadas durante 24 horas, de modo que a água fosse uniformemente distribuída por todo o solo. Passado esse período, as placas foram abertas e um grânulo de fertilizante fosfatado, contendo 8,8 mg de P, foi depositado exatamente no centro de cada uma das placas em profundidade suficiente para que fosse recoberto pelo solo, com exceção do tratamento controle. Os grânulos foram selecionados por meio do seu peso, de forma que atingissem o teor adequado, com variação máxima de 5%. Após a aplicação do fertilizante fosfatado, as placas foram novamente vedadas e incubadas por 50 dias. Diariamente as placas de Petri eram pesadas para manutenção da umidade estabelecida e, quando necessário, adicionava-se água deionizada para se elevar o teor de água até os níveis adequados.

Ao fim do período de incubação, com o auxílio de cilindros plásticos, o solo foi amostrado em círculos concêntricos, partindo do ponto onde foi depositado o grânulo de fertilizante, com raios de 0-7,5; 7,5-13,5; 13,5-25,5; 25,5-43,0 mm. A fim de se obter quantidades suficientes de solo amostrado para análise, foram conduzidas 4 sub-repetições para cada repetição que, juntas, foram consideradas uma única repetição. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, secas ao ar e posteriormente moídas e peneiradas em peneira de malha 2 mm para posteriores análises químicas. O remanescente dos grânulos do fertilizante não dissolvidos durante a incubação foi moído e homogeneizado juntamente com a amostra de solo recolhida a primeira secção de amostragem (0-7.5mm). Os solos foram analisados quanto ao pH em CaCl₂ e a mobilidade de fósforo nas amostras foi determinada por meio da análise de P disponível em resina trocadora de íons (RTA),

seguindo procedimento proposto por Raij et al. (2001), e teor de P total, determinado em solução ácida nitroperclórica (5:3) (OLSEN; SOMMERS, 1982). As leituras para determinação dos teores de fósforo foram realizadas em espectrofotômetro (Modelo 600S, FEMTO) pelo método do azul do complexo fosfoantimonilmolibdênio (MURPHY; RILEY, 1962).

3.5.2 Montagem dos PGCs e avaliação da eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados

Os PGCs são compostos por dois compartimentos que se encaixam. A parte superior de cada PGC foi preenchida com areia grossa, lavada e esterilizada, livre de impurezas, onde sementes de milho foram depositadas. O compartimento inferior, após verificação da umidade, foi preenchido com o solo seco e peneirado de forma que, com a ajuda de uma balança, fosse atingida a densidade de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$. De forma a separar os compartimentos, três camadas de tecido de nylon foram colocadas entre estes para que não houvesse contato entre o conteúdo de cada um deles. A extremidade inferior do compartimento de baixo também foi vedada com o mesmo tecido para evitar perdas de solo e, ao mesmo tempo, permitir o movimento de ascensão da água por capilaridade. O fertilizante fosfatado foi aplicado no compartimento inferior do PGC, em diferentes profundidades, tendo a malha de nylon como referência. A profundidade 0,0 cm correspondeu à aplicação do fertilizante na extremidade superior do compartimento de baixo, entrando em contato direto com a malha que separava o solo da areia colocada no compartimento de cima. Na profundidade 0,5 cm, o fertilizante fosfatado foi aplicado 5 mm abaixo da extremidade superior do compartimento e assim sucessivamente, até a profundidade 2,0 cm. A dose adotada simulou uma dose de 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Optou-se por utilizar areia no compartimento superior para que o suprimento de P para as plantas fosse proveniente apenas do solo contido no compartimento inferior, avaliando-se assim a mobilidade do nutriente.

Os PGCs foram colocados em bandejas plásticas contendo água deionizada, cujo nível foi mantido constante adicionando-se mais água quando necessário. Como o fornecimento de nutrientes via fertilizante visou apenas o fósforo, 50 ml de uma solução nutritiva (Tabela 5), adaptada de Hoagland, foi aplicada a cada 5 dias

em cada PGC a partir de 7 dias após o transplântio, ou conforme necessidade das plantas.

Tabela 5 - Solução nutritiva adaptada de Hoagland

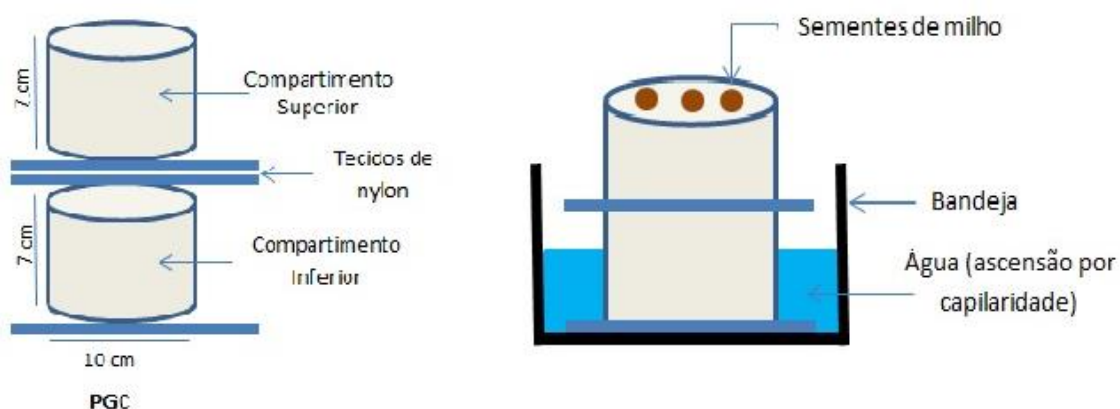
Macronutrientes		Micronutrientes	
	mg dm ⁻³		µg dm ⁻³
N	210	B	0,5
K	234	Zn	0,05
Ca	200	Mn	0,5
Mg	48	Cu	0,02
S	64	Mo	0,01

As sementes de milho utilizadas foram sementes híbridas de tecnologia Roundup Ready® (NK603), comercializadas pela empresa Morgan, tratadas com Maxim® XL, ACTELLIC® 500 CE e K-Obiol® 25 CE. As sementes foram pré germinadas e transplantadas após protrusão da radícula. Foram depositadas 8 sementes por PGC e, após 5 dias, realizou-se desbaste deixando 5 plantas por PGC. Ao fim dos 33 dias de condução do experimento, contados a partir do transplântio das sementes pré germinadas, os PGCs foram desmontados cuidadosamente de forma que o solo contido no compartimento de baixo permanecesse intacto. As plantas, separadas em parte aérea e raiz, foram secas em estufa de circulação forçada a 60°C até atingir peso constante para determinação da massa de matéria seca (MMS), procedendo-se a pesagem e a moagem em moinho tipo “Willey” para determinação do teor de P segundo Malavolta et al. (1997).

O solo contido no compartimento inferior do PGC, com o auxílio de um “fatiador de solo” desenvolvido para tal fim, foi fatiado nas distâncias 0,0-0,5; 0,5-1,0; 1,0-2,0; 2,0-5,0; 5,0-10,0; 10,0-20,0 mm a partir da extremidade superior do compartimento, seco ao ar, peneirado em peneira de malha 2 mm e submetido a extração sequencial do P de acordo com a metodologia descrita por Hedley et al. (1982), com modificações de Condrón e Goh (1989), descrito em detalhes por Gatiboni (2013). A extração sequencial de P consiste na utilização de diferentes extratores, em uma mesma alíquota de solo, descrita a seguir: Amostras de 0,5g de solo são submetidas primeiramente à extração via resina de troca aniônica, que extrai formas lábeis de fósforo no solo, seguida da extração por NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹, extraíndo formas moderadamente lábeis de P. Dando sequência, o NaOH 0,1 mol L⁻¹ extrai as frações de fósforo ligadas ao óxidos de Fe e Al e o extrator HCL 1,0 mol L⁻¹ o P associado

ao Ca. O último passo do fracionamento consiste na extração de P via NaOH 0,5 mol L⁻¹ que corresponde ao fósforo não lábil. Nos extratos alcalinos, o P foi determinado a partir da digestão com persulfato de amônio e ácido sulfúrico em autoclave (USEPA 1971) para determinação de P total em cada extrator. O P dos extratores ácidos foi determinado segundo método de Murphy e Riley (1962), dando origem aos valores de P inorgânico (Pi). O teor de P total das amostras foi determinado por solução ácida nitroperclórica (5:3) seguindo metodologia proposta por Olsen e Sommers (1982). As leituras para determinação dos teores de fósforo foram realizadas em espectrofotômetro (Modelo 600S, FEMTO) pelo método do azul do complexo fosfoantimomolibdênio (MURPHY; RILEY, 1962).

Figura 3 - Representação esquemática dos Plant Growth Containers (PGCs).



3.6 Análise Estatística

Para o experimento de incubação em placas de Petri, as seções de amostragem foram analisadas separadamente em função das umidades adotadas e dos fertilizantes fosfatados aplicados. Os dados foram submetidos a análise de variância, teste F a 5% de probabilidade, e, quando apresentaram significância, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD, $p < 0.05$), utilizando o software SISVAR, versão 5.5. O efeito das umidades adotadas foi analisado por meio de regressão e as curvas foram ajustadas com base no teste F com significância de $p < 0,05$.

Para o segundo experimento, as profundidades de aplicação dos fertilizantes fosfatados foram analisadas separadamente em função dos fertilizantes e das distâncias de amostragem a partir da separação das raízes. Os dados foram submetidos a análise de variância, teste F a 5% de probabilidade, e, quando

apresentaram significância, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD, $p < 0.05$), utilizando o software SISVAR, versão 5.5.

4. Resultados e Discussão

4.1 Estudo da mobilidade de P em placas de Petri

4.1.1 pH do solo

Segundo Lindsay et al. (1962), após a aplicação de fertilizantes no solo, uma série de reações é desencadeada a fim de se liberar os nutrientes contidos nos materiais, reações essas que são dependentes da umidade do solo e que interferem diretamente nas características químicas na região em torno dos grânulos. O efeito acidificante dos fertilizantes foi observado até a segunda secção de amostragem (Tabela 6), resultado da interação do pH do próprio fertilizante com o pH do solo. No geral, a acidificação foi mais acentuada quando adicionado o fertilizante convencional, sobretudo em condições de menor disponibilidade de água. A dissolução dos fertilizantes acidificou o solo principalmente na região onde o grânulo foi depositado (secção 0-7.5mm). Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a dissolução do fosfato monocálcico, principal componente do superfosfato simples, gera soluções saturadas extremamente ácidas, o que pode ocasionar alterações no pH do meio (LINDSAY; STEPHENSON, 1959).

Todas as secções de amostragem com umidade correspondente a 40% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional ou menos apresentaram pH inferior às demais (Tabela 6). Isso pode estar relacionado à utilização de calcário na correção do solo antes da instalação do experimento. Tendo em vista que as reações de neutralização do calcário são dependentes da umidade do solo, os tratamentos que receberam maiores quantidades de água podem ter intensificado tais reações durante a condução do experimento (NOLLA et al., 2009). Além disso, em situações de altas umidades, ao se adicionar o grânulo de fertilizante, a diluição tende a ser maior durante o processo de difusão resultando em soluções menos saturadas e, conseqüentemente, menos ácidas (DEGRYSE et al., 2014), tendo assim menor poder de alterar o pH do solo.

Em média, após o período de incubação, nos tratamentos com menor umidade o pH foi mantido mais próximo ao valor inicial nas regiões mais afastadas do local de deposição do grânulo e, nas secções centrais, houve variação no pH de aproximadamente 0,3. Nas placas de petri que receberam maiores quantidades de água a variação entre as secções de amostragem não foi grande.

Tabela 6 - Valores médios de Ph (CaCl_2) do solo em função do fertilizante fosfatado (CONV e RSH) e das umidades adotadas (20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional) após a incubação das placas de Petri por 50 dias.

