

ERMELINDA MARIA MOTA OLIVEIRA

**FATORES DE RETARDAMENTO E COEFICIENTES DE  
DISPERSÃO-DIFUSÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO E NITROGÊNIO  
EM CINCO SOLOS DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

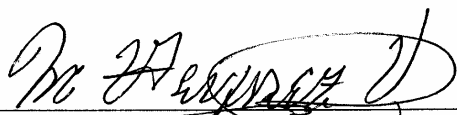
VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2001

ERMELINDA MARIA MOTA OLIVEIRA

**FATORES DE RETARDAMENTO E COEFICIENTES DE DISPERSÃO-  
DIFUSÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO E NITROGÊNIO  
EM CINCO SOLOS DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

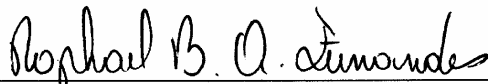
APROVADA: 30 de novembro de 2001.



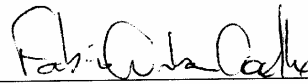
Prof. Victor Hugo Alvarez V.  
(Conselheiro)



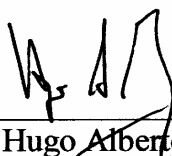
Prof. Paulo Afonso Ferreira  
(Conselheiro)



Prof. Raphael Bragança A. Fernandes



Prof. Fábio Cunha Coelho



Prof. Hugo Alberto Ruiz  
(Orientador)

Ao Gualter, pelo amor e por estar ao meu lado nesta conquista importante das nossas vidas.

À minha mãe Alzemar, pelo exemplo constante de amor.

Às minhas irmãs Genilma, Ana, Cláudia e Maria Isabel, pela confiança.

Aos meus sobrinhos Thales Rafael, Genildo Neto e Mayara Vitória, pelo carinho.

Ao meu pai Genildo.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Ao grande Pai, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade oferecida para realização deste curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Ao professor Hugo Alberto Ruiz, pela orientação, pelos ensinamentos, pelo estímulo e pelo apoio dado desde minha chegada a Viçosa.

Aos professores Paulo Afonso Ferreira e Víctor Hugo Alvarez V., pelos ensinamentos, pelas valiosas sugestões e pela atenção.

Aos professores Raphael Bragança Alves Fernandes e Fábio Cunha Coelho, pelas sugestões.

Aos professores Maurício de Oliveira e Maria Auxiliadora dos Santos (ESAM), pela confiança, pelo apoio e pelo incentivo na minha decisão pelo Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em Viçosa.

Aos professores do Departamento de Solos (UFV), pelos conhecimentos transmitidos durante o curso, em particular ao professor João Carlos Ker, pela atenção e consideração demonstrada.

Ao Laboratório de Nutrição Mineral de Planta (UFV), pelo apoio na realização das análises.

Aos funcionários do Departamento de Solos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos laboratoristas Carlos Fonseca, Benedito (Seu Bené) e Cláudio, pela colaboração e atenção dispensada.

Aos colaboradores e amigos, Guilherme Donagemma, Sérgio Augusto, Sebastião Fernando, Anastácia, Diolino Henriques, Hevilásio, Samuel e Maxsuel, pela ajuda na coleta do material durante a condução do experimento no laboratório.

Ao estudante de doutorado em Engenharia Agrícola João Carlos F. Borjes Júnior, pela valiosa ajuda com o programa para obtenção dos dados.

A Luís Fernando, Elaine Trindade e Alessandra Salviano, pela amizade conquistada e pelo apoio nos momentos certos.

A todos que não foram nominalmente citados, mas que contribuíram para que meu objetivo fosse alcançado.

## **BIOGRAFIA**

ERMELINDA MARIA MOTA OLIVEIRA, filha de Genildo Augusto de Oliveira e Alzemar Guiomar Mota, nasceu em 17 de fevereiro de 1975, em Caraúbas, RN.

Em agosto de 1998, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Escola Superior de Agricultura de Mossoró, RN.

Em agosto de 1999, iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, sob orientação do professor Hugo Alberto Ruiz.

