

ECILA MERCÊS DE ALBUQUERQUE VILLANI

UFV	BIBLIOTECA	BBT	CDD	RG000513824
	CLASSIFICAÇÃO T 631.422 / V716f			
TÍTULO Fluxo difusivo de fosforo influenciado por				
				
102658 BBT				

FLUXO DIFUSIVO DE FÔSFORO INFLUENCIADO POR FONTES
E POR TEMPO DE CONTATO DO FÔSFORO COM O SOLO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Solos e
Nutrição de Plantas, para Obtenção
do Título de *Magister Scientiae*.

BIBLIOTECA CENTRAL
- UFV -

T
631.422

V716f

1995

ex. 1

102.658

18.11.94

DOAÇÃO

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1995

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

V716f
1995

Villani, Ecila Mercês de Albuquerque, 1963-
Fluxo difusivo de fósforo influenciado por fontes e por tempo de contato do fósforo com o solo/
Ecila Mercês de Albuquerque Villani. - Viçosa :
UFV, 1995.
57p. : il.

Orientador: Nairam Félix de Barros.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal
de Viçosa.

1. Solo - Fertilidade. 2. Fósforo - Mobilidade
no solo. 3. Fósforo - Fluxo difusivo no solo. 4.
Fósforo no solo. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD. 18. ed. 631.422

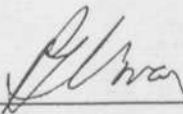
CDD. 19. ed. 631.422

ECILA MERCÊS DE ALBUQUERQUE VILLANI

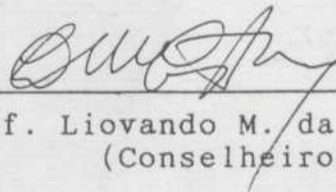
FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO INFLUENCIADO POR FONTES
E POR TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO COM O SOLO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Solos e
Nutrição de Plantas, para Obtenção
do Título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 02 de agosto de 1994



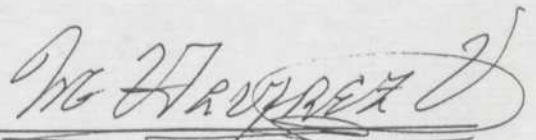
Prof. Roberto F. de Novais
(Conselheiro)



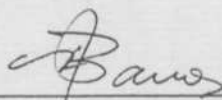
Prof. Liovando M. da Costa
(Conselheiro)



Prof. Júlio César Lima Neves



Prof. Victor Hugo Alvarez V.



Prof. Nairam Félix de Barros
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À memória do meu pai, Rômulo.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela oportunidade de realizar o Curso. A Andréa, Natália e Amaury.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior), pela bolsa de estudos. Dedicó.

À FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Nova Jersey), pela bolsa complementar.

Às Professoras Nilza Félix de Barros, pela orientação, pelo auxílio e ensinamentos transmitidos.

Às Professoras Roberta Ferreira de Moraes, pelas ensinamentos, pela paciência e, principalmente, pela disponibilidade de conhecer os caminhos da ciência.

Às Professoras Lívia Marjano de Costa, Júlio César Silva Neto e Vitor Hugo Alvarez V., pelo auxílio constante, pelas críticas e pelas sugestões.

Às colegas de Curso, em especial a Luiza, Cátia, Vera, Juliana, Cicero, Vanessa, Estevão, Marlon, Pedro, Davi e Sérgio.

Aos amigos: Bernadina, Vicente Casali, Darily e José Clério, pela amizade e apoios nos momentos difíceis.

Ao Jucaíral Clevalário Jr., Eupídio L. Fernandes Filho e Fátima Magalhães de Almeida, pela amizade, pelo apoio e estímulo que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

A José Luiz Teixeira e José Roberto de Freitas, pela amizade e auxílio nas análises estatísticas e nos trabalhos de digitação.

AGRADECIMENTOS

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial a Ferraira, Carlos, Roberto e Cardoso; e as secretárias Sônia e Dorinha, pela amizade e pelo convívio.

A Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar o Curso.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior), pela bolsa de estudos.

A FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pela bolsa complementar.

Ao Professor Nairam Félix de Barros, pela orientação, pela amizade, pelo estímulo e ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Roberto Ferreira de Novais, pelos ensinamentos, pela paciência e, principalmente, pela oportunidade de conhecer os caminhos da ciência.

Aos Professores Liovando Marciano da Costa, Júlio César Lima Neves e Victo Hugo Alvarez V., pelo estímulo constante, pela amizade, pelas críticas e pelas sugestões.

Aos colegas de Curso, em especial a Luiza, Cátia, Vera, Luciana, Cícero, Vander, Netto, Adailson, Marcos Godoy, Davi e Sérgio.

Aos amigos, Hermínia, Vicente Casali, Derly e José Clério, pela amizade e apoio nos momentos difíceis.

Ao Judicael Clevelário Jr., Elpídio I. Fernandes Filho e Fátima Magalhães de Almeida, pela amizade, pelo apoio e estímulo que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

A José Luiz Teixeira e José Roberto de Freitas, pela amizade e auxílio nas análises estatísticas e nos trabalhos de digitação.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial a Ferreira, Carlos, Roberto e Cardoso; e as secretárias Sônia e Dorinha, pela amizade e pelo convívio.

A todos que, de alguma forma, contribuíram pela realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ECILA MERCÊS DE ALBUQUERQUE VILLANI, filha de Rômulo Villani e Maria das Mercês de Albuquerque Villani, nasceu em 21 de setembro de 1963, em Juiz de Fora, MG.

Graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, em janeiro de 1988.

Em março de 1990, iniciou o Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa.

1.2. Disponibilidade de Fósforo	4
2.2.1. Mecanismos de Transporte	4
2.3. Métodos de Avaliação do Fósforo Disponível	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Preparo e Caracterização das Amostras de Solos	14
3.2. Enxerto do Fósforo Disponível de Fósforo	14
3.2.1. Preparo do Papel de Troca Aniónica (PA)	13
3.3. Instalação e Execução dos Enxertos	16
3.4. Inóculo	17

3.4.1. Ensaio 1 - Efeito de Fontes de Fósforo sobre seu Fluxo Difusivo	17
3.4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	18
3.4.3. Ensaio 3 - Efeito da NaCl sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	19
3.5. Determinação de Fósforo do Solo	19
3.5.1. Método 1	19
3.5.2. Papel de Troca Aniônica (PA)	20
3.5.3. Resina Troca Ânion (RTA)	20
CONTEÚDO	
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1. Ensaio 1 - Efeito da fonte de Fósforo sobre seu Fluxo Difusivo	21
4.1.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo	Página
4.1.2. Fósforo recuperado pelos Extratores Método 1, Papel Aniônico (PA) e Resina	
EXTRATO	viii
4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação sobre o	
1. INTRODUÇÃO	1
4.3.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo	21
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Formas de Fósforo no Solo	3
2.2. Disponibilidade de Fósforo	4
2.2.1. Mecanismos de Transporte	4
2.3. Métodos de Avaliação do Fósforo Disponível	10
4.3.2. Fósforo recuperado pelos Extratores Método 1, Papel Aniônico (PA) e	
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Preparo e Caracterização das Amostras de Solos.	13
3.2. Estudo do Fluxo Difusivo de Fósforo	15
3.2.1. Preparo do Papel de Troca Aniônica (PA) ...	15
3.3. Instalação e Condução dos Ensaios	16
3.4. Ensaios	17

3.4.1. Ensaio 1 - Efeito de Fontes de Fósforo Sobre Seu Fluxo Difusivo	17
3.4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	18
3.4.3. Ensaio 3 - Efeito do NaCl Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	19
3.5. Determinação de Fósforo do Solo	19
3.5.1. Mehlich-1	19
3.5.2. Papel de Troca Aniônica (PA)	20
3.5.3. Resina Trocadora de Ânions (RTA)	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1. Ensaio 1 - Efeito da Fonte de Fósforo Sobre Seu Fluxo Difusivo	21
4.1.1. Avaliação do Fluxo Difusivo do Fósforo	21
4.1.2. Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel Aniônico (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA)	28
4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	34
4.2.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo	34
4.2.2. Efeito do Tempo de Contato do Fósforo com os Solos Sobre a Recuperação do Elemento ..	37
4.3. Ensaio 3 - Efeito da Concentração de NaCl Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo	39
4.3.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo	39
4.3.2. Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA) em Função da Adição de NaCl	44
5. RESUMO E CONCLUSÕES	47
BIBLIOGRAFIA	50

EXTRATO

VILLANI, ECILA MERCÊS DE ALBUQUERQUE, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1995. Fluxo Difusivo de Fósforo Influenciado por Fontes e por Tempo de Contato do Fósforo com o Solo. Professor Orientador: Nairam Félix de Barros. Professores Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Liovando Marciano da Costa.

Avaliou-se o efeito do cátion acompanhante do fósforo sobre seu fluxo difusivo no solo, verificando a relação deste fluxo com o tempo de contato do fósforo com o solo e com o aumento da concentração de NaCl, em amostras da camada superficial de quatro latossolos.

Para a estimativa do fluxo difusivo de fósforo, utilizou-se o método do papel de troca aniônica (PA) que consistiu na impregnação de papel-filtro com hidróxido de ferro. Após impregnação, uma tira do PA foi fixada a uma lâmina de microscópio, que foi disposta, em duplicata, horizontalmente, entre duas camadas de solo em "câmaras de

difusão". Após 15 dias, as lâminas foram retiradas e lavadas com água destilada e o fósforo extraído do PA foi dosado.

Foram montados três ensaios: O primeiro consistiu na comparação das fontes: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e K_2HPO_4 ; no segundo, o efeito tempo de contato do fósforo com o solo foi estudado por meio da aplicação de $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de P no solo na forma de superfosfato triplo, incubado por 30 dias; e o terceiro, consistiu da aplicação de $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de P no solo, na forma de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, em solução, acrescido de NaCl em três doses: 0,0; 0,5 e $1,0 \text{ cmolc} \cdot \text{dm}^{-3}$ de solo.

Observou-se que o fluxo difusivo de fósforo foi maior nos solos arenosos do que nos argilosos. Dentro de cada solo, o fluxo difusivo de fósforo diferiu de acordo com a fonte. O aumento do tempo de contato do fósforo com o solo reduziu o fluxo difusivo de fósforo, para todos os solos. Tanto nos solos argilosos quanto nos arenosos, o aumento da concentração de NaCl não promoveu efeito significativo no fluxo difusivo de fósforo.

1. INTRODUÇÃO

O baixo teor de fósforo dos solos tem sido uma das principais causas da baixa produtividade agrícola em muitas regiões do Brasil. Além disso, a riqueza desses solos em óxidos de ferro e de alumínio reduz, de modo acentuado, a disponibilidade do fósforo aplicado via fertilizantes. Assim, vários pesquisadores têm desenvolvido trabalhos e estudos no sentido de entender as reações do fósforo em solos tropicais, no sentido de elevar a eficiência agronômica da adubação fosfatada.

Um dos problemas da nutrição fosfatada de plantas é a baixa mobilidade de fósforo no solo.

A difusão é o principal mecanismo de transporte do fósforo no solo e está diretamente relacionada ao conteúdo volumétrico de água do solo, à interação fósforo-colóides do solo, à distância a percorrer até atingir as raízes, ao teor do elemento no solo, à temperatura etc. Nesse sentido, qualquer interferência no manejo da adubação ou do solo que

favoreça a difusão do fósforo deverá refletir na melhor nutrição da planta, com conseqüente aumento de produtividade.

Embora o processo de difusão do fósforo seja complexo, estudos conduzidos com outros ânions, como o sulfato, têm demonstrado que o cátion acompanhante pode determinar a maior ou menor mobilidade desses ânions no solo. Assim, pode-se levantar a hipótese de que a difusão de fósforo no solo possa ser determinada pelo cátion acompanhante.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o efeito do cátion acompanhante do fósforo sobre o seu fluxo difusivo no solo, verificando a relação deste fluxo com o tempo de contato do fósforo com o solo e com a elevação da concentração de NaCl.

do solo e, portanto, estudos realizados em condições
similares de fertilidade e condições ambientais são
importantes para a compreensão dos efeitos da fertilização
tropical. São os responsáveis pela adsorção de fósforo
(LAL & VELLOZO, 1973; PARFITT, 1978; BARRA PILEG & ALII,
1983).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Formas de Fósforo no Solo

O conhecimento das formas nas quais o fósforo ocorre no solo é de extrema importância para o estudo das relações fósforo-solo-planta. Segundo LARSEN (1967), o fósforo pode encontrar-se na solução do solo (P-solução), precipitado ou adsorvido às partículas do solo porém, em equilíbrio com o P-solução (P-lábil) ou, ainda, precipitado sob a forma de compostos insolúveis, ou adsorvido às partículas do solo com elevada energia de adsorção, não estando em equilíbrio imediato com o P-solução (P-não-lábil).