Seções de Amostragem	Fertilizantes	Umidade (%)				Média
		20	40	60	80	
Mm						
0 - 7,5	CONV	5,2 bC	5,3 bC	5,5 bB	5,7 aA	5,4 b
	RSH	5,4 aB	5,5 aB	5,8 aA	5,8 aA	5,6 a
	Média	5,3 B	5,4 B	5,6 A	5,7 A	
7,5 - 13,5	CONV	5,6 aA	5,5 aA	5,6 bA	5,7 bA	5,6 b
	RSH	5,6 aB	5,5 aB	5,9 aA	5,9 aA	5,7 a
	Média	5,6 B	5,5 B	5,8 A	5,8 A	
13,5 - 25,5	CONV	5,6 aA	5,7 aA	5,7 aA	5,7 aA	5,7 a
	RSH	5,6 aB	5,6 aB	5,9 aA	5,8 aA	5,7 a
	Média	5,6 B	5,7 B	5,8 A	5,8 A	
25,5 - 43,0	CONV	5,6 aB	5,7 aA	5,8 aA	5,7 aA	5,7 a
	RSH	5,6 aB	5,7 aAB	5,8 aA	5,8 aA	5,7 a
	Média	5,6 B	5,7 A	5,8 A	5,8 A	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Observou-se ainda que a umidade tem influência direta na acidificação do meio. Na primeira secção de amostragem (0-7,5 mm), houve uma variação no pH do solo de 0,41 entre os tratamentos com 80% e 20% de umidade (Tabela 6). Além disso, nota-se que a aplicação do fertilizante convencional, para todas as umidades, resultou em pH mais ácido do que a aplicação do fertilizante revestido por substâncias húmicas. O mesmo comportamento foi observado em todas as secções de amostragem, porém com variações menos expressivas. A leve elevação do pH do solo dos fertilizantes que contém substâncias húmicas pode ser atribuída à adsorção de íons H^+ nos grupos funcionais de superfície dos compostos orgânicos (MIYAZAWA et al., 1993). À medida que aumenta a distância do grânulo, a acidificação causada pela dissolução passa a ser dissipada até não ocorrer mais alteração de pH (GILKES; LIM-NUNEZ, 1980; SILVA, 2013). Isso porque o poder tampão do solo limita tal transformação somente a região mais próxima do grânulo (DEGRYSE et al., 2013). Os resultados obtidos nesse experimento estão de acordo com os resultados observados por vários outros pesquisadores que também encontraram alterações expressivas no pH em torno do grânulo do fertilizante (LOMBI et al., 2004; SILVA, 2013; MONTALVO et al., 2014).

4.1.2 P disponível

A interação dos fatores umidade e fertilizante quanto ao teor de P disponível foi observada na maioria das secções de amostragem com exceção da secção 23,5-43,0 mm, onde ocorreu diferença significativa para o fator fertilizante (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância (valores de *p*) em função da aplicação de fertilizantes (CONV e RSH) e as umidades provenientes da capacidade máxima de retenção de água gravitacional (20, 40, 60 e 80%) nas secções de amostragem (0,0-7,5; 7,5-13,5; 13,5-23,5; 23,5-43 mm) após período de incubação.

Fonte de variação	Distância de amostragem (mm)			
	0,0 - 7,5	7,5 - 13,5	13,5 - 23,5	23,5 - 43,0
Umidade (U)	0,000	0,000	0,000	0,721
Fertilizante (F)	0,000	0,000	0,005	0,009
U x F	0,000	0,005	0,000	0,872
CV %	6,66	7,23	10,22	14,73

A maior parte do P permaneceu na região onde o grânulo foi aplicado e os teores de P disponível diminuíram com o distanciamento do ponto de deposição do grânulo, conforme já era esperado. Enquanto os teores de P disponível na primeira secção de amostragem (0,0-7,5mm) foram em média 718 ppm, os teores da secção mais afastada do centro (23,5-43mm) se mantiveram próximos à testemunha (Figura 3). Resultados semelhantes foram observados por Degryse et al. (2013) em diferentes tipos de solo. Silva (2013), testando diferentes tipos de fertilizantes fosfatados, constatou que o fluxo difusivo de P ocorreu somente até a terceira secção de amostragem.

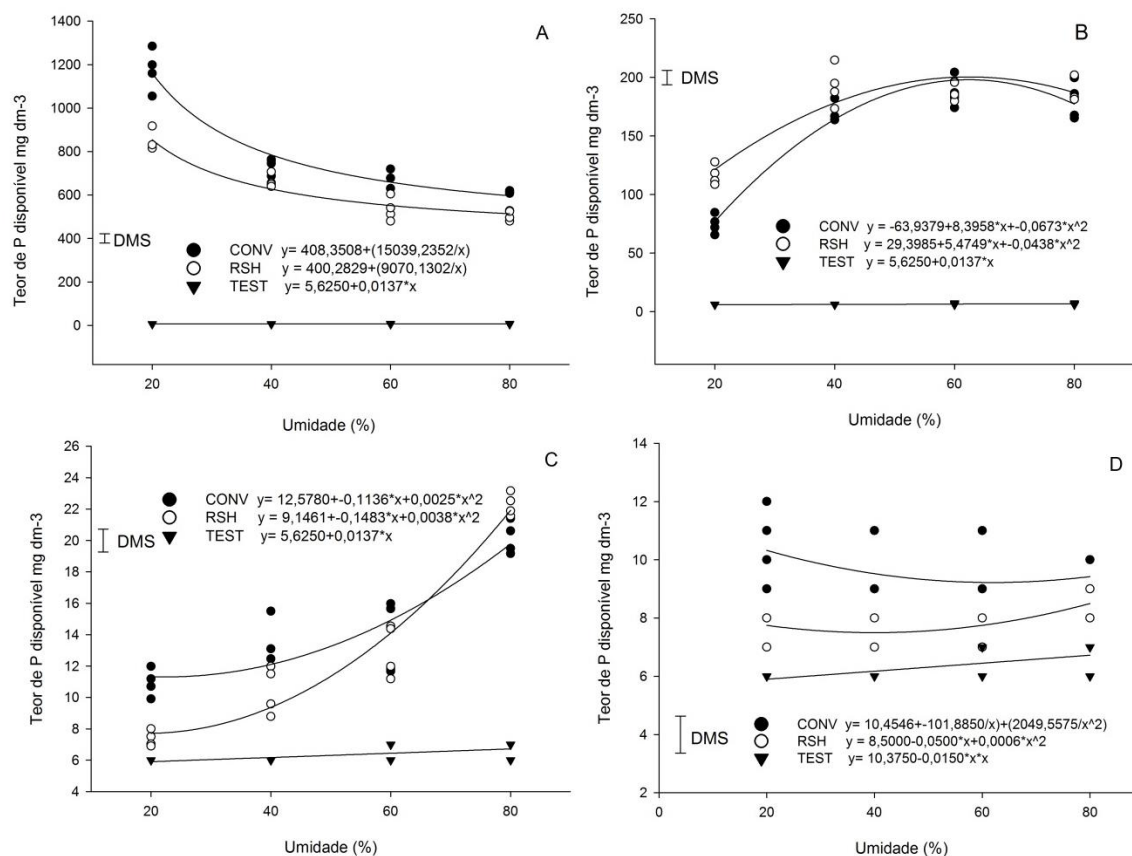
O efeito do teor de água do solo na difusão dos nutrientes é amplamente conhecido (NYE; TINKER, 1977). No presente trabalho, foram encontradas diferenças significativas entre as umidades para todas as secções de amostragem, exceto na secção da região mais afastada da deposição do grânulo (23,5-43,0 mm). Observa-se que na região central (0,0-7,5mm), quanto menor a umidade adotada, maior a quantidade de P disponível, enquanto na segunda secção de amostragem, quanto maior a umidade, maior o teor de P disponível (Figura 3) evidenciando assim que, quanto menor a umidade, menor o fluxo difusivo do fósforo, fazendo com que haja uma maior concentração do nutriente na região próxima ao grânulo. O mesmo comportamento também foi observado na terceira secção de amostragem. Resultados semelhantes foram apresentados por Degryse et al. (2014) que, em função do tempo de incubação, encontraram maiores concentrações de P em

regiões mais distantes da localização de deposição do grânulo em tratamentos com conteúdo volumétrico de água maior. McBeath et al. (2012) testando o fluxo difusivo do MAP em um solo com baixa umidade e um solo com alta umidade, verificaram que, apesar de o fertilizante incubado no solo seco ter uma labilidade maior do que no solo com maior umidade, a difusão do P foi limitada. Costa et al. (2006), avaliando os efeitos do conteúdo volumétrico de água e de doses de fósforo no seu fluxo difusivo no solo, verificaram que quanto maior o conteúdo de água, maior o fluxo difusivo de fósforo. Mesmo quando não se adicionou fósforo ao solo, ainda se observou fluxo difusivo crescente com os níveis de umidade.

Os principais fatores que afetam o fluxo difusivo do P, juntamente ao teor de água, são a capacidade do solo de adsorvê-lo e a quantidade de P lábil adicionada ao se aplicar o fertilizante no solo. A concentração em volta do grânulo de fertilizante, por ser inicialmente muito alta, afeta as reações de adsorção e precipitação (BOLLAND; GILKES, 1998). Altas concentrações de P no entorno do grânulo do fertilizante podem induzir reações de precipitação, que podem ser diminuídas na presença de altas umidades por diminuírem a saturação da solução, disponibilizando assim mais fósforo (DEGRYSE et al., 2014). A aplicação de fosfatos junto com substâncias orgânicas também tem evidenciado um aumento na disponibilidade de P para a planta (BOLAN et al., 1994).

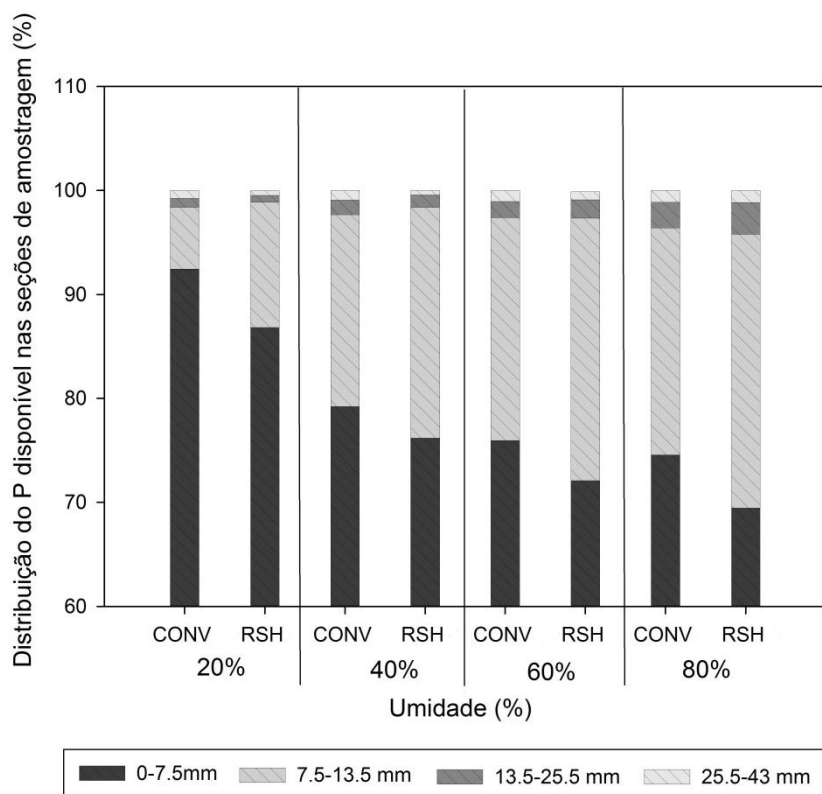
Avaliando o comportamento dos fertilizantes, observou-se que o fertilizante revestido por substâncias húmicas apresentou, para todas as umidades, teores mais baixos de P que o fertilizante convencional na região de deposição do grânulo e concentrações mais altas na segunda secção de amostragem, sugerindo haver um maior fluxo difusivo na presença de substâncias húmicas. As diferenças foram mais expressivas sobretudo em condições de baixa umidade (Figura 3). A partir da segunda secção de amostragem, não houve diferença significativa entre os fertilizantes para as umidades correspondentes a 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional.