## CONTÉUDO

	<b>Página</b>
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Modelos teóricos.....	3
2.2. Fator de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão .....	6
2.3. Transporte de nitrogênio, fósforo e potássio em colunas de solo.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	16
5. RESUMO E CONCLUSÕES .....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
APÊNDICE .....	53

## RESUMO

OLIVEIRA, Ermelinda Maria Mota, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2001. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fósforo, potássio e nitrogênio em cinco solos de Minas Gerais.** Orientador: Hugo Alberto Ruiz. Conselheiros: Víctor Hugo Alvarez V. e Paulo Afonso Ferreira.

Com o objetivo de determinar os fatores de retardamento e os coeficientes de dispersão-difusão do fosfato, potássio e amônio, quando aplicados em duas concentrações, realizou-se um experimento em laboratório utilizando colunas de percolação. Trabalhou-se com amostras de cinco solos do Estado de Minas Gerais (um Neossolo Quartzarênico órtico-RQo; três Latossolos Vermelhos distróficos – LVd1 , LVd2 e LVd3; e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico – LVAd). Os solos diferenciaram-se pelo teor de argila, na ordem: RQo<LVd1<LVAd<LVd2<LVd3. Os tratamentos corresponderam a um fatorial  $5 \times 2^3$ , sendo cinco solos que receberam aplicações de soluções com duas concentrações de fosfato, amônio e potássio, correspondentes a 15 e 60 mg/L de P, 75 e 300 mg/L de K e 15 e 60 mg/L de N, respectivamente. Foram calculadas as concentrações relativas ( $C/C_0$ ) para cada nutriente, representando-as em função do número de volume de poros, o que permitiu obter as curvas experimentais de efluente para cada íon. As

curvas teóricas foram calculadas utilizando o programa DISP, desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Os resultados obtidos mostram que o fator de retardamento para fosfato foi menor no solo mais arenoso (RQo) e maior no mais oxídico (LVd2). A menor concentração de fosfato resultou em maiores valores do fator de retardamento desse íon para os cinco solos estudados. Com relação à concentração do íon acompanhante, houve relação direta entre o fator de retardamento do fosfato e a concentração de potássio para o LVd1 e LVAd. A concentração de amônio não influenciou o fator de retardamento do fosfato nos solos menos argilosos (RQo, LVd1 e LVAd). Para o LVd2, houve relação inversa entre o fator de retardamento do fosfato e a concentração de amônio. No caso do LVd3, essa relação foi direta. Esse comportamento pode ser atribuído a diferenças texturais e mineralógicas. Observaram-se valores menores dos fatores de retardamento para o potássio e para o amônio, quando comparados com os do fosfato. Nos Latossolos, os maiores valores do fator de retardamento para potássio e amônio estiveram relacionados com o incremento da fração argila, sem tendência definida quanto à concentração do íon em estudo ou do íon acompanhante. Não foi evidenciada relação nítida entre as concentrações de fosfato, potássio e amônio e os coeficientes dispersivo-difusivos desses íons nos solos estudados. O modelo dispersivo-difusivo foi sensível às variações no comportamento das curvas experimentais de efluente de fosfato, potássio e amônio, tornando-se um instrumento útil na previsão do deslocamento desses nutrientes nos solos estudados.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Ermelinda Maria Mota, M.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2001. **Retardation factors and dispersion-diffusion coefficients of phosphorus, potassium and nitrogen in five soils of Minas Gerais State.** Advisor: Hugo Alberto Ruiz. Committee members: Víctor Hugo Alvarez V. and Paulo Afonso Ferreira.