Existe um consenso de que as reações de adsorção e, ou, de precipitação, se processam, principalmente, entre o fósforo e os íons de alumínio, de ferro ou de cálcio que se encontram livres ou fazendo parte da estrutura de constituintes do solo (SAMPLE et alii, 1980). Ocorrendo o fenômeno de adsorção, a concentração de fósforo na solução

do solo se reduzirá. Estudos mostram que os sesquióxidos amorfos de ferro e de alumínio, constituintes mais importantes da fração argila dos solos ácidos das regiões tropicais, são os responsáveis pela adsorção de fósforo (LEAL e VELLOSO, 1973; PARFITT, 1978; BAHIA FILHO et alii, 1983).

Muitos trabalhos vêm sendo realizados com o intuito de esclarecer a complexa dinâmica do fósforo no solo, uma vez que sua disponibilidade para as plantas depende do P-solução ou "fator intensidade"; do P-lábil ou "fator quantidade"; do poder tampão de fósforo no solo ou "fator capacidade", que avalia a capacidade que o solo tem para manter determinada concentração de fósforo em solução (GUNARY e SUTTON, 1967; OLSEN e KHASAWNEH, 1980). Além desses, o "fator difusão" apresenta-se relevante na dinâmica do fósforo na interação solo-planta (LARSEN, 1967).

2.2. Disponibilidade de Fósforo

2.2.1. Mecanismos de Transporte

A disponibilidade de um nutriente para as plantas é afetada pela taxa de movimentação do mesmo no solo até a superfície radicular. Somente a partir do conhecimento dos mecanismos e fatores que afetam o suprimento de nutrientes às raízes, é possível avaliar, quantitativamente, a absorção de um nutriente pelas plantas. BARBER (1962) considera dois mecanismos de movimentação de nutrientes no solo: fluxo de massa e difusão.

No fluxo de massa, a diferença de potencial matricial na superfície da raiz em relação ao restante do solo, ocasionado pela absorção de água pela planta (corrente transpiratória), forma um gradiente hídrico favorecendo a absorção de nutrientes. A quantidade suprida por esse mecanismo pode ser estimada em função da concentração do nutriente na solução do solo e do volume de água absorvido pela planta. Quando o total de nutrientes, transportado por fluxo de massa, excede à necessidade da planta, haverá acúmulo na superfície da raiz e, em conseqüência, ocorrerá difusão em direção contrária à raiz. Se a quantidade trazida pelo fluxo de massa for baixa, menos que o necessário, quantidades adicionais do íon alcançam a raiz por difusão. Além dos mecanismos citados, a interceptação radicular também contribui com o suprimento de nutrientes às plantas. As raízes, ao se desenvolverem no solo, entram em contato com os nutrientes disponíveis, absorvendo-os. A quantidade de nutrientes interceptados pela superfície radicular é bastante reduzida já que a quantidade absorvida corresponde àquela existente num determinado volume de solo ocupado por um volume correspondente de raízes.

A difusão de fósforo no solo ocorre essencialmente na fase líquida, sendo extremamente lenta em decorrência de três fatores: a) a água do solo ocupa apenas parte do volume livre ("vazio") total do solo, limitando, assim, o volume para difusão; b) o caminho da difusão é tortuoso; e c) a maior parte do fósforo que pode ser difundido está adsorvido à superfície das partículas do solo com as quais está em

equilíbrio, tamponando, assim, a quantidade de fósforo que está sendo difundido (BARBER, 1980).

Assumindo que o fósforo difunde, principalmente, em solução e adaptando-se a primeira lei de Fick para estudos em solos, a difusão de fósforo passou a ser matematicamente definida pela equação (NYE e TINKER, 1977; NYE, 1979):

$$D = D_1 \Theta f \frac{dC_1}{dC}$$

em que, D é o coeficiente de difusão de fósforo no solo, em $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; D_1 é o coeficiente de difusão de fósforo em solução aquosa ($0,89 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a 25°C); Θ é o conteúdo volumétrico de água no solo, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; f é um fator de impedância, adimensional; C_1 é a concentração de fósforo na solução (I) do solo em $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$, e C é a concentração de fósforo adsorvido-lábil (Q), em $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$.

A diferencial dC_1/dC é o inverso do fator capacidade do solo ($\Delta Q/\Delta I$). O fator de impedância, f , depende, fundamentalmente, da tortuosidade do caminho seguido pelo soluto através dos poros. Porém, outros efeitos podem ser nele incluídos, tais como: aumento da distância a ser percorrida, redução do gradiente de concentração ao longo desta distância e aumento da viscosidade da água, próxima à superfície das partículas sólidas do solo, afetando a mobilidade dos solutos. Todos esses efeitos favorecem a redução da difusão de íons.

Verifica-se relação direta entre difusão de fósforo e concentração de fósforo na solução do solo (HESLEP e BLACK,

1954; LEWIS e QUIRK, 1962; OLSEN e WATANABE, 1963; VAIDYNATHAN e NYE, 1970; MAHTAB et alii, 1971; KUNISHI e TAYLOR, 1975) e conteúdo de água do solo (ROWELL et alii, 1967; REMER e SCHILLING, 1981; VILLANI et alii, 1993). Estudando o efeito da dose de fósforo, do teor de argila e do teor de umidade do solo, MAHTAB et alii (1971) observaram que aumentando-se a dose de fósforo adicionada e o teor de umidade do solo, o coeficiente de difusão de fósforo também aumentava. Para os autores, esse resultado decorre da saturação progressiva da superfície de adsorção, resultando no aumento da concentração do fósforo na solução do solo, diminuindo a interação íon-colóide com o aumento na espessura do filme de água em torno das partículas sólidas do solo. RUIZ et alii (1988a), estudando o efeito do conteúdo de água sobre a difusão de fósforo em amostras de dois latossolos, em casa de vegetação, evidenciaram acréscimo acentuado do conteúdo de fósforo no exsudato xilemático da soja com o aumento das doses de fósforo nos tratamentos de potencial matricial de $-0,01$ MPa, registrando-se incremento desprezível nos tratamentos de potencial matricial de $-0,04$ e $-0,30$ MPa. Esses resultados devem-se, possivelmente, à redução da tortuosidade com o aumento do conteúdo de água do solo.

A textura, a mineralogia e o pH do solo são propriedades que têm efeito indireto sobre a difusão de fósforo.

Segundo NYE (1979), para um mesmo conteúdo de água, solos argilosos, com menor fator de impedância e maior interação íon-colóide, apresentarão menor coeficiente de

difusão. Contudo, a difusão será maior no solo argiloso quando se iguala o potencial hídrico, por este ter um maior conteúdo volumétrico de água, para a mesma energia de retenção. OLSEN e WATANABE (1963) obtiveram aumento linear no coeficiente de difusão de fósforo com o aumento do teor de argila para o mesmo potencial matricial.

Muitos são os trabalhos que procuraram relacionar a mineralogia do solo com o comportamento de fósforo no solo (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975; RESENDE, 1976; LOPES e COX, 1979; BAHIA FILHO, 1982).

Aos óxidos amorfos de ferro e de alumínio tem sido atribuído o papel de principal componente na adsorção de fósforo nos solos, particularmente nos mais intemperizados (SYERS et alii, 1973; LEAL e VELLOSO, 1973; SANTANA, 1973; BAHIA FILHO et alii, 1983). A relevância dos óxidos na adsorção foi observada por RUIZ et alii (1988b), em ensaio realizado com amostras de dois latossolos, um textura média (LVm) e outro textura muito argilosa (LVr), com 13,3% e 38,4% de óxidos de ferro mais de alumínio, respectivamente. Esses autores atribuíram à composição mineralógica e granulometria do solo LVr a maior fixação de fósforo deste solo e, conseqüentemente, menor concentração deste elemento na solução do solo. WANG e YU (1989a), estudando o efeito da carga superficial dos colóides do solo sobre os coeficientes de difusão de cátions e de ânions, verificaram redução nos coeficientes dos ânions estudados (NO_3^- e Cl^-) com a adição de Fe_2O_3 .

Os trabalhos que retratam a influência do íon acompanhante no processo difusivo são escassos tanto para

ânions quanto para cátions. O efeito da fonte de fósforo e da presença de outros sais em solução foi verificado por HESLEP e BLACK (1954). Esses autores observaram relação direta entre difusão de fósforo e solubilidade da fonte em água, ou seja, maior difusão de fósforo foi obtida com as fontes mais solúveis. Ânions podem ter seus coeficientes de difusão reduzidos em função da valência do cátion acompanhante. De acordo com WANG e YU (1989b), os ânions nitrato e cloreto apresentaram maior coeficiente de difusão em presença de cátions monovalentes (Na^+ e K^+) do que de bivalente (Ca^{2+}).

Vários métodos já foram desenvolvidos com a finalidade de estimar o fluxo difusivo de fósforo no solo. A técnica da diluição isotópica, por meio de ^{32}P , foi uma das mais utilizadas. Consistia, basicamente, na avaliação do fósforo isotopicamente trocável em equilíbrio com o fósforo lábil após um tempo determinado (OLSEN e WATANABE, 1963; ROWELL et alii, 1967; VAIDYANATHAN e NYE, 1970; VAIDYANATHAN e TALIBUDEEN, 1970; MAHTAB et alii, 1971; KUNISHI e TAYLOR, 1975; REMER e SCHILLING, 1981).

VAIDYANATHAN e NYE (1966) desenvolveram um método que permite estimar diretamente o fluxo difusivo de fósforo, e de outros íons, no solo, pela sua quantificação em papéis impregnados com resina de troca aniônica (papel-resina), após certo tempo de contato com o solo.

Considerando o fenômeno de adsorção de fósforo à superfície de óxidos de ferro e de alumínio, ZEE et alii (1987) desenvolveram uma técnica que permite avaliar a reversibilidade do fósforo adsorvido. A técnica consiste na

impregnação de papel-filtro com hidróxido de ferro, de onde, após determinado tempo de contato com o solo, seria extraído o fósforo adsorvido à sua superfície. Os autores acreditam que o papel impregnado comporta-se como um dreno de fósforo, à semelhança das raízes. Assim, alguns pesquisadores vêm utilizando a técnica proposta por ZEE et alii (1987) na quantificação do fluxo difusivo de fósforo (REIN, 1991; OLIVEIRA e RUIZ, 1993; VILLANI et alii, 1993).

2.3. Métodos de Avaliação do Fósforo Disponível

A avaliação do fósforo disponível no solo é feita, geralmente, utilizando-se inúmeros extratores químicos. Porém, a composição química desses extratores e a maneira como se processa a extração das formas de fósforo levam a resultados que nem sempre refletem, com segurança, a quantidade de fósforo que um solo é capaz de proporcionar à planta (THOMAS e PEASLEE, 1973; NOVAIS e KAMPRATH, 1979). Considerando-se os conceitos dos fatores intensidade, quantidade e capacidade nos estudos de solo, fez-se necessária uma revisão na utilização desses extratores, já que, na maioria das vezes, suas determinações refletem ora o fator quantidade, ora o fator intensidade (RAIJ, 1978; KAMPRATH e WATSON, 1980).

Recomendado para solos altamente intemperizados, o extrator Mehlich-1 vem sendo largamente utilizado na quantificação do fósforo disponível. Devido ao seu baixo pH (aproximadamente 1,2), esse extrator dissolve parcialmente óxidos de ferro e de alumínio, extraíndo o fósforo adsorvido

superficialmente, além do fósforo ligado a Ca. Como essas formas de fósforo entram rapidamente em equilíbrio com o fósforo na solução do solo, tem-se, então, uma estimativa do fósforo lábil. Contudo, solos com altos teores de argila e de óxidos de ferro terão, proporcionalmente, menor extração de fósforo, devido, provavelmente, à neutralização parcial da acidez da solução extratora ou readsorção do fósforo extraído (KAMPRATH e WATSON, 1980).