Figura 4 - Teores médios de P disponível (RTA) para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) e para a testemunha (TEST) sem fertilizante nas umidades de 20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo, nas secções de amostragem 0,0-7,5 mm (A); 7,5-13,5mm (B); 13,5-25,5mm (C) e 25,5-43,0mm (D).



Em trabalho recente, Duarte et al. (2013) verificaram que o uso de substâncias húmicas no revestimento do MAP influenciou positivamente a disponibilidade de fósforo na solução do solo. Os resultados obtidos nesse trabalho também estão de acordo com os observados Andrade et al. (2003), que, ao adicionar ácidos húmicos extraídos de turfa ao solo, verificaram que as houve diminuição na adsorção e precipitação do fósforo no solo. No entanto, estudando a mobilidade do fósforo, Nascimento (2016) observou menor mobilidade do fósforo em um MAP revestido por substâncias húmicas quando comparado ao MAP convencional. O autor atribuiu esse resultado às reações de complexação entre íons fosfato com Fe e Al estruturalmente ligados ácidos húmicos.

Figura 5 - Distribuição do P disponível em função da interação da aplicação de superfosfato simples convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) e a umidade estabelecida em função da capacidade máxima de retenção de água gravitacional do solo nas distâncias de amostragem (0,0-7,5; 7,5-13,5; 13,5-23,5; 23,5-43,0 mm).



A distribuição do P disponível nas secções da placa de Petri é apresentada na figura 4. Nota-se que, no tratamento com menor teor de umidade, 92% do fósforo disponibilizado pelo fertilizante convencional ficou na primeira secção de amostragem (0,0-7,5mm) e aproximadamente 6% na segunda (7,5-13,5 mm), enquanto para o fertilizante revestido por substâncias húmicas, esse valor ficou próximo a 86% e 12%, respectivamente. O mesmo comportamento é observado para todas as umidades, mostrando assim que as substâncias húmicas tiveram um papel benéfico na disponibilização de fósforo, mesmo em situações de baixa umidade, não se portando então como uma barreira na solubilização do fertilizante.

Os efeitos positivos da matéria orgânica sobre a solubilização do P são conhecidos. No entanto, embora existam diversas hipóteses que expliquem essa interação, as razões não estão bem esclarecidas. Nesse caso, a matéria orgânica e o P podem atuar como antagonistas nos sítios de adsorção do solo (HU et al., 2001).

Dentre outras hipóteses, há ainda a de que as substâncias húmicas podem quelatizar os óxidos de Fe e Al, que atuam como fixadores de P, promovendo assim uma maior disponibilidade do nutriente no solo (GEELHOED et al., 1999).

4.1.3 P Total

Não foi observada interação da umidade e fertilizantes quanto ao teor de P total em nenhuma das secções de amostragem. No entanto, ocorreu diferença significativa para o fator umidade nas regiões centrais da placa de Petri (0,0-7,5; 7,5-13,5 mm) (Tabela 8).

A mobilidade do fósforo tem relação direta com as reações de adsorção e precipitação que ocorrem após a dissolução do fertilizante no solo (MCLAUGHLIN et al., 2011). Assim como o teor de P disponível, os teores de P total diminuíram com o distanciamento do local de deposição do grânulo. Nota-se também que os teores encontrados na terceira secção de amostragem são muito próximos aos da quarta secção (Tabela 8), sugerindo que houve fluxo difusivo somente até a segunda secção de amostragem. Este comportamento é reflexo da atuação dos sítios de adsorção presentes no solo aliada ao tempo de exposição do fertilizante a estes, diminuindo assim a eficiência dos fertilizantes fosfatados (RHEINHEIMER et al., 2002).

Não foi observada diferença significativa entre os fertilizantes fosfatados para nenhuma das secções de amostragem. Mesmo que em concentrações muito superiores às utilizadas nos produtos comercializados, as quantidades de substâncias húmicas adicionadas aos fertilizantes neutralizariam reações de adsorção somente em regiões muito próximas ao grânulo (DEGRYSE et al., 2013). Assim, a maior parte do fósforo liberado pelo fertilizante é suscetível às reações do solo.

Comparando os resultados de P total com os resultados de P disponível, nota-se que, na primeira secção de amostragem, os fertilizantes apresentaram comportamentos divergentes. Na média, os teores de P total encontrados para o fertilizante revestido por substâncias húmicas na região central foram maiores quando comparados ao fertilizante convencional, enquanto os teores médios de P disponível foram maiores quando aplicado o superfosfato simples convencional.

Tabela 8 - Teores médios de P total do solo em função do fertilizante fosfatado (CONV e RSH) e das umidades adotadas (20, 40, 60 e 80% da capacidade máxima de retenção de água gravitacional) após a incubação das placas de Petri por 50 dias.

Seções de Amostragem	Fertilizantes	Umidade (%)				Média
		20	40	60	80	
Mm		----- mg dm ⁻³ -----				
0 - 7,5	CONV	1234 aA	809 aB	840 aB	832 aB	929 a
	RSH	1119 aA	1111 aAB	907 aAB	809 aB	961 a
	Média	1177 A	910 B	874 B	820 B	
7,5 - 13,5	CONV	219 aB	318 aAB	314 aAB	342 aA	298 a
	RSH	240 aB	356 aA	335 aA	354 aA	321 a
	Média	230 B	337 A	325 A	348 A	
13,5 - 25,5	CONV	114 aA	116 aA	117 aA	121 aA	117 a
	RSH	110 aB	107 aB	123 aA	127 aA	117 a
	Média	112 A	111 A	120 A	124 A	
25,5 - 43,0	CONV	115 aA	105 aB	116 aA	111 aA	112 a
	RSH	113 aA	108 aA	109 aA	116 aA	112 a
	Média	114 A	106 B	112 A	113 A	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Assim como os resultados observados para P disponível, houve diferença significativa entre as umidades. As duas secções de amostragem centrais apresentaram comportamento semelhante ao observado anteriormente. Na região no entorno do grânulo verificou-se maior concentração de fósforo nos tratamentos com menor conteúdo volumétrico de água, enquanto na segunda secção de amostragem, maiores concentrações do nutriente foram encontradas nos tratamentos que receberam mais água. Esse comportamento indica, novamente, que a umidade influencia diretamente o fluxo difusivo do fósforo.

4.2 Estudo da mobilidade de P em PGCs

4.2.1 Planta

Foram observadas interações das profundidades com os fertilizantes para produção de massa de matéria seca (MMS) e teor médio de P na parte aérea e raiz das plantas (tabelas 9 e 10). Valores máximos de MMS e teor de P foram observados com aplicação do fertilizante fosfatado revestido próximo às raízes das

plantas. Os valores diminuíram à medida que o fertilizante foi aplicado mais longe das raízes.

A produção de massa de matéria seca, tanto da parte aérea quanto da raiz, foi maior quando o fertilizante fosfatado foi aplicado próximo às raízes (Tabela 9). Os valores variaram, em média, de 2,75 a 1,97 g para parte aérea, e de 3,83 a 2,82 g para raiz. O mesmo comportamento é observado em relação ao teor médio de P nas amostras de parte aérea e raiz das plantas (Tabela 10). Quanto mais próxima das raízes a aplicação do fertilizante, maior o teor médio de P, demonstrando a importância da localização da aplicação de fertilizantes fosfatados. Em estudo de campo, Motomiya et al. (2004) verificaram maiores teores de P nas folhas de soja com a aplicação do fertilizante no sulco quando comparada com a aplicação a lanço. Leite et al. (2006) verificaram que houve maior produção de matéria seca em plantas de milho quando o P foi aplicado de maneira localizada no solo, sobretudo quando o solo recebeu baixas doses de fertilizante. No entanto, resultados obtidos por alguns autores sugerem que, se o teor de fósforo estiver acima do nível crítico, a resposta da cultura independe do modo de aplicação (PAVINATTO; CERETTA, 2004).

Nota-se que, tanto para parte aérea quanto raiz, o teor médio de P nas plantas em que o fertilizante foi aplicado a 1,5 cm de profundidade foi menor do que o encontrado nos demais tratamentos. Não há uma explicação plausível e sólida que justifique os menores valores e o ocorrido pode estar relacionado a algum erro experimental.

Levando em consideração os fertilizantes fosfatados utilizados, observa-se comportamento divergente entre as variáveis avaliadas. Enquanto os resultados obtidos para massa de matéria seca mostram que a utilização do fertilizante revestido por substâncias húmicas apresentou valores maiores tanto para raiz quanto para a parte aérea, os dados de teores médios de P revelaram que o fertilizante em questão promoveu maior concentração de P somente na parte aérea. Os resultados estão de acordo com os encontrados por Bazani (2014) que, testando o efeito da solubilidade de fertilizantes fosfatados na disponibilidade de fósforo para plantas de eucalipto, encontrou maiores teores de P foliar quando utilizou um superfosfato simples complexado por substâncias húmicas. Outros pesquisadores também encontraram maiores valores de MMS em culturas cultivadas na presença de substâncias húmicas (NEVES et al., 1987; EYHERAGUIBEL et al., 2008).

Tabela 9 - Médias da massa de matéria seca (MMS) das plantas cultivadas em PGCs em função da aplicação de dois tipos de fertilizante fosfatados, convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH), e da profundidade de aplicação.

Profundidade (cm)	Parte Aérea			Raiz		
	CONV	RSH	Média	CONV	RSH	Média
	g por planta					
0,0	2,60 aB	2,90 aA	2,75 a	3,76 aA	3,89 aA	3,83 a
0,5	2,37 bB	2,74 aA	2,55 b	3,36 bA	3,33 bA	3,34 b
1,0	2,18 cB	2,47 bA	2,33 c	2,98 cA	3,26 bA	3,12 c
1,5	2,10 cA	2,23 cA	2,16 d	2,44 dB	3,20 bA	2,84 d
2,0	1,91 dA	2,03 dA	1,97 e	2,42 dB	3,26 bA	2,82 d
Média	2,23 B	2,47 A		2,99 B	3,39 A	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Tabela 10 - Teores médios de P em parte aérea e raiz de plantas cultivadas em PGCs em função da aplicação de dois tipos de fertilizante fosfatados, convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH), e da profundidade de aplicação.

Profundidade (cm)	Parte Aérea			Raiz		
	CONV	RSH	Média	CONV	RSH	Média
	g por Kg					
0,0	0,46 aA	0,47 aA	0,47 a	0,42 aA	0,41 aA	0,41 a
0,5	0,43 bA	0,43 bA	0,43 b	0,39 bA	0,36 cB	0,37 b
1,0	0,39 cB	0,41 bA	0,40 c	0,38 bA	0,37 bA	0,37 b
1,5	0,38 cB	0,41 bA	0,39 c	0,38 bA	0,35 cB	0,36 b
2,0	0,39 cB	0,40 bA	0,39 c	0,37 cB	0,37 bA	0,37 b
Média	0,41 B	0,42 A		0,39 A	0,37 B	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Observa-se que, enquanto os teores médios de P apresentaram pequena variação entre parte aérea e raiz, os valores encontrados para MMS de raiz superam em quase 1 g os valores encontrados para MMS da parte aérea. Isso pode ser explicado pelo fato de que, comumente, plantas deficientes em fósforo retêm mais P nas raízes e o translocam menos para a parte aérea em comparação com plantas bem-supridas (Bielecki, 1973; Martinez et al, 1993). Em virtude da retenção de P nas raízes, o crescimento radicular é mantido em detrimento do desenvolvimento da parte aérea, aumentando assim a relação raiz/parte aérea, que é uma característica que pode estar associada com a deficiência de fósforo. Além disso, o aumento da

MMS radicular observado no presente trabalho pode estar associado ao funcionamento das substâncias húmicas como auxinas, atuando diretamente no alongamento radicular (O'DONNEL, 1972; MUSCOLO et al., 1999; EYHERAGUIBEL et al., 2008).