Aiming at the determination of the retardation factors and the dispersion-diffusion coefficients of phosphate, potassium, and ammonium, when applied at two concentrations, an experiment was conducted under laboratory conditions using percolation columns. A number of samples from five soils of Minas Gerais State were used: one Orthic Quartzarenic Neosol, RQo; three dystrophic Red Latosols - LVd1, LVd2 and LVd3; and one dystrophic Yellow-Red Latosol - LVAd). The clay content of the soils were different at the order: RQo <LVd1 <LVAd <LVd2 <LVd3. The treatments corresponded to a factorial scheme of  $5 \times 2^3$ , that is, five soils were applied the solutions at two concentrations of phosphate, ammonium and potassium corresponding to 15 and 60 mg/L phosphorus, 75 and 300 mg/L potassium, and 15 and 60 mg/L nitrogen, respectively. The relative concentrations ( $C/C_0$ ) were calculated for each nutrient, by representing them as a function of the number of pore volumes, which allowed to obtain the experimental effluent

curves for each ion. The theoretical curves were calculated by using the DISP program developed at the Agricultural Engineering Department in UFV. The obtained results show that the retardation factor for phosphate was lower in the sandiest soil (RQo) and higher in the more oxidic (LVd2). The lowest concentration of phosphate resulted into higher values of this ion retardation factor in all studied soils. In relation to the concentration of the accompanying ion, a direct relationship occurred between the phosphate retardation factor and potassium concentration for LVd1 and LVAd. The ammonium concentration had no influence upon the phosphate retardation factor in the less clayish soils (RQo, LVd1 and LVAd). An inverse relationship occurred between the phosphate retardation factor and ammonium concentration for LVd2. In the case of LVd3, this relationship was a direct one. That behavior might be attributed to both texture and mineralogical differences. Lower values of the retardation factors are observed for potassium and ammonium, when compared with those of phosphate. In Latosoils, the highest values of the retardation factor for potassium and ammonium were related to the increment in clay fraction, without a defined tendency relative to the concentration of the ion under study or the accompanying ion. No evident relationship was observed among the concentrations of phosphate, potassium and ammonium and the dispersive-diffusive coefficients of these ions in the studied soils. The dispersive-diffusive model was sensitive to variations in the behavior of the experimental effluent curves for phosphate, potassium and ammonium, so showing to be an useful tool for forecasting the displacement of these nutrients in the studied soils.

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação conjunta de água e fertilizantes ao solo, por meio da irrigação, é denominada fertirrigação. Essa técnica, quando adequadamente usada, permite maior eficiência e flexibilização da adubação, maior economia de fertilizantes e de mão-de-obra e maior controle na prevenção da contaminação do solo (FRIZZONE & BOTREL, 1994).

No Brasil, somente nos últimos anos, a fertirrigação tem-se firmado como prática adequada, sendo principalmente empregada no cultivo de hortaliças e fruteiras. No entanto, devido à eventual insuficiência de informações específicas, problemas como baixa produtividade e contaminação ambiental têm sido constatados (CARRIJO et al., 1999; SAMPAIO et al., 1999).

Uma fertirrigação eficiente exige a localização dos nutrientes na profundidade de máxima densidade do sistema radicular. Quando os nutrientes são localizados próximos à superfície do solo, as raízes apresentam desenvolvimento reduzido, explorando menor volume de solo. Nessas condições, há também eventual acúmulo de sais, o que leva à redução do potencial osmótico da solução do solo, diminuindo a produtividade das plantas cultivadas (ALVA & SYVERTSEN, 1991; FISCHER, 1992). No entanto, uma aplicação mais profunda, na porção inferior da zona radicular, diminui a

eficiência da adubação e aumenta a perda de nutrientes para o lençol freático, com conseqüente risco de contaminação ambiental (FISCHER, 1992; SAMPAIO, 1996).

O estudo do movimento dos nutrientes no solo, portanto, constitui tema importante na proposição de um manejo adequado da fertirrigação, com o objetivo de disponibilizar os nutrientes na profundidade de máxima densidade do sistema radicular. Dessa forma, além de otimizar a fertirrigação, serão evitadas perdas de nutrientes para o lençol freático e, por conseguinte, para os mananciais e rios (CADAHIA LOPEZ et al., 1988; BERNARDO, 1994).

Os modelos físico-matemáticos constituem uma valiosa ferramenta no estudo do transporte de nutrientes no solo. Nesses modelos, procura-se tanto descrever o estado atual como prever o comportamento futuro do movimento dos elementos no perfil do solo, constituindo um critério mais seguro e confiável para o uso adequado da fertirrigação na agricultura.