A extração do fósforo por resina de troca aniônica foi sugerida por AMER et alii (1955). Segundo esses autores, a resina funcionaria como um dreno para o fósforo do solo, extraíndo parte da fração lábil, com a vantagem de não apresentar agentes químicos que possam interferir sobre as formas de fósforo no solo. GONÇALVES (1988) constatou que os valores de fósforo recuperado pela resina foram maiores comparativamente aos dos extratores Mehlich-1 e Bray-1 para todos os solos, doses de fósforo aplicadas e os diferentes tempos de incubação.

Um novo método de extração vem ganhando espaço nas análises para determinação do fósforo disponível. Desenvolvido inicialmente por ZEE et alii (1987), o método do papel de troca aniônica tem como princípio a alta afinidade do fósforo por óxidos de Fe e de Al e consiste na impregnação de papel-filtro com hidróxido férrico. Uma característica positiva desse método seria o fato de o papel de troca aniônica não reagir com o solo, mas somente agir como um dreno de grande capacidade de adsorção, ao qual o fósforo da solução do solo é adsorvido. A adequabilidade do método para predizer o fósforo disponível para as plantas

foi constatada pelas altas correlações obtidas com o crescimento de plantas, com o fósforo absorvido e com o fósforo recuperado pelos extratores, tais como, Mehlich-1, Bray-1, Olsen, CaCl_2 e Resina (MENON et alii, 1989; REIN, 1991; GJORUP et alii, 1993). SHARPLEY (1991), estudando 203 amostras de solos com características químicas e taxonômicas distintas, verificou correlação significativa ($R^2 = 0,89$ a $0,93$, $P > 0,001$) entre o fósforo extraído pelo papel de troca aniônica e o extraído pelos demais métodos. Porém, sugere uma avaliação mais severa para que o método possa ser efetivamente aplicado.

QUADRO 1 - Características Químicas e Físicas de Amostras dos QUATRO Latossolos

Características	Solo			
	LV	LE	LVm	LA
pH em H ₂ O (1:2,5)	4,5	4,7	5,2	5,2
Al ³⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	0,3	1,3	0,3	0,4
Ca ²⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	0,3	0,2	0,3	0,5
Mg ²⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	0,8	0,1	0,8	0,3
P (mg. dm ⁻³)	1,3	1,8	0,3	1,7
K (mg. dm ⁻³)	30	34	37	37
Carbono orgânico (mg. g ⁻¹)	62	62	62	62
CAP (mg. P. g ⁻¹ . cmol _c .dm ⁻³)	1,004	1,360	1,004	1,194
ZAP (mg. P. g ⁻¹ . cmol _c .dm ⁻³)	1,420	0,404	1,004	1,243
USC total (mg. g ⁻¹)	5,04	1,90	1,26	3,70
P remanescente (mg. g ⁻¹)	4,16	1,50	31,35	31,70
Preço (mg. g ⁻¹)	11,20	11,05	4,07	3,45
Al ₂ O ₃ (mg. g ⁻¹)	27,27	26,78	4,14	6,90
SiO ₂ (mg. g ⁻¹)	37,00	36,95	3,34	11,70

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Preparo e Caracterização das Amostras de Solos

Amostras da camada de 0 a 20 cm de profundidade, de quatro latossolos (Latossolo Vermelho-Escuro - LE procedente do Município de Sete Lagoas-MG, Latossolo Vermelho-Amarelo - LV procedente da região de Viçosa-MG, Latossolo Vermelho-Amarelo textura média - LVm procedente do Município de Três Marias-MG e Latossolo Amarelo - LA procedente da região de Açailândia-MA), foram coletadas, secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm de malha e homogeneizadas, retirando-se subamostras para as caracterizações químicas e físicas (Quadro 1).

Baseando-se no teor de fósforo remanescente (Prem), foram estabelecidos dois grupos de solos para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Assim, um grupo, constituído pelo LE e LV, recebeu doses que variaram entre 0 e 90 mg.L⁻¹ de P e outro, constituído pelo

QUADRO 1 - Características Químicas e Físicas de Amostras dos Quatro Latossolos

Característica	Solo			
	LV	LE	LVm	LA
pH em H ₂ O (1:2,5)	4,5	4,7	5,7	5,2
Al ³⁺ (cmolc.dm ⁻³)(1)	0,9	1,1	0,1	0,0
Ca ²⁺ (cmolc.dm ⁻³)(1)	0,2	0,2	0,1	0,9
Mg ²⁺ (cmolc.dm ⁻³)(1)	0,0	0,1	0,0	0,2
P (mg.dm ⁻³)(2)	1,3	1,8	0,0	1,7
K (mg.dm ⁻³)(2)	30	24	37	98
Carbono orgânico (dag.kg ⁻¹)(3)	1,58	3,62	0,82	1,50
CMAP (mg P.cm ⁻³ solo)(4)	1,044	1,340	0,284	0,194
EAP (ug P.cm ⁻³) ⁻¹ (5)	0,420	0,404	1,024	0,243
CTC total (cmolc.kg ⁻¹)	5,64	7,90	1,96	3,78
P remanescente (mg.L ⁻¹)(6)	4,16	6,56	31,35	51,74
Fe ₂ O ₃ (dag.kg ⁻¹)(7)	12,20	11,68	4,61	2,48
Al ₂ O ₃ (dag.kg ⁻¹)(7)	22,60	27,78	8,16	8,90
SiO ₂ (dag.kg ⁻¹)(7)	22,00	24,76	3,84	11,50
TiO ₂ (dag.kg ⁻¹)(7)	1,54	1,03	0,99	0,81
Fe-DCB (dag.kg)(8)	9,67	6,46	2,50	1,70
Fe-OX (dag.kg)(9)	0,41	0,32	0,31	0,28
Capacidade de campo (dag.kg ⁻¹)(10)	39,87	35,45	15,88	20,30
Equivalente de umidade (dag.kg ⁻¹)(11)	30,94	32,40	7,49	14,80
Areia grossa (dag.kg ⁻¹)(12)	13	7	28	36
Areia fina (dag.kg ⁻¹)(12)	7	3	50	29
Silte (dag.kg ⁻¹)(12)	6	22	4	5
Argila (dag.kg ⁻¹)(12)	74	68	18	30
ADA (dag.kg ⁻¹) ¹³	4	15	4	16

(1) KCl 1N (VETTORI, 1969).

(2) Extrator Mehlich-1.

(3) Método de Walkley e Black (JACKSON, 1958).

(4) Capacidade máxima de adsorção de fósforo (NOVAIS e KAMPRATH, 1979).

(5) Energia de adsorção de fósforo (NOVAIS e KAMPRATH, 1979).

(6) Fósforo em equilíbrio após agitação por 1 hora com solução de CaCl₂ 0,01 cmol.L⁻¹ com 60 ug P/ml.

(7) Ataque sulfúrico (VETTORI, 1969).

(8) Método citrato-ditionito-bicarbonato-fração argila do solo (COFFIN, 1963).

(9) Método oxalato-fração argila do solo (McKEAGUE, 1978).

(10) Método da coluna (FERNANDES, 1967).

(11) Método da centrifuga.

(12) Método da pipeta (EMBRAPA, 1979).

(13) Argila dispersa em água.

LVm e LA, recebeu, entre 0 e 25 mg.L⁻¹ de P. A CMAP foi estimada utilizando-se a isoterma de Langmuir. A isoterma, além da adsorção máxima de fósforo dos solos, forneceu a constante relacionada com a energia de adsorção de fosfato (EAP).

As amostras de solos foram autoclavadas a 120°C, antes da aplicação dos tratamentos, por duas horas, para eliminar microrganismos que pudessem causar a decomposição do papel de troca aniônica utilizado no estudo do fluxo difusivo (item 3.2). Esta operação foi repetida 48 horas após. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos que foram hermeticamente fechados.

3.2. Estudo do Fluxo Difusivo de Fósforo

Para avaliar o fluxo difusivo de fósforo, foi utilizada a técnica proposta por ZEE et alii (1987), modificada por VILLANI et alii (1993). O método quantifica o fósforo adsorvido ao papel de troca aniônica (PA), após um período de contato com solo, com teor de água próximo à capacidade de campo.

3.2.1. Preparo do Papel de Troca Aniônica (PA)

O PA foi preparado utilizando-se papel-filtro FRAMEX 389³, filtração lenta, de 11 cm de diâmetro, imerso em solução de FeCl₃.6H₂O 0,4 mol.L⁻¹, por 15 segundos. Cada folha foi, então, colocada sobre uma superfície lisa (vidro) para a eliminação do excesso de cloreto férrico. Isso foi

feito pressionando-se a folha tratada com outra ainda limpa, com o intuito de evitar a precipitação desuniforme do hidróxido de ferro. Em seguida, transferiu-se a folha tratada para uma solução de NH_4OH $2,7 \text{ mol.L}^{-1}$, também por 15 segundos, o que causou a imediata mudança da coloração do papel, de amarelo para marron-avermelhado, indicando a formação do hidróxido de ferro. Ao ser retirado da solução de hidróxido de amônio, o papel foi lavado com água destilada e colocado para secar em varais, presos por pregadores plásticos. Depois de seca, a folha tratada foi cortada em tiras com 14 cm^2 , fixadas lateralmente com fita adesiva à superfície de uma lâmina de microscópio, que serviu como suporte para o PA.

3.3. Instalação e Condução dos Ensaios

Utilizou-se, como câmara de difusão, um anel de PVC, com diâmetro interno de 100 mm e 50 mm de altura, com volume útil correspondente a 387 dm^3 . Ao fundo do anel, adaptou-se uma lâmina de isopor de 1,5 cm de espessura, presa com fita de polietileno.

As amostras de solos foram separadas em subamostras de 387 dm^3 de solo e os tratamentos aplicados conforme cada ensaio. O teor de água do solo, para cada unidade experimental (um anel de PVC), foi elevado a 85% da capacidade de campo de cada solo.

Cada câmara recebeu metade do volume de solo de cada subamostra, onde duas lâminas foram dispostas, horizontalmente, com a face do PA para baixo, completando-

se, em seguida, o volume da câmara com o solo restante. Cada câmara foi coberta com plástico para evitar perda de umidade.

O estudo foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a $27 \pm 3^\circ\text{C}$, por 15 dias. Após esse período, as câmaras foram desmontadas, retirando-se as lâminas, que foram lavadas com água destilada, em jatos de piseta. O PA foi retirado da lâmina, recortando-se a área delimitada (14 cm^2) com auxílio de um estilete.

O PA foi acondicionado em frasco plástico de 80 mL e o fósforo extraído, por agitação, em 40 mL de H_2SO_4 $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$, por uma hora. O papel foi retirado, a solução filtrada e a concentração de fósforo determinada segundo BRAGA e DEFELIPO (1974).

Ao final de cada ensaio, a porção de solo da parte inferior da câmara de difusão foi seca, destorroada, passada em peneira com malha de 2 mm, homogeneizada, ensacada e armazenada em local arejado e seco. Subamostras dessas porções foram retiradas para a determinação do pH em água, na relação solo:solução de 1:2,5 (VETTORI, 1969), e do teor de fósforo.

3.4. Ensaio

3.4.1. Ensaio 1 - Efeito de Fontes de Fósforo Sobre Seu Fluxo Difusivo

Em cada subamostra de solo, aplicaram-se 500 mg.dm^{-3} de P, utilizando-se como fontes $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$,

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e K_2HPO_4 , p.a., todas as fontes adicionadas em solução. As unidades experimentais foram preparadas conforme no item 3.3. Os tratamentos se originaram em arranjo fatorial $4(5 + 1)$, correspondendo, respectivamente, a quatro solos e cinco fontes de fósforo, mais um tratamento adicional, sem a adição de fósforo. Os tratamentos foram repetidos três vezes e dispostos em blocos ao acaso.

Decorridos 15 dias após a instalação do ensaio, extraiu-se o fósforo adsorvido ao PA e de amostras de solo conforme descrito nos itens 3.3 e 3.5, respectivamente.

3.4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo

A cada subamostra de solo, adicionaram-se 500 mg.dm^{-3} de P na forma de superfosfato triplo. Essas subamostras foram acondicionadas em sacos plásticos e incubadas por 30 dias, após o teor de água do solo ser elevado a 85% da capacidade de campo. Decorrido esse período, acondicionaram-se as subamostras nas câmaras de difusão (item 3.3).

Os tratamentos se originaram do arranjo fatorial $4(2 + 1)$, correspondendo, respectivamente, aos solos e sem e com incubação, acrescentando-se um tratamento constituído pelos quatro solos, sem a adição de fósforo, sem incubação. Foram utilizadas três repetições e os tratamentos foram dispostos em blocos casualizados.