4.2.1 Extração sequencial de P

4.2.1.1 P extraído por resina trocadora de ânions (P RTA) – P lábil

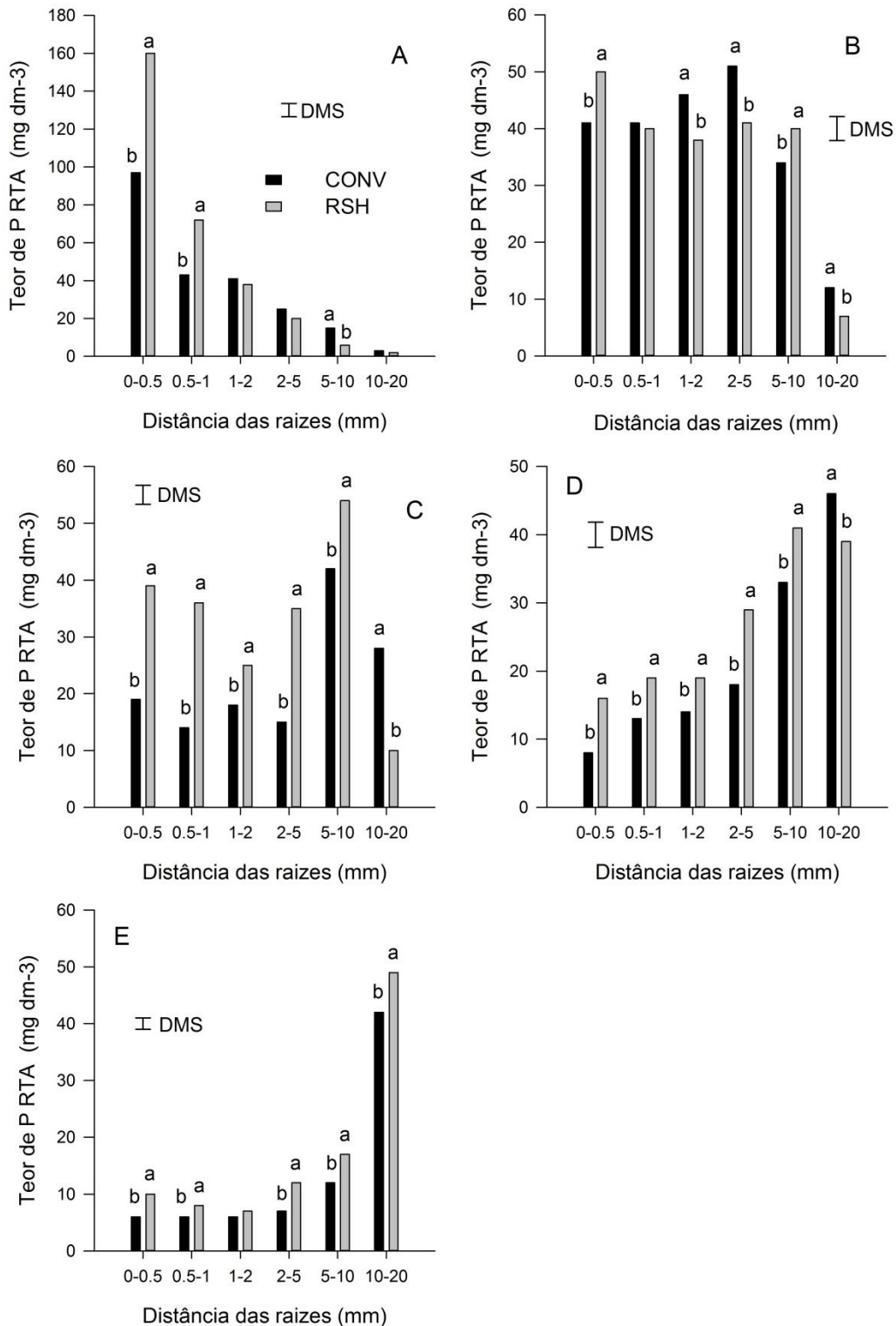
Em relação ao fósforo considerado lábil no solo, extraído pela fração RTA, observou-se interação dos fertilizantes com as distâncias de amostragem para todas as profundidades de aplicação do fertilizante avaliadas (Tabela 11).

Tabela 11 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P RTA em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.

Fonte de Variação	Profundidade de aplicação do fertilizante (cm)				
	0	0,5	1	1,5	2
Blocos	0,449	0,307	0,089	0,992	0,861
Fertilizante (F)	0,001	0,109	0,000	0,006	0,003
Dist. Amostragem (D)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F x D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CV F (%)	8,80	5,74	5,72	14,05	11,92
CV D (%)	7,93	5,67	5,87	7,04	6,37

A fração extraída pela RTA representa pouco do P total contido nos solos, além de ser a fração mais influenciada pela adubação fosfatada (RHEINHEIMER, 2000). Isso explica os altos valores encontrados para essa fração no presente trabalho, em especial nas secções de amostragem aonde os fertilizantes foram aplicados.

Figura 6 - Teores médios de P-RTA para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.



Os maiores teores de P RTA permaneceram nas secções de amostragem aonde os grânulos foram depositados (Figura 5). Os maiores valores encontrados (160 e 97 mg dm⁻³ para os fertilizantes RSH e CONV, respectivamente) foram nos tratamentos em que o fertilizante foi colocado na profundidade 0cm, e o comportamento observado para a fração extraída de P RTA refletiu nas variáveis avaliadas nas plantas. Quanto mais próximo das raízes o fertilizante foi aplicado, maior o teor de P acumulado e a MMS. Nota-se ainda que, com a aplicação dos fertilizantes fosfatados em profundidades maiores que 1,0 cm, há uma diminuição nos teores de P nas secções de amostragem mais próximas às raízes, sugerindo haver uma maior dificuldade na movimentação ascendente do fósforo nesses tratamentos, dificultando o acesso das plantas ao nutriente.

São frequentes na literatura trabalhos que ressaltam a influência das adubações fosfatadas sobre os teores de P-RTA. Ao se aplicar o fertilizante em camadas mais superficiais do solo, existe a formação de um gradiente de disponibilidade de P dessas regiões para camadas mais profundas em função da falta de revolvimento e da baixa mobilidade do P (ARAUJO et al., 1993; BECK et al., 1996; DOBERMAN et al., 2002). No presente trabalho fica claro que, à medida que as secções de amostragem se afastam do local de deposição do grânulo, menores são os teores de P disponível.

É esperado que a planta, ao absorver P da solução do solo, crie uma zona de exaustão nas regiões mais próximas às raízes. Esse fenômeno é caracterizado pela diminuição na concentração do nutriente no ambiente rizosférico devido à limitação do P em converter formas não disponíveis em disponíveis e pela sua baixa mobilidade (DARRAH, 1993; JUNK, 1996; HINSINGER, 2001). No entanto, devido à alta concentração resultante da aplicação dos fertilizantes na profundidade 0 cm, ou seja, na região junto às raízes, isso não foi observado (Figura 5). Apesar do comportamento esperado ter sido observado para todas as outras profundidades de aplicação dos fertilizantes, não fica claro se essa diminuição do teor de P no ambiente rizosférico foi consequência da criação da zona de exaustão ou da baixa mobilidade do fósforo, fazendo com que o nutriente não chegasse até as regiões próximas às raízes. Contudo, levando em consideração como a profundidade de aplicação refletiu na planta menores teores de P e menor produção de MMS, provavelmente as plantas não foram capazes de acessar o P-RTA de forma satisfatória devido à baixa mobilidade do nutriente.

No geral, o fertilizante revestido por substâncias húmicas apresentou maiores valores na fração P-RTA. Nos tratamentos onde o fertilizante foi aplicado nas profundidades maiores que 1 cm (figura 5 C, D e E), nota-se comportamento semelhante ao observado no estudo da mobilidade de P em placas de Petri, discutido previamente nesse mesmo trabalho. Na região de deposição do grânulo, com exceção do observado para a profundidade 2 cm, o fertilizante convencional apresentou maior teor de P em relação ao fertilizante RSH, enquanto à medida que as secções de amostragem se aproximavam das raízes, o fertilizante RSH disponibilizou maiores teores de P-RTA, de maneira que a movimentação ascendente do P em direção às raízes for maior.

Resultados semelhantes aos obtidos nesse experimento foram encontrados por Zhen-Yu et al. (2013) que, comparando os efeitos de fertilizantes monocálcicos combinados ou não com ácidos húmicos, observaram que a adição de substâncias húmicas ao fertilizante monocálcico aumentou a mobilidade do fósforo.

A adição de P no solo aumenta o fluxo difusivo devido à saturação progressiva das superfícies de adsorção e ao aumento de gradiente de concentração (BASTOS et al., 2010). A ação de substâncias húmicas na diminuição da adsorção de ions fosfatos pode ser atribuída ao bloqueio dos sítios de adsorção dos minerais de argila (ALMEIDA et al., 2003; ARAUJO et al., 2004; SOUZA et al., 2006). Esses minerais podem adsorver as substâncias húmicas com grande energia e assim competirem com os fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção (BAHTTI et al., 1998).

4.2.1.2 P extraído por bicarbonato de sódio (NaHCO_3) - P moderadamente lábil

O fósforo extraído por NaHCO_3 é considerado lábil e inclui parte do fósforo que, por algum motivo, não pode ser extraído pela RTA (GATIBONI, 2003; NEGASSA; LEINWEBER, 2009). Um aumento de pH gerado pelo extrator desencadeia um processo de troca do OH^- pelo H_2PO_4^- fracamente adsorvido aos minerais de argila presentes no solo, aumentando o teor de P na solução do solo (KOVAR; PIERZYNSKI, 2009).

Assim como na fração P RTA, observou-se interação dos fertilizantes com as distâncias de amostragem do solo rizosférico (Tabela 12). Os maiores teores de P NaHCO_3 foram encontrados nas secções de amostragem onde os grânulos foram