O tempo de condução do ensaio e as determinações realizadas foram as mesmas descritas no Ensaio 1 (item 3.4.1.)

3.4.3. Ensaio 3 - Efeito do NaCl Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo

Adicionou-se, às subamostras de solos, solução contendo 500 mg.dm^{-3} de P, na forma de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, p.a., acrescida de NaCl, p.a., em três doses: 0,0; 0,5 e 1,0 cmolc.dm^{-3} de solo.

Adotou-se o esquema fatorial $4(3 + 1)$, correspondendo, respectivamente, aos solos e às doses de NaCl. Os tratamentos, com três repetições, foram dispostos em blocos casualizados. Um tratamento adicional, sem a adição de fósforo e de NaCl, foi também utilizado.

O tempo de condução do ensaio e as determinações feitas são as mesmas descritas no Ensaio 1.

3.5. Determinação de Fósforo do Solo

O fósforo nas amostras de solo coletadas após os ensaios foi dosado após redução do complexo fosfomolíbico com ácido ascórbico, segundo BRAGA e DEFELIPO (1974), em extratos obtidos por Mehlich-1 e por PA. No caso da resina trocadora de ânions (RTA), o fósforo foi dosado de acordo com metodologia descrita por FERREIRA et alii (1990).

3.5.1. Mehlich-1

Utilizou-se a relação solo:solução 1:10, com o tempo de agitação de cinco minutos. Após a agitação, filtrou-se com papel de filtração lenta e o teor de fósforo no extrato foi determinado.

3.5.2. Papel de Troca Aniônica (PA)

Utilizou-se PA impregnado com hidróxido férrico, agitando-se 2,5 cm³ de solo, com uma tira de 72,4 cm², em 25 mL de CaCl₂ 1 cmol.L⁻¹, a 180 rpm, por 16 horas como utilizado por GJORUP et alii (1993). A argila aderida ao papel foi retirada com água destilada e o papel agitado por uma hora, com 25 mL de H₂SO₄ 0,2 mol.L⁻¹, seguindo-se a dosagem de fósforo no extrato.

3.5.3. Resina Trocadora de Ânions (RTA)

Em frascos plásticos, agitaram-se 5 cm³ de solo com 25 mL de água destilada na presença de uma bolinha de vidro, durante meia hora, em agitador horizontal circular a 220 rpm, aproximadamente. Após essa etapa de desagregação do solo, a bolinha foi retirada e 2,5 cm³ de resina trocadora de ânions (Amberlite IRA-400), preconditionada segundo FERREIRA et alii (1990), foram adicionados. Decorridas 16 horas de agitação, a resina foi separada do solo e transferida para frasco plástico de 80 mL. Adicionaram-se 50 mL de solução de NH₄Cl 0,8 mol.L⁻¹ e HCl 0,2 mol.L⁻¹ e, após 30 minutos de repouso, agitou-se por uma hora. O sobrenadante foi, então, separado para a determinação de fósforo.

QUADRO 2 - Fluxo difusivo Avaliado pelo Método Aniónico ao Papel Aniónico, em Amostras de Solos, Tratadas com Diferentes Fontes Solúveis de Fósforo

Fontes	Solos				Média
	LV	LE	LVM	LA	
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	0,0993	0,0475	0,6706	1,1026	0,4802
Mg H ₂ PO ₄	0,1505	0,1975	0,7299	1,2584	0,5387
(NH ₄) ₂ HPO ₄	0,2822	0,1272	0,3058	0,9782	0,5712
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	0,3721	0,1267	0,7443	0,9111	0,5374
K ₂ HPO ₄	0,2995	0,1143	0,7400	0,9277	0,5372
Testemunha	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio 1 - Efeito da Fonte de Fósforo Sobre Seu Fluxo Difusivo

4.1.1. Avaliação do Fluxo Difusivo do Fósforo

As quantidades de fósforo adsorvidas ao papel aniônico fornecem uma estimativa da difusão (fluxo difusivo). De modo geral, o fluxo difusivo de fósforo variou com a fonte de fósforo empregada, nos quatro solos estudados (Quadro 2). Analisando-se o efeito da fonte de fósforo no fluxo difusivo deste elemento, percebe-se que os valores obtidos nos solos mais arenosos, LVM e LA, foram significativamente superiores àqueles encontrados nos solos mais argilosos, LV e LE, para as cinco fontes aplicadas (Quadros 2 e 3). O menor fluxo difusivo de fósforo nos solos mais argilosos pode ser explicado, em parte, pelas suas maiores capacidades máximas de adsorção de fósforo (CMAP)

QUADRO 2 - Fluxo Difusivo Avaliado pelo Fósforo Adsorvido ao Papel Aniônico, em Amostras de Solos, Tratadas com Diferentes Fontes Solúveis de Fósforo

Fontes	Solos				Média
	LV	LE	LVm	LA	
	----- umol.cm ⁻² de P -----				
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ .H ₂ O	0,0999	0,0475	0,6706	1,1026	0,4802
NH ₄ H ₂ PO ₄	0,1508	0,1075	0,7299	1,1664	0,5387
(NH ₄) ₂ HPO ₄	0,3822	0,1272	0,8058	0,9702	0,5713
Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	0,4488	0,1626	0,7524	0,8484	0,5531
K ₂ HPO ₄	0,3721	0,1267	0,7415	0,9111	0,5378
	0,2908	0,1143	0,7400	0,9997	
Testemunha	0,0004	0,0008	0,0005	0,0005	0,0006

(Quadro 1). Nos solos arenosos, em razão da dose de fósforo aplicada (500 mg/dm³) é possível que na realidade tenha ocorrido predominantemente o fluxo de massa em vez de difusão de fósforo.

Quando os solos LV e LE são comparados entre si, verifica-se que o LV, com 74 dag.kg⁻¹ de argila, apresentou, em média, para fontes, maior fluxo de fósforo do que o LE, com 68 dag.kg⁻¹ de argila. Possivelmente, essa diferença é devida à maior CMAP do solo LE (Quadro 1). Comparando-se o solo LV (74 dag.kg⁻¹ de argila) com o LA (30 dag.kg⁻¹ de argila), verifica-se que o valor da CMAP do primeiro é, aproximadamente, 5,4 vezes superior ao segundo. Muitos são os trabalhos que mostram relação direta entre a adsorção de fósforo e o teor de argila dos solos (NOVAIS e KAMPRATH, 1979; BAHIA FILHO et alii, 1983; MUNIZ et alii, 1987).

QUADRO 3 - Análise de Variância dos Dados de Fluxo Difusivo de Fósforo (P-Difusão) e do Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel Aniônico (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA), Obtidos com a Aplicação de Diferentes Fontes Solúveis de Fósforo, nas Amostras de Solos em Estudo

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios				
		P-difusão	P-Mehlich-1	P-PA	P-RTA	
Blocos	2	0,02**	2354,78**	25,07**	22822,77**	
Solos (S)						
LV + LE vs LVm + LA	1	5,57**	441070,06**	137631,17**	343467,98**	
LV vs LE	1	0,19**	4482,88*	234,90**	238,54**	
LVm vs LA	1	0,42**	53123,10**	38423,45**	83307,85**	
Fontes (F)						
Test. vs outras fontes	d/LV	1	0,22**	96457,93**	6918,53**	161680,38**
Ca ²⁺ vs NH ₄ ⁺ + Na ⁺ + K ⁺	d/LV	1	0,14**	7,58**	70,57**	2586,58**
NH ₄ ⁺ vs Na ⁺ + K ⁺	d/LV	1	0,06**	31,24**	65,60**	0,01**
(NH ₄ ⁺) ₁ vs NH ₄ ⁺	d/LV	1	0,08**	61,40**	0,20**	2090,74**
Na ⁺ vs K ⁺	d/LV	1	0,01**	114,06**	0,01**	4,78**
Test. vs outras fontes	d/LE	1	0,03**	122416,68**	5230,37**	149390,97**
Ca ²⁺ vs NH ₄ ⁺ + Na ⁺ + K ⁺	d/LE	1	0,02**	0,22**	1,24**	3102,67**
NH ₄ ⁺ vs Na ⁺ + K ⁺	d/LE	1	0,00**	16,18**	18,41**	4,88**
(NH ₄ ⁺) ₁ vs NH ₄ ⁺	d/LE	1	0,01**	418,44**	0,15**	100,00**
Na ⁺ vs K ⁺	d/LE	1	0,01**	149,31**	0,16**	189,71**
Test. vs outras fontes	d/LVm	1	1,37**	304278,83**	33227,15**	323564,54**
Ca ²⁺ vs NH ₄ ⁺ + Na ⁺ + K ⁺	d/LVm	1	0,02**	287,18**	1499,70**	21053,83**
NH ₄ ⁺ vs Na ⁺ + K ⁺	d/LVm	1	0,01**	771,65**	494,06**	5714,52**
(NH ₄ ⁺) ₁ vs NH ₄ ⁺	d/LVm	1	0,01**	1633,50**	115,05*	69,03**
Na ⁺ vs K ⁺	d/LVm	1	0,01**	377,69**	0,69**	266,49**
Test. vs outras fontes	d/LA	1	2,50**	488259,73**	93277,74**	560216,83**
Ca ²⁺ vs NH ₄ ⁺ + Na ⁺ + K ⁺	d/LA	1	0,04**	729,65**	120,93*	346,75**
NH ₄ ⁺ vs Na ⁺ + K ⁺	d/LA	1	0,11**	91,03**	0,90**	138,43**
(NH ₄ ⁺) ₁ vs NH ₄ ⁺	d/LA	1	0,06**	34,63**	177,56*	13,49**
Na ⁺ vs K ⁺	d/LA	1	0,01**	81,48**	0,55**	179,95**
Resíduo		46	0,01	640,56	25,25	872,02
C.V. (%)			11,68	9,97	5,85	10,58

*, **: Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
ns: Não-significativo a 5%.

Os óxidos de ferro e de alumínio têm importante papel no processo de adsorção de fósforo. Os solos arenosos apresentam teores de Fe_2O_3 e de Al_2O_3 inferiores aos dos solos argilosos (Quadro 1), o que, em parte, explica o maior fluxo difusivo de fósforo nos solos arenosos. No solo LE, com os menores valores médios do fluxo entre os quatro solos, o teor de Fe_2O_3 é aproximadamente 4,7 vezes superior ao teor encontrado no LA, com o maior fluxo difusivo médio.

RUIZ et alii (1988b) mencionam o fato de a concentração de fósforo na solução do solo decrescer devido sua adsorção em solos com maiores teores de argila e de óxidos de ferro e de alumínio. Também WANG e YU (1989a) observaram redução nos coeficientes de difusão de Cl^- e de NO_3^- quando Fe_2O_3 foi adicionado ao solo. Segundo esses autores, a adição do Fe_2O_3 promoveu aumento nas cargas positivas superficiais e decréscimo nas negativas, o que resultou no decréscimo do coeficiente de difusão daqueles ânions. Para o Cl^- , a adição de Fe_2O_3 foi mais importante, observando-se redução no seu coeficiente de difusão em até 69%. Para o NO_3^- essa redução foi menor, porém não menos expressiva. BAHIA FILHO et alii (1983), estudando a relação entre adsorção de fósforo e minerais componentes da fração argila de latossolos do Planalto Central, observaram que a goethita foi o componente da fração argila responsável por 86% das variações observadas na CMAP.

Todavia, deve-se salientar que, neste trabalho, os teores de Al_2O_3 são, ainda, superiores aos de Fe_2O_3 , nos quatro solos (Quadro 1). Entre os mais argilosos, o solo LE apresenta cerca de $5,2 \text{ dag.kg}^{-1}$ mais Al_2O_3 que o solo LV, o

que pode favorecer o decréscimo no fluxo difusivo de fósforo. CAMPELLO (1993), citando diversos autores, menciona que a participação dos compostos de alumínio, seja Al_2O_3 por ataque sulfúrico, alumínio cristalizado ou alumínio amorfo, no processo de fixação de fósforo, foi maior que a dos compostos de ferro. GONÇALVES (1988) observou, como tendência geral, maior concentração da forma de fósforo ligado a alumínio (P-Al) em relação à forma de fósforo ligado a ferro (P-Fe), provavelmente em decorrência da maior reatividade do alumínio em relação ao ferro, quanto ao fenômeno de adsorção de fósforo nos solos.

O fosfato monocálcico foi a fonte que, em relação às demais, para os solos, exceto o LA, proporcionou menor fluxo de fósforo (Quadros 2 e 3). As fontes amoniacais comportaram-se distintamente entre solos. Nos solos LE e LVm, essas fontes promoveram fluxos de fósforo semelhantes. Entretanto, a diferença nos fluxos nos solos LV e LA foi significativa; no LA, o MAP proporcionou maior fluxo, enquanto que, no LV, o maior fluxo foi obtido com o DAP. O fluxo de fósforo nos solos não se alterou se as fontes foram a sódica ou a potássica. Assim, esses resultados permitem afirmar que o cátion acompanhante do ânion fosfato interferiu no processo difusivo de fósforo no solo.

Sabe-se que os fertilizantes fosfatados apresentam reações distintas quando aplicados ao solo devido sua composição. A solução saturada que se produz na região de aplicação do fertilizante pode ter característica ácida ou alcalina, conforme o íon acompanhante do fosfato (SAMPLE et alii, 1980; BARROW, 1985; FASSBENDER, 1986), gerando

variações na carga e no potencial elétrico das superfícies de reação (LOW, 1981; PARDO et alii, 1992). Conforme o pH do meio, os óxidos de Fe e de Al presentes no solo apresentarão cargas negativas ou positivas influenciando a adsorção de fósforo e, conseqüentemente, o processo difusivo. Estudos conduzidos por EVANS JR. e SORENSEN (1986) mostraram que qualquer alteração na força iônica da solução do solo, seja aumentando-a ou reduzindo-a, interfere na disponibilidade do íon fosfato devido às mudanças geradas nas superfícies de reação, favorecendo ou não a seletividade destas superfícies pelo íon em questão.

Das fontes aplicadas, o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ e o $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ proporcionaram menores valores de fluxo difusivo nos solos LV, LE e LVm. A adição de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ praticamente não alterou o pH desses solos quando comparado ao pH do tratamento em que não houve adição de fósforo (testemunha) (Quadro 4). Porém, o $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ promoveu o acréscimo de aproximadamente uma unidade de pH, nos três solos. Segundo SAMPLE et alii (1980), tanto o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ quanto o $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ apresentam baixos valores de pH em solução saturada, sendo 1,5 e 3,5, respectivamente. Apesar das alíquotas das soluções adicionadas ao solo não estarem saturadas, acredita-se que o pH das mesmas não diferiu muito daquele da solução saturada devido à elevada concentração das soluções. A elevação de pH com a aplicação de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ sugerem a geração de cargas negativas no solo, daí os valores de pH dos solos aos quais foi aplicado serem superiores aos obtidos com o emprego do $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$.

QUADRO 4 - Valores de pH Observados ao Final do Período de Ensaio em Amostras de Solos com Diferentes Fontes Solúveis de Fósforo

Fontes	Solos			
	LV	LE	LVm	LA
pH				
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	4,60	4,97	5,33	5,07
NH ₄ H ₂ PO ₄	5,56	5,79	6,71	5,91
(NH ₄) ₂ HPO ₄	6,39	6,30	6,99	6,66
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	6,70	6,66	7,88	7,14
K ₂ HPO ₄	6,40	6,33	7,84	7,03
Testemunha	4,50	4,70	5,70	5,20

Um acréscimo de, aproximadamente, duas unidades de pH, para os quatro solos, em relação à testemunha, foi observado com a aplicação de (NH₄)₂HPO₄, Na₂HPO₄ e K₂HPO₄ (Quadro 4). As três fontes apresentam pH em solução saturada superior a 7,0, o que, provavelmente, favorece o aparecimento de cargas negativas. A natureza alcalina desses sais favoreceu as alterações no pH da solução, já que a base associada de cada um deles é considerada uma base forte.

PARDO et alii (1992) atribuíram ao pH do meio as variações na adsorção de fósforo, com a adição de NaH₂PO₄. Vários autores, por eles citados, afirmam que o potencial elétrico das superfícies de reação mudam com o pH de maneira distinta na presença de vários eletrólitos e que a adsorção de fósforo decresça com a elevação do pH, quando soluções

contendo cátions monovalentes, em vez de divalentes, são usadas.

Entretanto, os dados apresentados neste trabalho mostraram que o fluxo difusivo de fósforo na solução do solo é controlado por dois fatores: as cargas nas superfícies dos colóides do solo, ligadas ao pH, produto do caráter alcalino ou ácido dos sais e a atividade dos íons em solução.

4.1.2. Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel Aniônico (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA)

A capacidade de recuperação de fósforo pelos extratores foi influenciada por características físicas e químicas dos solos, particularmente a textura, os teores de óxidos de ferro e de alumínio e a CMAP (Quadros 1 e 5).

Nos tratamentos onde nenhum fósforo foi aplicado (testemunha) verificaram-se, para todos os solos e extratores, diferenças altamente significativas em relação aos que receberam fósforo (Quadro 3).

Os teores recuperados pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA nos solos LV e LE, mais argilosos e com maior CMAP, foram inferiores aos obtidos nos solos LVm e LA (Quadro 6). Segundo KAMPRATH e WATSON (1980), as informações sobre a disponibilidade de fósforo nos solos, resultante de teores obtidos por extratores químicos ou não, nem sempre estão relacionadas com o "status" de P-lábil dos solos. Os vários métodos de extração removem quantidades diferentes de fósforo, isso em razão, principalmente, da natureza do

QUADRO 5 - Teores de Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA), Utilizando-se Diferentes Fontes Solúveis de Fósforo, em Amostras de Solos

Tratamento	Solo				Média
	LV	LE	LVm	LA	
	----- mg.dm ⁻³ de P -----				
	----- Mehlich-1 -----				
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	195,64	223,23	360,50	430,14	302,38
NH ₄ H ₂ PO ₄	199,00	230,79	374,13	447,93	312,96
(NH ₄) ₂ HPO ₄	192,61	214,09	341,04	452,74	300,12
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	194,67	219,77	333,61	441,14	297,30
K ₂ HPO ₄	203,39	229,75	349,48	448,51	307,78
Média	197,06	223,52	351,75	444,09	
Testemunha	0,64	2,24	2,88	2,16	1,83
	----- PA -----				
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	49,11	46,62	96,12	188,75	95,15
NH ₄ H ₂ PO ₄	52,01	46,26	110,32	190,69	99,82
(NH ₄) ₂ HPO ₄	52,38	45,94	119,08	201,57	104,74
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	56,84	48,04	127,87	195,88	107,16
K ₂ HPO ₄	56,91	49,12	127,19	195,28	107,12
Média	53,45	47,20	116,12	194,43	
Testemunha	0,84	1,46	0,82	1,27	1,10
	----- RTA -----				
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	228,72	219,43	285,08	465,54	299,69
NH ₄ H ₂ PO ₄	242,88	260,11	360,32	482,46	336,44
(NH ₄) ₂ HPO ₄	280,22	251,94	353,54	479,46	341,29
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	260,66	260,37	393,91	479,65	348,64
K ₂ HPO ₄	264,44	249,12	407,24	468,69	347,37
Média	255,38	248,19	360,02	475,16	
Testemunha	0,68	3,74	0,26	1,79	1,62

extrator, das características do solo e das formas em que o fósforo se encontra no solo. Assim, observa-se que os teores de fósforo recuperado pelo PA foram inferiores àqueles obtidos com o Mehlich-1 e com o RTA, para os quatro solos. A diferença nos teores recuperados entre os solos argilosos e arenosos, pelo PA, foi altamente significativa. Resultados semelhantes foram obtidos por GJORUP et alii (1993). Conforme ZEE et alii (1987), o método simularia o mecanismo de absorção de fósforo pelas plantas, já que ele promove alteração menos drástica dos componentes do solo.

No presente estudo, particularmente nos solos mais argilosos, LV e LE, observou-se menor capacidade de extração do Mehlich-1, em comparação com a RTA. Este fato pode ser atribuído, principalmente, à exaustão daquele extrator. A possível protonação dos grupamentos (Fe, Al)OH presentes nos óxidos de ferro e de alumínio na fração argila dos solos ácidos de cerrado, resultando em (Fe, Al)OH₂⁺, ou mesmo a ocorrência natural desses grupamentos nos solos, pode ter ocasionado a adsorção do ânion SO₄⁼ ou mesmo readsorvido o fósforo extraído, reduzindo, desta forma, a capacidade de ação desse extrator, como observado em outros trabalhos (KAMPRATH e WATSON, 1980; BAHIA FILHO et alii, 1983). Outra possibilidade é que os extratores estimam formas diferentes de fósforo no solo. O Mehlich-1 extrai todo o fósforo correspondente ao fator intensidade e parte do fator quantidade, atuando ainda sobre o P-não-lábil; enquanto a RTA, por apresentar uma grande quantidade de sítios de adsorção, extrai o fósforo correspondente ao fator intensidade e a maior parte do fator quantidade. CAMPELLO

(1993) verificou que o total de P-lábil extraído pela resina, em relação à quantidade inicialmente aplicada, variou, em média, de 35 a 57%, dependendo de características físicas e químicas dos solos. Os teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1 e RTA se assemelham nos solos LVm e LA, e se diferenciam mais nos solos argilosos, com a RTA extraíndo, em média, 11 e 29% a mais no LE e LV, respectivamente. Provavelmente, nestes solos, o maior teor de argila, associado aos maiores teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 , levou à exaustão do extrator Mehlich-1, com menor ação na dissolução de fosfatos não-lábeis como já observado pela literatura (GONÇALVES, 1988; MOREIRA, 1988).

A semelhança da resina, o PA é influenciado indiretamente pelas características físicas e químicas dos solos, o que constitui uma vantagem sobre os demais extratores, que são mais diretamente influenciados por essas características. Quando se comparam os teores recuperados pelos dois métodos, verifica-se que a RTA, para todos os solos, apresentou maior capacidade extratora do P-lábil que o PA. Essa diferença pode ser atribuída ao método de preparo da amostra de solo, pois para a extração com a resina, o solo é desestruturado com uma pequena bola de vidro, não ocorrendo o mesmo com a amostra usada no método do PA. Fato semelhante foi verificado por MOURA FILHO e BUOL (1976) que, após desagregarem as amostras de solo (< 300 mesh), tanto a amostra total do solo quanto as várias classes de agregados (2,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm e < 0,25 mm), obtiveram acréscimos nos teores de fósforo, de cálcio e de magnésio. A desestruturação do solo pode aumentar o contato solo-solução

favorecendo a extração de íons fosfato que normalmente não estariam expostos. Além disso, a resina, por ser constituída de pequenos grânulos, apresenta superfície de contato muito superior ao PA, o que deve favorecer uma maior extração de fósforo. Vários pesquisadores têm encontrado correlações altamente significativas entre RTA e PA, e também, deste com os demais extratores (MENON et alii, 1989, 1990; SHARPLEY, 1991; GJORUP et alii, 1993).

Além das características físicas e químicas dos solos terem influenciado a capacidade de recuperação de fósforo pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA (Quadro 6), elas não afetaram de maneira semelhante essa recuperação ao se considerar as várias fontes de fósforo (Quadro 3). A correlação de os teores de fósforo recuperado foi significativa e positiva com os teores de argila, com a capacidade máxima de adsorção de fósforo e com o fósforo remanescente, para as fontes empregadas. Apenas o fósforo recuperado pela RTA, quando $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ foi utilizado, não apresentou correlação significativa com as características citadas.

De modo geral, as diferenças apresentadas entre os teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA, entre as fontes de fósforo, não foram significativas, nos quatro solos (Quadro 3). Exceto no solo LVm, onde o teor de fósforo recuperado pelo PA e pela RTA, ao se usar o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ e os fosfatos amoniacais, foi significativo quando comparado às demais fontes.

QUADRO 6 - Coeficientes de Correlação Linear Simples entre Características dos Solos e os Teores de Fósforo Recuperado, com Três Extratores, para as Diferentes Fontes de Fósforo

Fonte	Extrator	Característica do Solo		
		Teor de argila	CMAP ^{1/}	Prem ^{2/}
		----- r -----		
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ .H ₂ O	Mehlich-1	-0,9851**	-0,9150**	0,9912**
	PA	-0,8650*	-0,8304*	0,9727**
	RTA	-0,8125 ^{ns}	-0,7837 ^{ns}	0,9458**
NH ₄ H ₂ PO ₄	Mehlich-1	-0,9846**	-0,9114**	0,9907**
	PA	-0,9059**	-0,8785*	0,9883**
	RTA	-0,9279**	-0,8674*	0,9957**
(NH ₄) ₂ HPO ₄	Mehlich-1	-0,9556**	-0,8931**	0,9995**
	PA	-0,9168**	-0,8900**	0,9914**
	RTA	-0,8849*	-0,8841*	0,9757**
Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	Mehlich-1	-0,9519**	-0,8833*	0,9987**
	PA	-0,9393**	-0,9186**	0,9948**
	RTA	-0,9676**	-0,9307**	0,9979**
K ₂ HPO ₄	Mehlich-1	-0,9614**	-0,8917**	0,9986**
	PA	-0,9385**	-0,9158**	0,9952**
	RTA	-0,9803**	-0,9642**	0,9845**

*, ** = Significativo a 5% e 1%, respectivamente.

ns = Não-significativo a 5%.