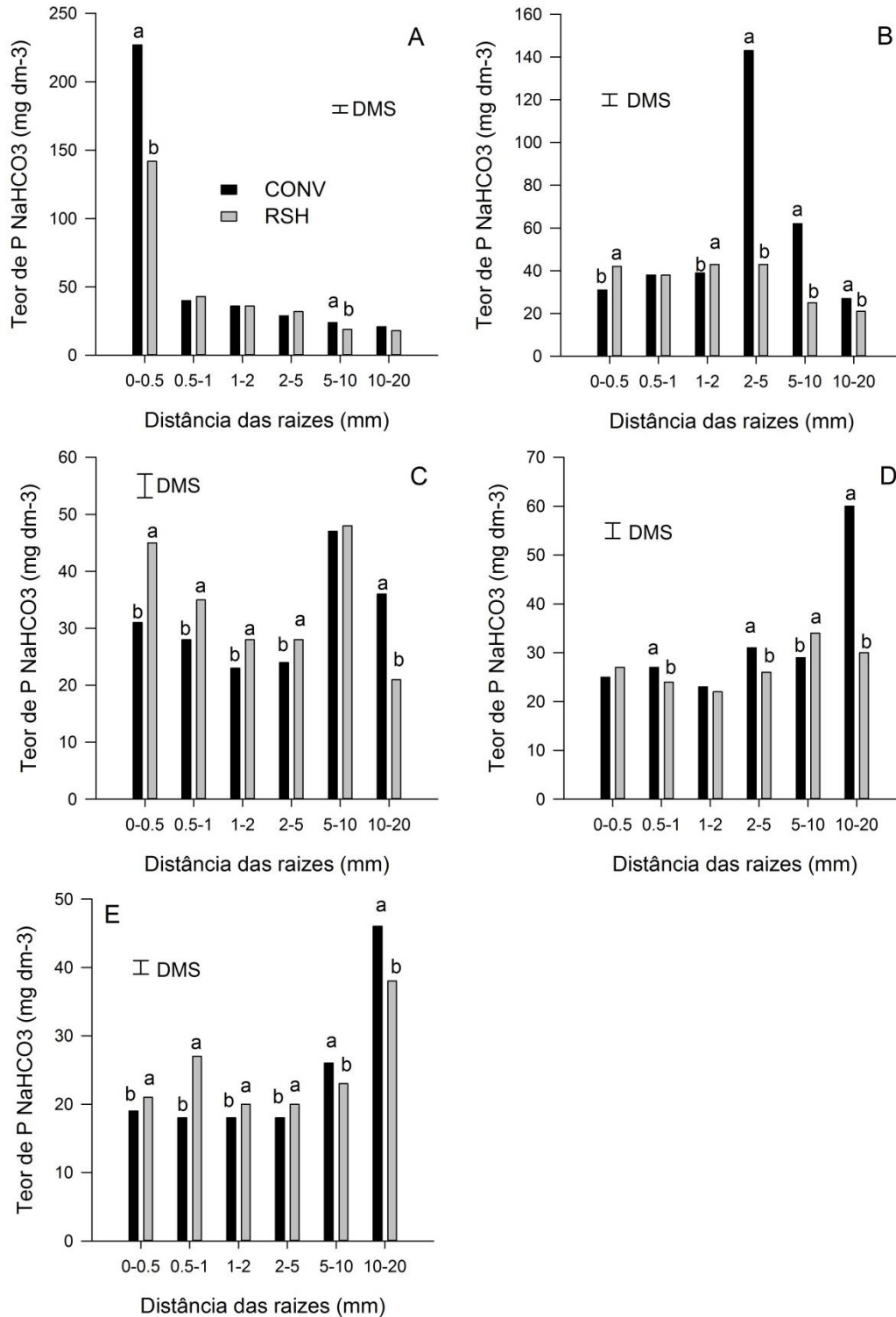
depositados e, à medida que as secções de amostragem se afastaram dos locais de deposição dos grânulos, os teores de P NaHCO₃ diminuíram (Figura 6).

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (valores de *p*) para valores de P NaHCO₃ em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.

Fonte de Variação	Profundidade de aplicação do fertilizante (cm)				
	0	0,5	1	1,5	2
Blocos	0,179	0,354	0,395	0,302	0,609
Fertilizante (F)	0,000	0,000	0,007	0,000	0,599
Dist. Amostragem (D)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F x D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CV F (%)	3,47	5,44	4,49	3,82	5,19
CV D (%)	4,66	5,81	6,20	5,17	3,97

Nas secções de amostragem onde os fertilizantes fosfatados foram aplicados, o fertilizante convencional apresentou teores muito maiores de P-NaHCO₃ do que o fertilizante revestido por substâncias húmicas em todos os tratamentos (Figura 6). Nota-se ainda que essa diferença foi maior do que a observada em P-RTA, indicando que, na ausência de substâncias húmicas, a energia de ligação entre o fósforo e os minerais de argila presentes no solo é maior. Nas demais secções de amostragem, com exceção do tratamento em que os fertilizantes foram aplicados na profundidade 0.5 cm (Figura 6 B), maiores teores de P NaHCO₃ foram encontrados quando aplicados o fertilizante RSH, sugerindo que o P provindo desse fertilizante percorreu maiores distâncias a partir do ponto de deposição dos grânulos. Apesar disso, por apresentar uma distribuição mais linear entre as secções de amostragem, observa-se que a influência dos fertilizantes foi menor em P NaHCO₃ do que em P RTA.

Figura 7 - Teores médios de P-NaHCO₃ para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.



Apesar dos teores médios de P encontrados para esta fração serem maiores do que os observados na extração de P RTA, essa fração também tem pequena participação no P total do solo, isso porque as forças que atuam na adsorção do P são bastante elevadas e não permitem que altos teores de P lábil sejam mantidos no solo por muito tempo. Ainda segundo alguns pesquisadores, a influência da adubação fosfatada sobre a fração de P extraída com NaHCO_3 é pequena (YANG et al., 2012; BRUNETTO et al., 2013).

Ao contrário do observado em alguns tratamentos para P RTA, a formação de uma zona de exaustão na região rizosférica não ficou tão clara (Figura 6).

4.2.1.3 P extraído por $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (P NaOH 0,1) – P moderadamente lábil ligado ao Fe e Al

Para o teor de P-NaOH 0.1, houve interação dos fatores para todas as distâncias de amostragem (Tabela 13). Nas secções de amostragem em que os fertilizantes fosfatados foram aplicados, o fertilizante CONV apresentou maiores teores de P-NaOH 0.1, enquanto nas demais secções, foram observados maiores valores quando aplicado o fertilizante RSH. Tal comportamento sugere que, ao se utilizar o fertilizante fosfatado em associação com substâncias húmicas, proporcionado assim maior mobilidade ao fósforo, os sítios de adsorção com alta afinidade por fosfatos serão preenchidos gradualmente, de forma que parte do fósforo será complexada por óxidos de Fe e Al à medida que for caminhando com a solução do solo (Figura 7).

Tabela 13 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P NaOH 0.1 em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.

Fonte de Variação	Profundidade de aplicação do fertilizante (cm)				
	0	0,5	1	1,5	2
Blocos	0,264	0,139	0,039	0,126	0,545
Fertilizante (F)	0,001	0,006	0,000	0,001	0,041
Dist. Amostragem (D)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F x D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CV F (%)	3,61	2,89	1,35	1,33	3,53
CV D (%)	3,91	3,61	3,29	1,67	2,07

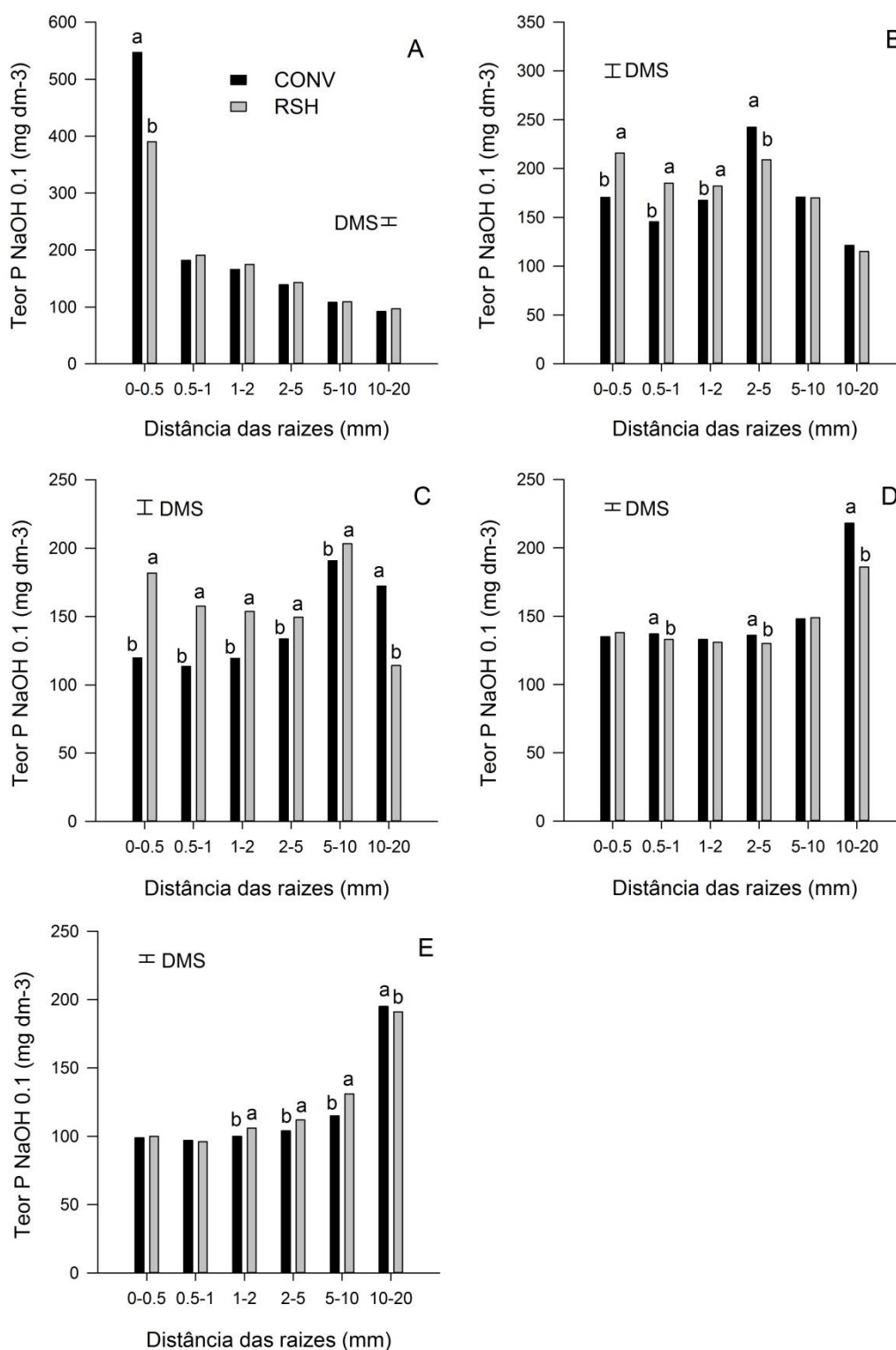
Assim como para NaHCO_3 , para essa fração não foi observada uma zona de exaustão, visto que as concentrações de P nas regiões próximas as raízes são maiores ou muito próximas as secções de amostragem subsequentes (Figura 7).

Em solos ácidos intemperizados, o P ligado aos óxidos de Fe e Al pode representar mais de 40% do conteúdo de P total do solo (REDEL et al., 2007). Nesses solos, as formas disponíveis (P-RTA e P- NaHCO_3) são tamponadas pelo P- NaOH 0.1, o qual, portanto, é considerado moderadamente lábil (RHEINHMEIER, 2000). Apesar do P extraído por NaOH 0.1 representar o fósforo ligado aos óxidos de Fe e Al presentes no solo, a energia de ligação entre estes componentes não é tão forte, de forma que a manutenção de teores elevados desta fração é importante para manter a disponibilidade de P para as plantas (OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

O superfosfato simples é prontamente solúvel e por isso tem alta eficiência em fornecer P para as plantas. No entanto, esse P é passível de ser rapidamente convertido de solúvel em insolúvel após reações com os minerais de argila do solo, sendo rapidamente adsorvido na superfície dos óxidos de Fe e Al (SYERS et al., 2008). Isso explica os teores elevados de P NaOH 0.1 encontrados no presente trabalho, teores mais altos dos que os encontrados para os extratores RTA e NaHCO_3 . Almeida e Rosolem (2016) também observaram que o P adicionado via fertilizante aumentou significativamente o P extraído por NaOH 0.1. Esses resultados também estão de acordo com os verificados por Gonçalves e Meurer (2009).

Os maiores teores de P- NaOH 0.1 foram observados na presença do fertilizante RSH, provavelmente em decorrência da formação de complexos organometálicos P-SH-Fe/Al. As substâncias húmicas, ao formarem complexos com íons Fe e Al, competem com o P pelos sítios de adsorção dos minerais de argila, aumentando assim a disponibilidade do P na solução do solo (BRADY, WEIL, 2013). Herrera et al. (2016) também observaram maiores teores de P- NaOH 0.1 na utilização de um superfosfato simples complexado por substâncias húmicas. Os autores atribuíram esse comportamento, além da competição pelos sítios de adsorção, ao efeito de proteção do P pelos ácidos húmicos, que impedem a interação com o Fe e Al livres na solução do solo ao complexá-los, reduzindo assim a precipitação do fosfato (GERKE et al., 1995; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Figura 8 - Teores médios de P-NaOH 0.1 para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.



Assim como nas frações de P RTA e P NaHCO₃, os teores de P diminuem como aumento da distância do local de deposição dos grânulos (Figura 7).

O fosforo ligado aos óxidos e aos argilominerais com energia de ligação intermediária, extraídos por NaOH 0.1, são absorvidos pelas plantas quando pouco P Lábil está disponível (GATIBONI et al., 2007). No presente trabalho, nota-se que, quando os fertilizantes foram aplicados em profundidade maiores que 1 cm (Figura 7 C, D e E), há uma diminuição nos teores de P-NaOH 0.1 nas secções de amostragem próximas as raízes das plantas, evidenciando que, por se encontrar menos P-Lábil nessa região de amostragem, P ligado aos óxidos de Fe e Al foram disponibilizados às plantas para absorção. Os teores médios de P nas plantas corroboram o constatado visto que, apesar dos tratamentos apresentarem diferenças significativas entre si, os teores de P na parte aérea e raiz são semelhantes, mesmo quando o fertilizante foi aplicado em maiores profundidades.

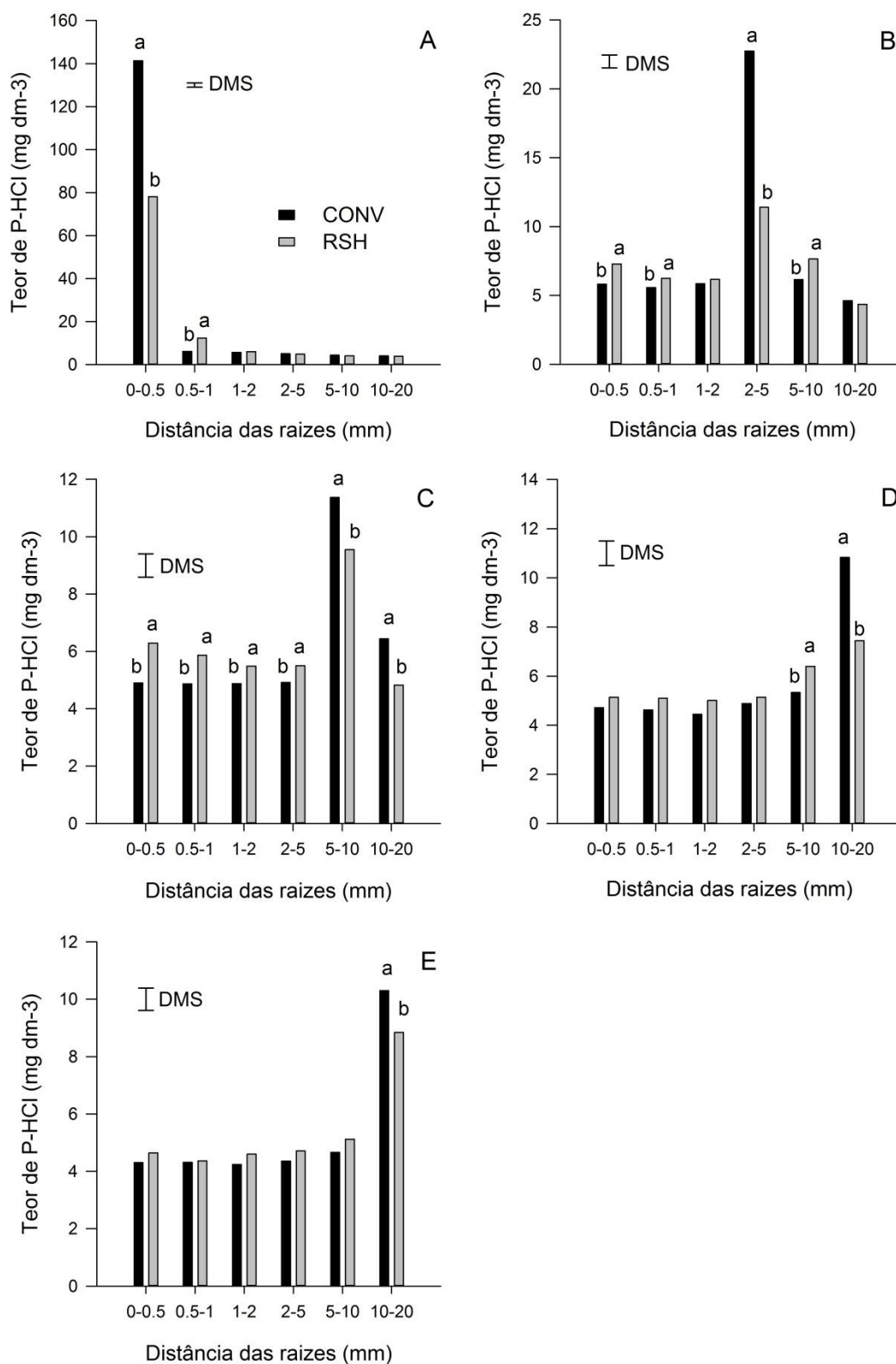
4.2.1.4 P extraído por HCl (P HCl) - P ligado ao Ca

O fósforo ligado ao cálcio, extraído com HCl, pode ser oriundo dos minerais primários do solo formados “in situ” (MAGID, 1993), bem como de fertilizantes fosfatados não acidulados como os fosfatos naturais (GATIBONI, 2003). O aumento do P ligado ao cálcio via fertilizantes fosfatados é dependente da composição dos mesmos (GALVANI et al., 2008; OLIBONE; ROSOLEM, 2010). O P contido nessa fração se tornará disponível para as plantas somente quando os valores de pH e de Ca e P se encontrarem baixos na solução do solo.

Tabela 14 - Resumo da análise de variância (valores de *p*) para valores de P HCl em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.

Fonte de Variação	Profundidade de aplicação do fertilizante (cm)				
	0	0,5	1	1,5	2
Blocos	0,707	0,046	0,573	0,264	0,896
Fertilizante (F)	0,000	0,000	0,936	0,233	0,911
Dist. Amostragem (D)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F x D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CV F (%)	3,61	3,32	13,67	4,08	10,34
CV D (%)	4,17	5,80	6,34	8,46	7,14

Figura 9 - Teores médios de P-HCl para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas significativas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.



Houve interação dos fertilizantes com secções de amostragem para o teor de P-HCl em todas as secções de amostragem.

O mesmo comportamento observado em outras frações é percebido para os teores de P extraídos via HCl. Com exceção das secções de amostragem em que os grânulos de fertilizante foram aplicados, no geral, a utilização do fertilizante RSH ocasionou maiores teores de P-HCL (Figura 8). Além disso, observa-se que os teores de P-HCl foram bem mais baixos do que os teores obtidos na extração via NaOH 0.1 mol L⁻¹, indicando que o P foi preferencialmente adsorvido por óxidos de Fe e Al. Baixos teores de P-HCL também foram encontrados por Pavinato et al (2009) e Herrera et al. (2016). Segundo Gatiboni (2003), os baixos teores de P HCl se devem a degradação dos minerais primários pelos intensos processos de intemperismo.

Aumentos significativos em P-HCL foram encontrados por Beck e Sanches (1996) ao avaliar frações de P na camada superficial de um Utisol. Os autores contribuíram tal comportamento à aplicação de fertilizantes fosfatados associada à aplicação de calcário. Esse fato explicaria os altos teores de fósforo extraídos por HCl percebidos nas secções de amostragem que receberam os grânulos de fertilizante.

4.2.1.5 P extraído por NaOH 0.5 mol L⁻¹ (P NaOH 0,5) – P ocluso pouco lábil

A extração do P do solo por NaOH 0.5 mol L⁻¹ serve como complemento da fração extraída por NaOH 0.1 mol L⁻¹ (CONDRON et al., 1985). Esse extrator extrai formas de P que não foram estimadas pelo extrator anterior por estarem fortemente ligadas aos hidróxidos e argilominerais e fisicamente protegidas no interior dos microagregados (CONDRON et al., 1985; CROSS; SCHLESINGER, 1995).

Houve interação dos fatores fertilizantes e distâncias de amostragem para o teor de P-NaOH 0.5 para todas as profundidades de aplicação dos fertilizantes fosfatados testadas.

Tabela 15 - Resumo da análise de variância (valores de p) para valores de P NaOH 0.5 em função da aplicação de fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) nas profundidades 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 cm e das secções de amostragem a partir da separação das raízes.

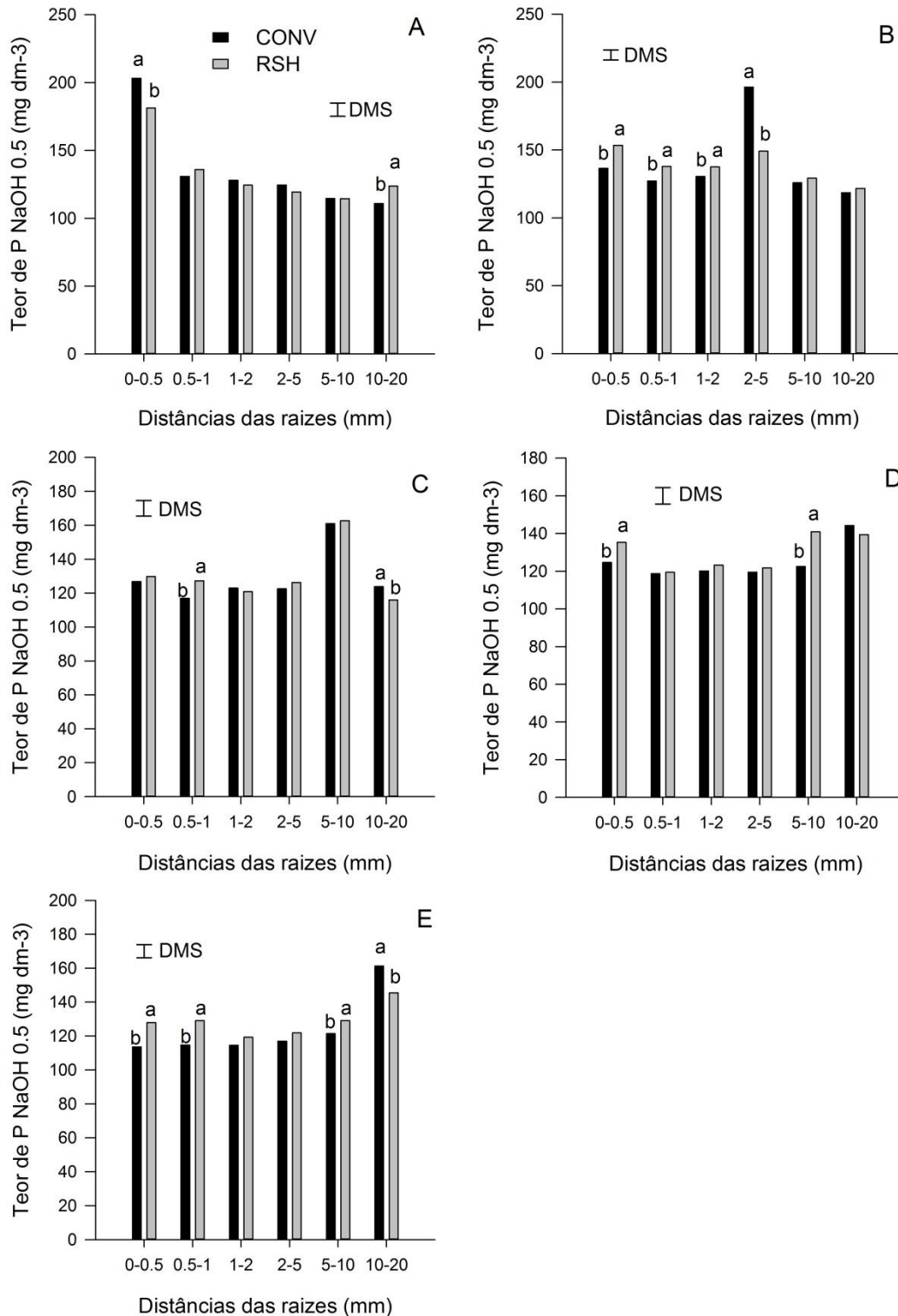
Fonte de Variação	Profundidade de aplicação do fertilizante (cm)				
	0	0,5	1	1,5	2
Blocos	0,237	0,300	0,272	0,015	0,021
Fertilizante (F)	0,050	0,370	0,661	0,001	0,018
Dist. Amostragem (D)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F x D	0,000	0,000	0,049	0,000	0,000
CV F (%)	1,74	4,72	4,33	1,32	2,69
CV D (%)	3,54	2,62	3,47	3,34	3,01

Apesar de haver um acúmulo maior de P NaOH 0.5 nas secções de amostragem em que os fertilizantes fosfatados foram aplicados, o P ocluso mostrou uma distribuição homogênea no perfil analisado. Ao contrário do observado para as outras frações de P, os teores de P ocluso foram bastante semelhantes entre os tratamentos, tanto para as profundidades quanto para os fertilizantes. Entre os fertilizantes, a maior variação foi obtida na 4ª secção de amostragem (2-5 mm) para a profundidade de aplicação dos grânulos 0.5 cm (Figura 9 B). No entanto, não há motivo aparente para o acúmulo de P NaOH 0,5 nesta secção de amostragem visto que, neste mesmo tratamento, não foram observadas grandes variações nas outras distâncias.