1/ Capacidade máxima de adsorção de fósforo.

2/ Fósforo remanescente.

O teor de fósforo recuperado pelo PA foi pouco consistente com relação ao cátion acompanhante. Para os solos LV e LE não foram observadas diferenças significativas, entre fontes, nos teores de fósforo recuperado. Entretanto, para os solos LVm e LA, esse extrator mostrou-se sensível às fontes Ca(H₂PO₄)₂ e (NH₄)₂HPO₄, apresentando diferenças significativas entre essas fontes e as demais.

4.2. Ensaio 2 - Efeito do Tempo de Incubação Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo

4.2.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo

O aumento do tempo de contato do fósforo com o solo teve efeito negativo sobre o fluxo difusivo de fósforo, causando seu decréscimo, para todos os solos (Quadro 7).

No tratamento que não recebeu fósforo, para todos os solos, o fluxo difusivo desse elemento foi significativamente inferior ao tratamento que recebeu e não foi submetido à incubação.

O fluxo de fósforo nos solos argilosos foi menor do que nos mais arenosos, com ou sem incubação (Quadros 7 e 8). A diferença de fluxo difusivo entre os solos mais argilosos, LV e LE, foi altamente significativa. O solo LV apresentou fluxo 2,26 vezes superior ao LE, na ausência de incubação, porém o mesmo comportamento não foi verificado quando se promoveu a incubação, já que os valores nos dois solos foram próximos, 0,01452 e 0,01734 $\mu\text{mol P}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente. O menor fluxo no LE pode ser atribuído à sua maior CMAP, embora, com a incubação, o fluxo tenha sido em torno de 19% superior ao LV. Contrastando os solos argilosos e arenosos, acredita-se que o período de contato do fósforo com o solo tenha favorecido a maior adsorção do elemento à superfície dos óxidos de ferro e de alumínio, presentes em maior percentagem no solo LE. Essa afirmativa se apoia nos resultados apresentados por MOREIRA (1988), onde no tempo zero de contato do fósforo com o solo, ou seja, na ausência

QUADRO 7 - Fluxo Difusivo Avaliado pelo Fósforo Adsorvido ao Papel Aniônico, em Amostras de Solos, Tratados com Superfosfato Triplo, com a Incubação ou não dos Solos, por 30 Dias

Tratamentos	Solos				Média
	LV	LE	LVm	LA	
	----- umol P.cm ⁻² -----				
Sem incubação	0,07844	0,03473	0,13997	0,86946	0,28065
Incubado	0,01452	0,01734	0,03247	0,38757	0,11298
Média	0,04648	0,02604	0,08622	0,62852	
Testemunha	0,00049	0,00098	0,00049	0,00081	0,00069

de incubação, verificou-se que ocorria um acréscimo na forma P-Al em relação a P-Fe, sugerindo uma maior reatividade dos compostos de alumínio com o fósforo em comparação com os de ferro. Todavia, com 30 dias de incubação, ele observou decréscimo na forma P-Al com correspondente acréscimo na forma P-Fe. Isso pode ser explicado pelos critérios de solubilidade, que indicam maior grau de solubilização para formas de P-Al do que de P-Fe, resultando, neste caso, em solubilização de P-Al e refixação como P-Fe. VIÉGAS (1991), trabalhando com nove solos, verificou acréscimo na fração P-Fe, em decorrência da aplicação do superfosfato triplo, com teores superiores aos da fração P-Al, sugerindo que o P-Fe é, provavelmente, o último produto das transformações de fósforo no solo. Alguns autores, citados por MOREIRA (1988), preconizam que a fração P-Al seja a forma de fósforo que mais se relaciona à fração de P-lábil dos solos, sendo,

QUADRO 8 - Análise de Variância dos Dados de Fluxo Difusivo de Fósforo (P-Difusão) e do Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina de Troca Aniônica (RTA), Obtidos com a Aplicação de Superfosfato Triplo, com ou sem Incubação dos Solos

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		P-difusão	P-Mehlich-1	P-PA	P-RTA
Bloco Solos (S)	2	0,01 ^{ns}	926,91 ^{ns}	1,13 ^{ns}	5781,53 ^{**}
LV + LE vs LVm + LA	1	0,47 ^{**}	129708,98 ^{**}	19235,22 ^{**}	88137,36 ^{**}
LV vs LE	1	0,02 ^{**}	125,36 ^{ns}	0,18 ^{ns}	27,83 ^{ns}
LVm vs LA	1	1,02 ^{**}	5254,52 ^{**}	7858,48 ^{**}	6757,14 [*]
-P vs +P d/LV	1	0,01 ^{**}	32438,08 ^{**}	1341,40 ^{**}	30019,30 ^{**}
Incubação d/LV	1	0,01 ^{**}	2,13 ^{ns}	14,90 [*]	22,80 ^{ns}
-P vs +P d/LE	1	0,00 ^{ns}	36940,13 ^{**}	1244,59 ^{**}	28379,31 ^{**}
Incubação d/LE	1	0,00 ^{ns}	280,05 ^{ns}	5,38 ^{ns}	13,76 ^{ns}
-P vs +P d/LVm	1	0,03 ^{**}	114526,60 ^{**}	5911,04 ^{**}	91348,21 ^{**}
Incubação d/LVm	1	0,02 ^{**}	122,24 ^{ns}	57,05 ^{**}	410,00 ^{ns}
-P vs +P d/LA	1	1,13 ^{**}	144330,00 ^{**}	19057,56 ^{**}	125723,60 ^{**}
Incubação d/LA	1	0,35 ^{**}	115,94 ^{ns}	51,68 ^{**}	187,08 ^{ns}
Resíduo	22	0,00	358,77	2,85	883,11
C.V. (%)		21,22	12,68	4,37	22,02

*, **: Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
ns: Não-significativo a 5%.

portanto, a forma mais disponível para as plantas. Pelos resultados apresentados por MOREIRA (1988) e por VIÉGAS (1991), conclui-se que o maior tempo de contato entre o fósforo e o solo favorecerá uma ligação mais energética do fósforo com os óxidos de ferro do que com os de alumínio, o que explicaria os menores fluxos de fósforo obtidos nos solos mais argilosos e com maiores teores desses óxidos, no presente trabalho.

Também, para os solos mais arenosos, foi altamente significativa a diferença nos valores encontrados de fluxo de fósforo. O solo LA apresentou fluxo de fósforo, em comparação ao LVM, 6,2 e 11,9 vezes superior quando se promoveu ou não a incubação, respectivamente. Apesar dos teores de óxidos de ferro e de alumínio não diferirem muito entre os dois solos e a CMAP ser pouco maior no LVM, acredita-se que a diferença acima relatada possa ser atribuída à maior energia de adsorção de fósforo do solo LVM (Quadro 1). De acordo com KUO e LOTSE (1974), evidenciam-se duas fases no processo de adsorção: uma fase de reação rápida e a outra, lenta. Na primeira fase, a rápida cinética de adsorção de fósforo está provavelmente associada à alta energia de adsorção e à baixa saturação da superfície de adsorção. Tal fato, possivelmente, explica os resultados obtidos, já que a solubilização do superfosfato triplo não se processa com a mesma velocidade que a das demais fontes testadas, com predominância da primeira fase de adsorção.

4.2.2. Efeito do Tempo de Contato do Fósforo com os Solos Sobre a Recuperação do Elemento

De modo geral, os teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA foram bastante distintos nos quatro solos (Quadros 8 e 9). Houve também diferença entre o tratamento que não recebeu fósforo (testemunha) e aquele onde se aplicou fósforo, sem a incubação, para todos os solos e extratores.

QUADRO 9 - Teores de Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA), em Amostras de Solos, Aplicado na Forma de Superfosfato Triplo, na Ausência e Presença de Incubação por 30 Dias

Tratamentos	Solos				Média
	LV	LE	LVm	LA	
	----- mg.dm ⁻³ de P -----				
	----- Mehlich-1 -----				
Sem incubação	147,57	159,64	279,50	312,74	224,86
Incubado	146,38	145,66	270,46	321,54	221,01
Média	146,98	152,65	274,98	317,14	
Testemunha	0,51	2,40	3,18	2,56	2,16
	----- PA -----				
Sem incubação	30,82	29,88	63,39	114,06	59,54
Incubado	27,68	27,98	57,22	118,19	57,76
Média	29,25	28,93	60,31	116,12	
Testemunha	0,92	1,07	0,62	1,34	0,99
	----- RTA -----				
Sem incubação	141,98	140,39	247,28	291,38	205,26
Incubado	138,08	143,42	230,75	280,22	198,12
Média	140,03	141,91	239,02	285,80	
Testemunha	0,51	2,84	0,51	1,87	1,43

Os solos mais argilosos (LV e LE), comparativamente aos mais arenosos (LVm e LA), apresentaram menores teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA, com ou sem incubação (Quadro 9). Observou-se diferença significativa nos teores de fósforo recuperado entre os dois solos arenosos mas não entre os dois mais argilosos.

O tempo de contato do fósforo com os solos não afetou sua recuperação pelo Mehlich-1 e pela RTA, em qualquer dos solos estudados. Contudo, o tempo de incubação reduziu a

recuperação do fósforo pelo PA no LV e no LVm, aumentou no LA e não teve efeito no LE (Quadro 8). Provavelmente, os baixos teores de óxidos de ferro e de alumínio, e mesmo de argila do solo LA, favoreceram a maior disponibilidade do fósforo em solução. Observa-se que o Mehlich-1 tendeu a apresentar maior capacidade de recuperação que a RTA, para os quatro solos.

Segundo GJORUP et alii (1993), o PA, pela forma semelhante de extração à da RTA, extrai, também, apenas parte do P-lábil. Tal afirmativa coincide com os resultados obtidos neste estudo (Quadro 8). Os teores de fósforo recuperado pelo PA foram inferiores àqueles recuperados pela RTA, com ou sem incubação, em torno de 80% para os solos argilosos, 75% para o solo LVm e 59% para o LA. Esse resultado pode ser atribuído à diferença no preparo da amostra de solo entre os métodos PA e RTA, conforme já discutido. Pelos resultados apresentados nos ensaios 1 e 2 pode-se concluir que tanto o fluxo difusivo de fósforo quanto o teor de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA foram influenciados pelo íon acompanhante, pelo tempo de contato do fósforo com o solo e pelas características físicas e químicas dos solos.

4.3. Ensaio 3 - Efeito da Concentração de NaCl Sobre o Fluxo Difusivo de Fósforo

4.3.1. Avaliação do Fluxo Difusivo de Fósforo

De modo geral, o fluxo difusivo de fósforo nos solos mais argilosos foi menor do que nos mais arenosos, para

todas as doses de NaCl (Quadros 10 e 11). Entre os solos argilosos, o fluxo de fósforo detectado no LV foi, em média, duas vezes superior ao do LE, para as três doses de NaCl, apesar de não diferirem estatisticamente entre si (Quadro 11). Nos solos arenosos, verifica-se que o LA apresentou, em média, fluxo de fósforo cerca de 2,8 vezes superior ao do LVm, com diferenças altamente significativas entre eles.

O fluxo de fósforo foi bastante reduzido quando não se adicionou fósforo e NaCl ao solo (testemunha). Contudo, só se verificou efeito significativo da adição de fósforo nos solos arenosos (Quadro 11).