Estudando a dinâmica das formas de fósforo em diferentes sistemas de manejo, Rodrigues (2013) verificou teores maiores de P NaOH 0.5 em camadas superficiais do solo em sistema de plantio direto, levando a crer que as maiores concentrações ficam próximas ao local de deposição dos fertilizantes, comportamento semelhante ao observado no presente trabalho.

Sendo este o último passo da extração sequencial de P, os altos teores obtidos com a extração de P NaOH 0.5 confirmam a presença de grande quantidade de óxidos de Fe e Al na mineralogia do solo utilizado no experimento, conferindo a ele grande capacidade de se ligar ao P com grande energia.

Figura 10 - Teores médios de P-NaOH 0.5 para os fertilizantes convencional (CONV) e revestido por substâncias húmicas (RSH) na profundidade de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm). A barra horizontal representa as diferenças mínimas (DMS, $p < 0.5$), e compara as distâncias das raízes.



Com exceção das secções de amostragem que receberam os grânulos de fertilizante, o fertilizante RSH aumentou o teor de P NaOH 0,5 nas demais secções. Herrera et al. (2016), estudando a disponibilidade das formas de P em cultivos subsequentes, ao utilizar um superfosfato simples complexado por substâncias húmicas observou teores de P NaOH 0,5 similares ou maiores aos teores obtidos na aplicação do SSP convencional.

Já era esperado que, mesmo na presença de substâncias húmicas que agem como agentes complexantes, essa fração de P apresentasse baixa variação visto que, por ser protegida fisicamente no interior dos agregados, dificilmente seria alterada pela adubação fosfatada em um curto período de tempo. Em experimento de longa duração, Schimitt et al. (2013), avaliando o acúmulo de P em vinhedos observaram aumento nos teores de P NaOH 0,5, tanto em superfície quanto em camadas mais profundas do solo.

4.2.1.6 P total do solo

Observou-se interação dos fertilizantes com as distâncias de amostragem para todas as profundidades de aplicação do fertilizante avaliadas para o teor de P total. As diferenças entre os tratamentos foram significativas principalmente nas secções de amostragem em que os fertilizantes fosfatados foram aplicados, comportamento semelhante ao observado para as outras frações de P extraídas (Tabela 15). Para estas secções de amostragem, o superfosfato simples convencional apresentou maiores teores de P quando comparado ao superfosfato simples revestido por substâncias húmicas, no entanto, nas demais distâncias de amostragem, há uma tendência de o fertilizante revestido por substâncias húmicas proporcionar maiores teores, evidenciando assim, mais uma vez, a maior mobilidade de P na presença de tais compostos.

É nítida a influência dos adubos fosfatados sobre o P total do solo. No entanto, conforme verificado nas frações anteriores, apenas uma pequena parte desse fósforo fica prontamente disponível para as plantas.

Tabela 16 - Teores médios de P total do solo em função do fertilizante fosfatado (CONV e RSH) nas profundidades de aplicação do fertilizante 0 cm (A), 0.5 cm (B), 1 cm (C), 1.5 cm (D) e 2 cm (E) em função da distância de amostragem a partir da separação das raízes (0-0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; 5-10; 10-20 mm).

Prof. de aplicação do fert.	Fert	Distância de amostragem (mm)						Média
		0-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0-5,0	5,0-10,0	10,0-20,0	
Cm		mg dm⁻³						
0	Conv	1121 aA	590 bB	490 C	476 CD	436 D	378 E	582
	RSH	1051 bA	710 aB	513 C	461 CD	409 D	420 D	594
	Média	1086 A	650 B	501 C	468 C	422 D	399 D	
0,5	Conv	478 bB	477 B	496 B	760 aA	491 B	401 C	517 a
	RSH	550 aA	511 BC	477 C	535 bAB	520 AB	412 D	501 b
	Média	514 B	494 BC	487 C	647 A	506 BC	407 D	
1	Conv	421 bB	445 bB	436 bB	424 bB	514 A	510 aA	458 b
	RSH	521 aA	499 aAB	472 aB	496 aAB	521 A	434 bC	491 a
	Média	471 B	472 B	454 B	460 B	518 A	472 B	
1,5	Conv	438 B	434 B	456 B	447 B	449 B	594 aA	470 a
	RSH	460 A	457 A	468 A	435 B	464 A	479 bA	461 b
	Média	449 BC	446 C	462 B	441 C	456 BC	537 A	
2	Conv	413 B	419 bB	426 B	427 B	421 B	529 aA	436
	RSH	401 C	458 aB	409 C	418 C	439 B	496 bA	439
	Média	407D	439 B	417 CD	422C	430 BC	512 A	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

No geral, apenas 10 a 20% do P adicionado é utilizado pelas plantas logo após a aplicação, sendo grande parte do P utilizado fornecido pelo solo (MOREL; FARDEAU, 1990; CHIEN et al., 2011), o que confirma a grande importância das frações moderadamente e pouco lábeis de P do solo, que mantêm fornecimento adequado de P para o desenvolvimento e determinação da produtividade das culturas.

Como a nutrição das plantas depende muito P ligado fracamente aos colóides do solo em solos bastante intemperizados, alterações na taxa de liberação dos íons fosfatos por dessorção ou dissolução da fase sólida do solo para a solução do solo, e alterações na distribuição das formas de P para frações com menor estabilidade de ligação, são de extrema importância visto que servem como complemento do fósforo fornecido por fertilizantes fosfatados.

5. CONCLUSÃO

O fertilizante revestido por substâncias húmicas obtidas a partir de leonardita proporciona maior disponibilidade e difusão de P em relação ao fertilizante convencional.

O revestimento do fertilizante com substâncias húmicas não atua como barreira na solubilização e movimentação do P.

A umidade do solo e o local de aplicação do fertilizante têm influência direta sobre o a movimentação do P no solo.

Foram obtidos maiores valores para massa de matéria seca e teor de P em parte aérea e raiz das plantas de milho na presença de substâncias húmicas.

A profundidade de aplicação influenciou na disponibilidade do P proveniente do fertilizante para as plantas.

Nas regiões no entorno dos grânulos, o fertilizante convencional acumula maiores teores de P NaHCO_3 e P HCl, formas menos lábeis, enquanto o fertilizante revestido por substâncias húmicas proporciona maiores teores de P lábil (RTA).

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.S.; ROSOLEM, C.A. Ruzigrass Grown in Rotation with Soybean Increases Soil Labile Phosphorus. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 6, p. 2444-2452, 2016.

ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfato em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**., Campinas, v.27, p.985- 1002, 2003.

ALVAREZ, R.; ARRUDA, H. V.; WUTKE, A. P. C. Adubação de cana-de-açúcar. Experiência com diversos fosfatos. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 24, p. 1-8, 1965.

ALVES, V.M.C.; MAGALHÃES, J.V.; VASCONCELLOS, C.A.; NOVAIS, R.F.; BAHIA FILHO, A.F.C.; FRANÇA, G.E.; OLIVEIRA, C.A. & FRANÇA, C.C.M. Acúmulo de nitrogênio e de fósforo em plantas de milho afetadas pelo suprimento parcial de fósforo nas raízes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p 299-305, 1999

Alves, V. M. C., de Novais, R. F., de Oliveira, M. F. G., & Sant'Anna, R. Cinética e translocação de fósforo em híbridos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1047-1052, 1998.

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V. H.; NOVAIS, R. F. Addition of organic and humic acids to Latosols and phosphate adsorption effects. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p.1003-1011, 2003.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journals**, v.72, p. 685-688, 1980.

ARAUJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilizações fostatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I: Intensidade e formas de acumulação. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 17, n. 3, p. 389-396, 1993.

ARAÚJO, E.A.; LANI, J.L; AMARAL, E.F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo Distrófico na Amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, p.307-315, 2004.

BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, **University of Virginia**, p.525-564, 1974.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability**: A mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, p.330-338, 1995.

BAR-YOSEF, B.; SHEIKHOLSMI, M.R. Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized from a trickle source. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.40, n.3, p.575-82, 1976.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.136-142, 2008.

BASTOS, A.; da COSTA, J.P.; F da SILVA, I.; RAPOSO, R.W.; A OLIVEIRA, F.; ALBUQUERQUE, A.W.. Resposta do milho a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 5, 2010.

BAZANI, J.H. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. 2014. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2014.

BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. **Plant and Soil**, v. 184, n. 1, p. 23-31, 1996.

BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003, p. 5-7 (Comunicado Técnico, 16).

BHATTI, J.S.; COMERFORD, N.B.; JOHNSTON, C.T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic horizon. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 62, p.1089-1095, 1998.

BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 24, p. 225-252, 1973

BOLAN, N.S.; NAIDU, R.; MAHIMAIRAJA, S.; BARSKARAN, S. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization os phosphates. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.18, n. 4, p. 311-319, 1994.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 30, p. 297-313, 1990.

BOLLAND, M.D.A; GILKES, R.J. The chemistry and agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. **Journal of Crop Production**, v. 1, n. 2, p. 139-163, 1998.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013, 716p.

BRUNETTO, G.; LORENSINI, F.; CERETTA, C.A.; GATIBONI, L.C.; TRENTIN, G.; GIROTTI, E.; MELO, G.W. Soil Phosphorus Fractions in a Sandy Typic Hapludaft as Affected by Phosphorus Fertilization and Grapevine Cultivation Period. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 13, p. 1937-1950, 2013.

CARVALHO, M.A. **Retenção de água e outros atributos físicos de agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro**. 1998. 83p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AMARAL-SOBRINHO, N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, p.69-90, 1999.

CESSA, R. M. A. C.; CELI, L.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Adsorção de fósforo em frações argila na presença de ácido fúlvico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, n. 5, p. 1535-1542, 2010.

CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p. 133-144, 1957.

CHEN, C.R.; CONDRON, L.M.; DAVIS, M.R.; SHERLOCK, R.R. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, n.4, p.487-499, 2002.

CHIEN S. H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 229–255, 2011.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 383-395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of Soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199-207, 1985.

CORREA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, p.218-224, 2008.

COSTA, J.P.D.U., BARROS, N.F.D.; ALBUQUERQUE, A.W.; MOURA FILHO, G.U.; SANTOS, J.R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2006.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SSANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.828-835, 2006.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v 64, p. 197-214, 1995

DARRAH, P.R. The rizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and Soil*, v.155, n.1, p. 1-20, 1993.

DEGRYSE, F.; AJIBOYE, B.; ARMSTRON, R.D.; McLAUGHLIN, M.J. Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 2050-2059, 2013.

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M.J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualization, chemical measurements, and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 832-842, 2014.

DEGRYSE, F.D.; PHILLIPS, D.A. Roots exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. **Plant and soil**, v.245, n.1, p.35-47, 2002.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T.; THEYS, N. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 2, p. 652-660, 2002.