QUADRO 10 - Fluxo Difusivo Avaliado pelo Fósforo Adsorvido ao Papel Aniônico, em Amostras de Solos, Tratadas com Fosfato de Cálcio Monobásico e Três Doses de NaCl

Doses de NaCl	Solos				Média
	LV	LE	LVm	LA	
cmolc Na ⁺ .dm ⁻³	----- umol.cm ⁻² de P -----				
0,0	0,04088	0,02076	0,41469	1,17732	0,41341
0,5	0,04110	0,02260	0,39357	1,07665	0,38348
1,0	0,06586	0,03160	0,39342	1,18186	0,41818
Média	0,04928	0,02498	0,40056	1,14528	
Testemunha	0,00049	0,00098	0,00049	0,00081	0,00069

QUADRO 11 - Análise de Variância dos Dados de Fluxo Difusivo de Fósforo (P-Difusão) e do Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina de Trocadora de Ânions (RTA), Obtidos com a Aplicação de Fosfato de Cálcio Monobásico e Três Doses de NaCl, nas Amostras de Solos em Estudo

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		P-difusão	P-Mehlich-1	P-PA	P-RTA
Bloco Solos (S)	2	0,01 ^{ns}	616,66 ^{ns}	18,65 ^{ns}	8657,97 ^{**}
LV + LE vs LVm + LA	1	2,49 ^{**}	377683,13 ^{**}	76761,87 ^{**}	182038,30 ^{**}
LV vs LE	1	0,00 ^{ns}	1122,09 ^{ns}	172,32 ^{**}	6100,68 ^{ns}
LVm vs LA	1	4,87 ^{**}	7176,49 ^{**}	31405,94 ^{**}	58600,56 ^{**}
-P vs +P d/LV Na d/LV	1	0,00 ^{ns}	61863,92 ^{**}	2853,91 ^{**}	86731,66 ^{**}
- linear	1	0,00 ^{ns}	2,08 ^{ns}	0,16 ^{ns}	1254,68 ^{ns}
- quadrático	1	0,00 ^{ns}	48,42 ^{ns}	2,95 ^{ns}	17,79 ^{ns}
-P vs +P d/LE Na d/LE	1	0,00 ^{ns}	71130,02 ^{**}	3891,28 ^{**}	62732,02 ^{**}
- linear	1	0,00 ^{ns}	42,26 ^{ns}	3,14 ^{ns}	241,08 ^{ns}
- quadrático	1	0,00 ^{ns}	59,96 ^{ns}	12,82 ^{ns}	477,09 ^{ns}
-P vs +P d/LVm Na d/LVm	1	0,26 ^{**}	208053,60 ^{**}	14394,46 ^{**}	110948,00 ^{**}
- linear	1	0,00 ^{ns}	1148,78 [*]	1,56 ^{ns}	144,66 ^{ns}
- quadrático	1	0,00 ^{ns}	1233,41 [*]	0,00 ^{ns}	55608,99 ^{**}
-P vs +P d/LA Na d/LA	1	2,08 ^{**}	276909,85 ^{**}	48544,94 ^{**}	277988,87 ^{**}
- linear	1	0,00 ^{ns}	6,38 ^{ns}	3,11 ^{ns}	175,85 ^{ns}
- quadrático	1	0,02 ^{**}	347,94 ^{ns}	6,25 ^{ns}	15,86 ^{ns}
Resíduo	30	0,00	316,35	16,67	970,97
C.V. (%)		18,75	7,50	5,80	13,43

*, ** = Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
ns = Não-significativo a 5%.

O reduzido fluxo de fósforo nos solos mais argilosos, como explanado nos ensaios 1 e 2, pode estar associado aos seus teores de argila e à presença de óxidos de ferro e de alumínio, que favorecem a adsorção daquele elemento. Apesar disso, a adição de NaCl aumentou o fluxo de fósforo, a despeito de não ter sido possível o ajuste de modelos que significativamente relacionassem o fluxo difusivo de fósforo com a elevação da concentração de NaCl na solução. BARROW et alii (1980) relataram o efeito da força iônica na adsorção de fosfato em minerais de carga variável (goethita), ao testarem três doses de NaCl. Esses autores verificaram que quando a concentração salina da solução era elevada, observava-se um decréscimo na adsorção de fósforo em decorrência do decréscimo do potencial no plano de adsorção, ao utilizarem o modelo proposto por BOWDEN et alii (1980). Segundo os autores, o modelo explica os efeitos nas variações da concentração do eletrólito na adsorção devido às mudanças que ocorrem na disposição dos íons próximos à superfície. Sob condições de alta atividade hidrogeniônica, quando a superfície é positivamente carregada, aumentando-se a concentração salina, o potencial no plano de adsorção decresce e, então, a adsorção também decresce. EVANS JR. e SORENSEN (1986) obtiveram efeito semelhante ao determinarem o teor de fósforo quando a força iônica variou de 1,0 a 10^{-6} mol.L⁻¹ de NaCl, a pH constante (6,0). Para esses autores, as diferenças nos teores de fósforo obtido em função da força iônica da solução podem ser explicadas baseando-se nas alterações que podem ocorrer no potencial de superfície, não nas cargas de superfície.

Nos solos arenosos pode ser observado que o fluxo de fósforo permaneceu praticamente constante, independente do nível de NaCl adicionado ao solo. Possivelmente, esse comportamento possa ser atribuído ao aumento da viscosidade da lâmina de água que envolve as partículas dos solos com o aumento da concentração salina pela adição de NaCl, dificultando o fluxo difusivo de fósforo. Segundo NYE (1979), o aumento da viscosidade de água próxima à superfície carregada afetaria o fator de impedância aumentando o efeito da tortuosidade, principalmente em solos arenosos que apresentam menor capacidade de retenção de água. Nestes solos, para um mesmo potencial hídrico, adiciona-se menor quantidade de água o que interferirá sobremaneira no fluxo de fósforo. Para ilustrar esta afirmativa, nos solos argilosos acrescentou-se um volume de água em torno de 131 mL para o LV e 116 mL para o LE, enquanto que os arenosos, LVm e LA, receberam 52 mL e 67 mL, respectivamente.

O comportamento observado no solo LA, provavelmente, se deve às mesmas causas apresentadas para o LVm. O decréscimo de fluxo de fósforo, quando foi adicionado 0,5 cmolc de $\text{Na}^+ \cdot \text{dm}^{-3}$, reforça a idéia de que o aumento na concentração salina poderia estar levando a um aumento na viscosidade da água próxima às partículas, associado ao baixo volume de água adicionado. As variações quanto ao fluxo difusivo de fósforo observadas no solo LA, em decorrência do aumento da concentração de NaCl na solução, podem ser expressas pela equação $\bar{Y} = 1,17731 - 0,407210 \text{ Na} + 0,411753 \cdot \text{Na}^2$ ($R^2 = 1,0$), em $\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$ de P, como variável dependente das doses de NaCl adicionados ao solo.

4.3.2. Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA) e Resina Trocadora de Ânions (RTA) em Função da Adição de NaCl

Como nos ensaios anteriores, a capacidade de recuperação do fósforo pelos extratores foi influenciada por características físicas e químicas dos solos.

Observou-se que os teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA diferiram significativamente entre os quatro solos. Porém, não foi observada diferença significativa entre os solos argilosos quando Mehlich-1 e RTA foram usados (Quadros 11 e 12).

Os teores de fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1 e RTA, nos solos LV e LE, foram inferiores aos obtidos nos solos LVm e LA (Quadro 12). O extrator Mehlich-1 apresentou menor capacidade extratora no solo LV que a RTA, porém, efeito contrário foi observado no solo LVm. As variações nos teores recuperados ocorridas em função das doses de NaCl aplicadas não apresentaram comportamento uniforme entre os quatro solos, dentro de cada extrator. Isso sugere que a alteração na força iônica promovida com a adição de NaCl não apresentou efeito significativo na capacidade de recuperação do fósforo pelos extratores empregados já que os modelos ajustados não apresentaram significância estatística. Exceto no solo LVm, para os dois extratores, foi possível verificar efeito das doses de NaCl sobre os teores de fósforo recuperado.

QUADRO 12 - Teores de Fósforo Recuperado pelos Extratores Mehlich-1, Papel de Troca Aniônica (PA), e Resina Trocadora de Ânions (RTA), em Amostras de Solos Contendo Fosfato de Cálcio Monobásico e Três Doses de NaCl

Doses de NaCl	Solos				Média
	LV	LE	LVM	LA	
cmolc Na ⁺ .dm ⁻³	mg.dm ⁻³ de P				
	Mehlich-1				
0,0	203,60	220,16	375,60	432,21	307,89
0,5	209,11	217,34	414,28	446,44	321,79
1,0	204,78	225,47	403,28	434,28	316,95
Média	205,83	220,99	397,72	437,64	
Testemunha	0,52	2,40	3,18	2,56	2,17
	PA				
0,0	44,54	52,00	98,58	181,24	94,09
0,5	43,49	48,75	98,09	180,20	92,63
1,0	44,87	50,56	97,56	182,68	93,92
Média	44,30	50,44	98,08	181,37	
Testemunha	0,92	1,07	0,62	1,34	0,98
	RTA				
0,0	240,97	207,34	272,48	432,37	288,26
0,5	258,41	229,13	274,31	434,96	299,20
1,0	269,91	220,02	262,66	443,20	298,94
Média	256,43	218,83	269,82	436,84	
Testemunha	0,51	2,84	0,51	1,87	1,43

O método do PA foi aquele que se apresentou menos efetivo na recuperação do fósforo disponível. Contudo, foi o único método que se mostrou sensível às diferenças entre os solos argilosos e entre os arenosos na retenção do fósforo aplicado. Quando se comparam os teores recuperados pela RTA com aqueles recuperados pelo PA, verifica-se que a RTA foi mais eficiente em recuperar o fósforo do solo. Também aqui podem ser atribuídos ao preparo da amostra e à superfície de extração as diferenças encontradas conforme já mencionado (ensaios 1 e 2). Para todos os solos, não foi possível o ajuste de modelos significativos que relacionassem o fósforo extraído pelo PA com a dose de NaCl adicionada ao solo.

Pelo exposto, percebe-se que a alteração na força iônica da solução, via adição de NaCl, promoveu reduzida influência na capacidade de ação dos extratores empregados.

Foram conduzidos três ensaios de tratamentos, com três repetições, foram dispostos em blocos ao acaso. Em um primeiro, utilizaram-se cinco fontes salerais de fósforo, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_3\text{HPO}_4$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e K_2HPO_4 , na dose de 300 mg dm⁻² de P.

No segundo ensaio utilizaram-se 300 mg dm⁻² de P na forma da superfosfato triplo a quatro níveis, incubando-se no solo por 10 dias.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Os tratamentos foram avaliados em solos de quatro latossolos, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0,4%, em solução, contendo 300 mg dm⁻² de P, acrescido de NaCl a 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4 mol L⁻¹.

Avaliou-se o efeito do cátion acompanhante do fósforo sobre seu fluxo difusivo no solo, verificando a relação deste fluxo com o tempo de contato do fósforo com o solo e com a concentração de NaCl, em amostras da camada superficial de quatro latossolos.

Para avaliar o fluxo difusivo de fósforo utilizou-se a técnica do papel de troca aniônica (PA) que consiste na impregnação de papel-filtro com hidróxido de ferro. Uma tira do PA (14 cm²) foi fixada à superfície de uma lâmina de microscópio, que foi disposta, em duplicata, horizontalmente, entre duas camadas de solo em "câmaras de difusão". Após 15 dias, as lâminas foram retiradas e lavadas com água destilada. O fósforo extraído do PA, em 40 mL de H₂SO₄ 0,2 mol.L⁻¹, foi dosado. O teor de fósforo pelos extratores Mehlich-1, papel de troca aniônica (PA) e resina trocadora de ânions (RTA) foi determinado nas amostras de solo da câmara de difusão.

Foram conduzidos três ensaios onde os tratamentos, com três repetições, foram dispostos em blocos ao acaso. Em um primeiro, utilizaram-se cinco fontes solúveis de fósforo, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e K_2HPO_4 , na dose de $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de P.

No segundo ensaio aplicaram-se $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de P na forma de superfosfato triplo a quatro solos, incubando-se ou não, por 30 dias.

No terceiro ensaio, adicionou-se, aos quatro solos, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, p.a., em solução, contendo $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de P, acrescido de NaCl p.a., em três doses: 0,0; 0,5 e $1,0 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ de solo. Nos três ensaios um tratamento adicional, sem adição de fósforo, foi também utilizado.

As fontes de fósforo, dentro de cada solo, apresentaram diferenças no fluxo de fósforo. O $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ foi a fonte que em relação às demais, para todos os solos, exceto o LA, proporcionou menor fluxo difusivo de fósforo. As fontes amoniacais apresentaram fluxo difusivo semelhante nos solos LE e LVm, mas, nos solos LV e LA, a diferença foi significativa sendo que, no LA, o MAP proporcionou maior fluxo, enquanto que, no LV, o maior fluxo foi obtido com o DAP. O fluxo de fósforo nos solos não se alterou se as fontes foram a sódica ou a potássica.

O tempo de contato do fósforo com o solo teve efeito negativo sobre o fluxo de fósforo, causando seu decréscimo, para todos os solos. O solo LV apresentou fluxo 2,26 vezes superior ao LE, na ausência de incubação, porém, quando se promoveu a incubação, os valores nos dois solos foram semelhantes. O solo LA apresentou fluxo de fósforo, em

comparação ao LVm, 6,2 e 11,9 vezes superior quando se promoveu ou não a incubação.

Entre os solos argilosos, o fluxo de fósforo detectado no LV foi, aproximadamente, duas vezes superior ao do LE, para as três doses de NaCl, apesar de não diferirem estatisticamente entre si. Entre os arenosos, verificou-se diferenças na proporção, porém com diferenças altamente significativas entre eles.

Pelos resultados apresentados pode-se concluir que tanto o fluxo difusivo de fósforo quanto o teor do elemento recuperado pelos extratores Mehlich-1, PA e RTA foram influenciados pelo íon acompanhante, pelo tempo de contato do fósforo com o solo e pelas características físicas e químicas dos solos.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

AMER, F. & SOULDIN, B. H.; FLAKE, C. A. & OLVE, F. R.
Characterization of soil phosphorus by anion exchange
resin adsorption and CaCl_2 extraction. *Plant and Soil*,
6:391-402, 1953.

BIBLIOGRAFIA

BABIA FILHO, A. F. C. Índices de disponibilidade de fósforo
em latossolos do Planalto Central com diferentes
características texturais e mineralógicas. Viçosa, MG,
UFV, 1981. 178p. (Tese D.S.)

BABIA FILHO, A. F. C. & BRAGA, J. H. Índices de disponibilidade de
fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. III. Índices de disponibilidade
de fósforo e crescimento vegetal. *Experientia*, 29:217-24,
1973.

BABIA FILHO, A. F. C., BRAGA, J. H., FREITAS, M., RIBEIRO,
A. C. Relação entre absorção de fósforo e componentes
mineralógicos de fração argila de latossolos do Planalto
Central. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:221-6, 1983.

BARBER, S. A. A diffusion and mass-flow concept of soil
nutrient availability. *Soil Sci. Soc.*, 25:39-49, 1961.

BARBER, S. A. Soil-plant interactions in the phosphorus
nutrition of plants. In: *MINERALIA*, F. C. F. S. & C. E. C. J.
SAMPAYO, E. L. The role of phosphorus in agriculture
and industry. ASA, CSSA and SSSA, 1980. p. 281-315.

BARROW, N.J. Reaction of various anions with variable-charge soils. Adv. Agron., 35:153-180, 1983.

BARROW, N.J. & BOWDEN, J.W.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Describing the effect of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface. Austr. J. Soil Res., 18:295-404, 1980.

BOWDEN, J.W.; NAGARAJAN, P.T.; BARROW, N.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Describing the adsorption of phosphate, nitrate and selenite on a variable-charge mineral surface. Austr. J. Soil Res., 18:49-60, 1980.

BIBLIOGRAFIA

BRAGA, J.M. & DEBELLIS, D.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em extratos de solos e plantas. R. Ciênc., 2:173-85, 1974.

COMPELLO, R.R. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lavável por 12h em solos com diferentes características texturais.

AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and ³²P equilibration. Plant and Soil, 6:391-408, 1955.

... for the distribution of iron in soils and clays. Can. J. Soil Sci., 43:7-17, 1963.

BAHIA FILHO, A.F.C. Índices de disponibilidade de fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa, MG, UFV, 1982. 178p. (Tese D.S.)

BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. III. Índices de disponibilidade de fósforo e crescimento vegetal. Experimentiae, 20:217-34, 1975.

BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do Planalto Central. R. bras. Ci. Solo, 7:221-6, 1983.

BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. Soil Sci., 93:39-49, 1962.

BARBER, S.A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA, CSSA and SSSA, 1980. p.591-615.

- BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. *Adv. Agron.*, 38:183-230, 1985.
- BARROW, N.J.; BOWDEN, J.W.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface. *Austr. J. Soil Res.*, 18:395-404, 1980.
- BOWDEN, J.W.; NAGARAJAH, S.; BARROW, N.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. *Austr. J. Soil Res.*, 18:49-60, 1980.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em extratos de solos e plantas. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- CAMPELLO, M.R. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lábil para lábil em solos com diferentes características químicas, físicas e mineralógicas. Viçosa, MG, UFV, 1993. 66p. (Tese M.S.)
- COFFIN, D.E. A method for the determination of free iron in soils and clays. *Can. J. Soil Sci.*, 43:7-17, 1963.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos - EMBRAPA-SNLCS. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. (não paginado)
- EVANS JR., A. & SORENSEN, R.C. The influence of ionic strength and monovalent cation source in leaching solution on phosphorus extractability in a coarse-textured soil. *Soil Sci.*, 141:38-42, 1986.
- FASSBENDER, H.W. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina. San José, IICA, 1986. 398p.
- FERNANDES, B. Retenção e movimento de água no solo. Viçosa, MG, UFV, 1967. 49p. (Tese M.S.)
- FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; FERREIRA JR., M.E. Avaliação da fertilidade empregando o sistema IAC de análise de solo. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 1990. 94p.

- GJORUP, G.B.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Avaliação do método do papel aniônico como extrator de fósforo disponível do solo. R. bras. Ci. Solo, 17:417-422, 1993.
- GONÇALVES, J.L.M. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil em amostras de solos de cerrado. Viçosa, MG, UFV, 1988. 62p. (Tese M.S.)
- GUNARY, D. & SUTTON, C.D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. J. Soil Sci., 18:167-173, 1967.
- HESLEP, J.M. & BLACK, C.A. Diffusion of fertilizer phosphorus in soils. Soil Sci., 78:389-401, 1954.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis. New Jersey, Prentice-Hall, 1958. 498p.
- KAMPRATH, E.J. & WATSON, M.E. Conventional soil and tests for assessing the phosphorus status of soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA, CSSA and SSSA, 1980. p.433-469.
- KUNISHI, H.M. & TAYLOR, A.W. Effect of phosphate applications on the diffusion coefficients and available phosphate in an acid soil. J. Soil Sci., 26:267-277, 1975.
- KUO, S. & LOTSE, E.G. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. Soil Sci., 116:400-406, 1974.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. Adv. Agron., 19:151-210, 1967.
- LEAL, J.R. & VELLOSO, A.C.X. Adsorção de fosfatos em latossolos sob vegetação de cerrado. Pesq. Agrop. Bras., 8:81-88, 1973.
- LEWIS, D.G. & QUIRK, J.P. Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. I. Self-diffusion of phosphate in soils. Plant and Soil, 26:99-118, 1962.
- LOPES, A.S. & COX, F.R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. R. bras. Ci. Solo, 3:82-88, 1979.

- LOW, P.F. Principles of ion diffusion in clays. In: DOWN, R.H.; RYAN, J.A.; VOLK, V.V.; BAKER, D.E. *Chemistry in the soil environment*, Madison, ASA and SSSA, 1981. p.31-45.
- MAHTAB, S.K.; GODFREY, C.L.; SWOBODA, A.R.; THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils: I. The effect of applied P, clay content and water content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35:393-397, 1971.
- McKEAGUE, J.A. *Manual on soil sampling and methods of analysis*. 2. ed. Ottawa, Canadian Society Soil Science, 1978. 212p.
- MENON, R.G.; HAMMOND, L.L.; SISSINGH, H.A. Determination of plant-available phosphorus by the hidroxide-impregnated filter paper (P_1) soil test. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 52:110-115, 1989.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H. HAMMOND, D.L.L.; ARORA, B.R. Sorption of phosphorus by the iron oxide-impregnated filter paper (P_i soil test) embedded in soils. *Plant and Soil*, 126:287-294, 1990.
- MOREIRA, J.F. Cinética de transformação de P-lábil em não-lábil no solo avaliada por análise química e crescimento de mudas de eucalipto. Viçosa, MG, UFV, 1988. 52p. (Tese M.S.)
- MOURA FILHO, W. & BUOL, S.W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrústox) in Brazil: Micromorphology effect on ion release. *Experientiae*, 21:161-177, 1976.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. *R. Ceres*, 192:127-151, 1987.
- NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. *R. bras. Ci. Solo*, 3:37-41, 1979.
- NYE, P.H. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soils clays. *Adv. Agron.*, 31:225-272, 1979.

- NYE, P.H. & TINKER, P.B. Solute movement in the soil-root system. Berkeley, University of California Press, 1977. 342p.
- OLIVEIRA, M.B., & RUIZ, H.A. Efeito de umidade e doses sobre a difusão de fósforo estimada pelo método do papel aniônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24. Goiânia, 1993. Resumos... Goiânia, SBCS, 1993. v.1 p.203-204.
- OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (eds.). The role of phosphorus in agriculture, Madison, ASA, CSSA and SSSA, 1980. p.361-410.
- OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27:648-653, 1963.
- PARDO, M.T.; GUADALIX, M.E.; GARCIA-GONZALEZ, M.T. Effect of pH and background eletrolyte on P sorption by variable charge soils. Geoderma, 54:275-284, 1992.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. Adv. Agron., 30:1-50, 1978.
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. bras. Ci. Solo, 2:1-9, 1978.
- REIN, T.A. Estimativa do fluxo difusivo de fósforo nos solos e avaliação de sua disponibilidade às plantas. Porto Alegre, RS, UFRGS, 1991. 134p. (Tese M.S.)
- REMER, W. & SCHILLING, G. Effect of the soil water regime on the diffusion coefficient of phosphate ions. Sov. Soil Sci., 13:110-114, 1981.
- RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the central plateau of Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1976. 237p. (Ph.D.Thesis)

- ROWELL, D.L.; MARTIN, M.; NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. III. The effect of moisture content and soil-solution concentration on the self-diffusion of ions in soils. *J. Soil Sci.*, 18:204-222, 1967.
- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. *R. bras. Ci. Solo*, 12:39-42, 1988a.
- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; FERREIRA, P.A. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois latossolos. *R. bras. Ci. Solo*, 12:43-48, 1988b.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.L. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (eds.) *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, ASA, CSSA and SSSA, 1980. p.263-310.
- SANTANA, D.P. Estudo dos solos do Triângulo Mineiro e de Viçosa. I. Mineralogia. II. Adsorção de fosfatos. Viçosa, MG, UFV, 1973. 56p. (Tese M.S.)
- SHARPLEY, A.N. Soil phosphorus extracted by iron-aluminum oxide-impregnated filter paper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 55:1038-1041, 1991.
- SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SMILLIE, G.W.; COREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37:358-363, 1973.
- THOMAS, G.W. & PEASLEE, D.E. Testing soil for phosphorus. In: WALSH, L.M. & BEATON, J.P. (ed.) *Soil testing and plant analysis*. Madison, SSSA. 1973. p.115-129.
- VAIDYANATHAN, L.V. & NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. II. An exchange resin paper method for measurement of diffusive flux and diffusion coefficient of nutrient ions of soils. *J. Soil Sci.*, 17:175-211, 1966.

- VAIDYANATHAN, L.V. & NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. VI. The effect of concentration and moisture content on the counter - diffusion of soil phosphate against chloride ion. *J. Soil Sci.*, 21:15-27, 1970.
- VAIDYANATHAN, L.V. & TALIBUDEEN, O. Rate processes in the desorption of phosphate from soils by ion - exchange resins. *J. Soil Sci.*, 21:173-183, 1970.
- VETTORI, L. Métodos de análises de solo. Equipe de pedologia e fertilidade do solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- VIÉGAS, R.A. Dinâmica de fontes de fósforo aplicadas a solos com diferentes níveis de acidez. Viçosa, MG, UFV, 1991. 67p. (Tese M.S.)
- VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, L.E.F.; NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. *R. bras. Ci. Solo*, 17:343-347, 1993.
- WANG, E.J. & YU, T.R. Diffusion of ions in variable-charge soils: 2. Effect of soil surface charge on diffusion coefficients of cations and anions. *Soil Sci.*, 147:91-96, 1989a.
- WANG, E.J. & YU, T.R. Diffusion of ions in variable-charge soils: 3. Simultaneous diffusion of ions in mixed - salt systems. *Soil Sci.*, 147:174-178, 1989b.
- ZEE, S.E.A.T.M. van der; FOKKINK, L.G.J.; RIEMSDIJK, W.H. van. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51:599-604, 1987.