DUARTE, I.N.; de MELO JUNIOR, H.B.; de ANDRADE, A., SILVA, R.M.Q.L.; PIRES, M.R. Utilização de ácidos húmicos no revestimento do MAP. *Enciclopédia Biosfera*, p. 2084-2091, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos: 4.ed. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos,1999, 412p.

EYHERAGUIBEL, B.; SILVESTRE, J.; MORARD, P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. **Bioresource Technology**, Philadelphia, v. 99, p. 4206 - 4212, 2008.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, n. 2, p. 91-100, 1996.

FARIA, C.M.B.; PEREIRA, J.R. Movimento do fósforo no solo e seu modo de aplicação no tomateiro rasteiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 1363-1370, 1993.

FIXEN, P.E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. In: **Jornal Informações Agrônomicas**, Piracicaba, nº 126, p. 8-14, junho de 2009.

GAHOONIA, T.S.; RAZA, S.; NIELSEN, N.E. Phosphorus depletion in the rhizosphere as influenced by soil moisture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.159, n.2, p.213-218, 1994

GALVANI, R.; HOTTA, L.F.K.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus sources and fractions in an oxisol under no-tilled soybean. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 415-421, 2008.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fosforo no solo: uso e limitações. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2013, p.141-187.

GATIBONI, L.C., KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D. S., FLORES, J. P. C. 2007. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 31, 691-699, 2007.

GEELHOED, J.; VAN RIEMSDIJK, W.; FINDENEGG, G. Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, n. 3, p. 379-390, 1999

GERKE, J. Humic (Organic Matter)-Al(Fe)-Phosphate Complexes: An Underestimated Phosphate Form in Soils and Source of Plant-Available Phosphate. **Soil Science**, Philadelphia, v. 175, p. 417-425, 2010.

GILKES, R.J.; LIM-NUNEZ, R. Poorly soluble phosphates in Australian superphosphate - their nature and availability to plants. **Australian Journal of Soil Research**, Armidale, v. 18, n. 1, p.85-95, 1980.

GOMES, J. A.; SCAPIM, C. A.; BRACCINI, A.de L.; VIDIGAL FILHO, P. S.; SAGRILO, E.; MORA, F. Adubações orgânica e mineral, produtividade do milho e características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Acta Scientiarum Biological Sciences**, Maringá-PR, v. 27, n. 3, p. 521-529, 2005.

GONÇALVES, G.K.; MEURER, E.J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista brasileira de ciência do solo**. Campinas. Vol. 33, n. 2, p. 357-362, 2009.

GONÇALVES, J. L. M.; FIRME, D. J.; NOVAIS, R. F.; RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.9, n.2, p.107-111, 1985.

GUPPY, C. N.; MENEZIES, N. W.; BLAMEY, F. P. C.; MOODY, P. W. Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soils? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p.1405-1411, 2005.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HERRERA, B., FERNEY, W., RODRIGUES, M., BETTONI Teles, A. P., BARTH, G., & PAVINATO, P. S. Crop Yields and Soil Phosphorus Lability under Soluble and Humic-Complexed Phosphate Fertilizers. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1692-1702, 2016.

HINSINGER, P. Biologyavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, v.237, n.2, p.173-195, 2001

HU, H.Q.; HE, J.Z.; LI, X.Y.; LIU, F. Effect of several organic acids on phosphate adsorption by variable charge soils of central China. *Environment international*, New York, v.26, n.5, p. 353-358, 2001.

JUNGK, A. Dynamics of nutriente movement at the soil-root interface. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Eds). **Plant roots. The ridden half**, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, USA, p. 529-556, 1996

JUNGK, A.; BARBER, S.A. Phosphate uptake rate of corn roots related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agronomy Journals**, v.66, p.554-57. 1974.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. Eficiência de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria: Núcleo Regional Sul, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 31p, 1997

KOVAR, J. L.; PIERZYNSKI, G. M. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters-Revised edition. **Southern cooperative series bulletin**, n. 408, 2009.

LEITE, P.B.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & GUARÇONI M., A. Níveis críticos de fósforo, para milho, em casa de vegetação, de acordo com a sua localização no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 30, p. 497-508, 2006.

LEITE, P. B.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & GUARÇONI M., A. Níveis críticos de fósforo, para eucalipto, em casa de vegetação, em função da sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1311-1322, 2009.

LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W.; STEPHENSON, H.F. Identification of reaction products from phosphate fertilizer in soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 3, p. 446-452, 1962.

LINDSAY, W.L.; STEPHENSON, H.F. Nature of the reaction of monocalcium phosphate monohydrate in soils: II. Dissolution and precipitation reactions involving

iron, aluminum, manganese and calcium. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 23, n. 1, p. 18-22, 1959.

LOMBI, E.; McLAUGHLIN, M.J.; JOHNSTON, C.; ARMSTRONG, R.D.; HOLLOWAY, R.E. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.2, p.682-689, 2004.

LOPES, A. S.; SILVA, C. A. P.; BASTOS, A. R. R. **Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo**. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004, p.13-34.

LÓPEZ-BUCIO, J.L.; HERNANDEZ-ABREU, E.; SÁNCHEZ-CALDERÓN, L.; NIETOJACOBO, M.F.; SIMPSON, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate availability alters architecture and cause changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. **Plant Physiology**, v.129, p.244-256, 2002.

LYNCH, L. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, v.109, p.7-13, 1995.

MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Soil moisture effect on root growth and phosphorus uptake by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, n.4, p.519-523, 1985.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 1980. 215 p

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

MALAVOLTA, E. **O fósforo na planta e interações com outros elementos**. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: POTAFOS, 2004, 361p.

MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F.; SACRAMENTO, L.V.S.; RODRIGUES, L.A. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo. II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 239-244, 1993.

MATIAS, G. C. S. 2010. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e teores de matéria orgânica**. Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, PiracicabaSP, 174p.

McBEATH, T.M.; McLAUGHLIN, M.J.; KIRBY, J.K.; ARMSTRONG, R.D. Dry soil reduces fertilizer phosphorus and zinc diffusion but not bioavailability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 4, p. 1301-1310, 2012.

MCLAUGHLIN, M.J.; McBEATH, T.M.; SMERNIK, R.; STACEY, S.P.; AJIBOYE, B.; GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications

for fertiliser management and design: an Australian perspective. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1-2, p. 69-87, 2011.

MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005, 107p.

MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento de plantas In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H., BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.65-90.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, R.D.; BISSINI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. Fundamentos da química do solo. **Genesis**, Porto Alegre, p. 113- 153, 2012.

MIOLA, G. L.; TEDESCO, M. J.; FLÁVIO, C. G.; CAMARGO, A. O. Teor de água no solo na extração de fósforo por papel filtro impregnado com óxido de ferro. **Ciência Rural**, v.30, p.721- 723, 2000

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. R. Bras. Ci. Solo, 17:411- 416, 1993.

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Fluid fertilizers improve phosphorus diffusion but not lability in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 1, p. 214-224, 2014.

MOREL, Ch.; FARDEAU, J. C. Uptake of phosphate from soils and fertilizers as affected by soil P availability and solubility of phosphorus fertilizers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 121, p. 217-224, 1990.

MOTOMIYA, W.R.; FABRICIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 307-312, 2004.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.

MUSCOLO, A., BOVALO, F., GIONFRIDDO, F., NARDI, S. Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. **Soil Biol. Biochem**, v. 31, p. 1303–1311, 1999.

NASCIMENTO, C.A.C. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. 2016. Tese de Doutorado Curso de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305-325, 2009.

NEVES, J. C. L., CÁRDENAS, A. C., LANI, J. L., BARROS, N. F., & NOVAIS, R. (1987). Efeito de doses e localização de fósforo sobre o crescimento de mudas de eucalipto. In *CONGRESSO BRASILEIRO DE CIECIA DO SOLO*(Vol. 21, pp. 144-145).

NOLLA, Antonio; ANGHINONI, Ibanor. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 6, n. 1, p. 97-111, 2009.

NOVAIS, R.F.; FERREIRA, R.P.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Absorção de fósforo e crescimento do milho com sistema radicular parcialmente exposto a fonte de fósforo. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v.20, p.749-754, 1985.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV, 1999. 399p

NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, 1017p, 2007.

NYE, P.H. & TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley, University of California Press, 1977. 342p.

OLIVEIRA, E. M. M.; Ruiz, H. A.; Alvarez, V. H.; Ferreira, P. A.; Costa, F. O.; Almeida, I. C. C. Nutrient supplu by mass flow and diffusion to maize plant in response to soil aggregate size and water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.317-327, 2010.

O'Donnell, R.W. The auxin-like effects of humic preparations from leonardite. **Soil Sci**. v. 116, p. 106–112, 1972.

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 465-471, 2010.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E.; PAGE, A. L. Methods of soil analysis. Part 2. **Chemical and microbiological properties of Phosphorus**. **American Society of Agronomy Monograph**, v. 9, p. 403-430, 1982.

OLIVEIRA, F.B. **Localização do fósforo em sistema de produção plantio direto**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009.

- PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo-decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.83-90, 2001.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A., COSTA, L.C. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. **Acta Sci.**, v. 24, p. 1345-1351, 2002.
- RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, APTA e IAC, 2001, 284 p
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991.
- REDEL, Y.D.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, v. 139, n. 3, p. 388-396, 2007.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 36, p. 151-160, 2001.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 11-12, p. 1853-1871, 2002.
- RODRIGUES, Marcos. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ROSSETTO, R; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canavieiras. **Idea News**, Ribeirão Preto-SP, v. 8, n. 94, p. 78-90, 2008.
- RUIZ, H.A. **Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois latossolos**. 1986. 86 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG, 1986.
- SAUSEN, T. L. **Respostas fisiológicas de Ricinus communis à redução na disponibilidade de água no solo**. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- SCHMITT, D.E.; COMIN, J.J.; GATIOBONI, L.C.; TIECHER, T.; LORENSINI, F.; MELO, G.W.B; BRUNETTO, G.. Phosphorus fractions in sandy soils of vineyards in

southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 472-481, 2013.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Fósforo disponível determinado por lâmina de resina enterrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.77-84, 2009. . 13 Jul. 2011.

SCHUMACHER, M. V.; CECONI, D. E; SANTANA, C. A. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento de plantas de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert. **Boletim Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 47, p. 99-114, 2003.

SILVA, R.Q. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 2013. 166p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Solos e nutrição de planta, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SOUZA, R.F.; FAQUIM, V.; TORRES, P.R.F.; BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.30, p.975-983, 2006.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO fertilizer and plant nutrition bulletin**, v. 18, 2008.

TERUEL, D.A.; DOURADO NETO, D.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. Modelagem matemática como metodologia de análise do crescimento e arquitetura de sistemas radiculares. **Sci. Agric.**, v. 57, p. 683-691, 2000.

YAMADA, T., ed. **Fósforo na agricultura brasileira**. POTAFOS. Piracicaba, 2004. 726p.

YANG, J. C.; WANG, Z.G.; ZHOU, J.; JIANG, H.M.; ZHANG, J.F.; PAN, P.; GE, C.L. Inorganic phosphorus fractionation and its translocation dynamics in a low-P soil. **Journal of environmental radioactivity**, v. 112, p. 64-69, 2012.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004, 147p.

ZHANG, J. & BARBER, S.A. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **Soil Science Society Am. J.**, v. 56, p. 819-822, 1992.

ZHEN-YU, D.U.; QING-HUA, W.A.N.G; FANG-CHUN, L.I.U; HAI-LIN, M.A.; BING-YAO, M.A.; MALHI; S.S. Movement of phosphorus in a calcareous soil as affected by humic acid. **Pedosphere**, v. 23, n. 2, p. 229-235, 2013.

ZHU, J. K. Cell signaling under salt, water and cold stresses. **Current Opinion in Plant Biology**, Arizona, v. 4, p. 401-406, 2001.