O sucesso dos modelos matemáticos desenvolvidos para descrever o transporte de solutos no solo depende do grau de confiabilidade das variáveis de transporte envolvidas. Assim, variáveis importantes como o fator de retardamento e o coeficiente dispersivo-difusivo, as quais expressam a maior ou menor capacidade de um soluto em se mover no solo, devem ser necessariamente determinadas com exatidão (Van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986). Essas determinações, por estarem intimamente relacionadas com a interação solo-soluto, são fundamentais na descrição do deslocamento de solutos no solo.

O objetivo deste trabalho foi determinar os fatores de retardamento e os coeficientes de dispersão-difusão do fósforo, potássio e nitrogênio, quando aplicados em duas concentrações, em colunas com amostras de cinco solos de diferentes texturas, do Estado de Minas Gerais.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Modelos teóricos**

Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos e utilizados para avaliar o transporte de solutos no solo. Apesar de serem bastante diferenciados, quanto à complexidade e exatidão, esses modelos têm-se tornado uma ferramenta efetiva na predição de eventual contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, proporcionada pelo uso de fertilizantes, pesticidas e outros produtos na agricultura.

O deslocamento de fluidos miscíveis ocorre quando um fluido mistura-se com um outro e o desloca. No momento em que os dois fluidos se encontram, a interface entre eles é nitidamente definida. À medida que o tempo transcorre, a interface entre os dois fluidos perde a nitidez.

Primeiramente, é necessário definir alguns termos utilizados em estudo de deslocamento de fluidos miscíveis: 1) fluido: líquido com características físicas e químicas definidas; 2) efluente ou eluente: fluido coletado na seção de saída de uma coluna de solo; 3) fluido deslocador: aquele que desloca o fluido atual e ocupa o espaço por ele deixado no meio poroso; e 4) fluido deslocado: aquele que é substituído no espaço poroso pelo fluido deslocador (FERREIRA, 2001).

No deslocamento, há distribuição das concentrações de solutos em valores diferenciados, fundamentalmente em razão da velocidade de escoamento e da taxa de difusão de solutos (BIGGAR & NIELSEN, 1962).

O deslocamento de solutos ocorre em decorrência de três processos: convecção ou fluxo de massa, difusão e dispersão. O movimento de convecção refere-se ao escoamento passivo de um soluto junto com a água do solo. O movimento difusivo decorre do gradiente de atividade dos íons na solução do solo, ocorrendo mesmo quando não há fluxo. O movimento dispersivo ocorre em resposta às diferenças na velocidade de escoamento nos poros de diferentes tamanhos e formas. Os coeficientes de difusão e dispersão são freqüentemente considerados aditivos (Van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986; FERREIRA, 2001).

A interface entre dois fluidos no meio poroso não pode ser diretamente visualizada. Por isso, considera-se a mudança na concentração do fluido deslocador como o limite entre os dois fluidos emergentes do solo. Essas mudanças na concentração dos efluentes são normalmente apresentadas numa forma-padrão denominada “curva de efluentes”, que resulta de ensaios realizados em colunas de percolação. Amostras do efluente são coletadas, determinando-se as concentrações de solutos. Locando os dados experimentais de concentração relativa ( $C/C_0$ ), em função do número de volume de poros ( $p$ ) ou do tempo de coleta ( $t$ ), obtém-se, então, a curva experimental de efluente.  $C$  é a concentração do soluto no efluente e  $C_0$  é a concentração inicial do soluto no fluido deslocador. O número de volume de poros é a relação entre o volume acumulado de efluente em determinado tempo e o volume de poros na coluna de solo. É dado pela expressão

$$p = \frac{Qt}{V_0} = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

em que

Q: vazão ( $\text{cm}^3/\text{min}$ );

t: tempo de coleta do efluente (min);

$V_o$ : volume de poros do meio poroso ocupado pelo fluido ( $\text{cm}^3$ ); e  
 $V$ : volume de efluente coletado no tempo  $t$  ( $\text{cm}^3$ ).

Os modelos matemáticos que descrevem a dispersão, a difusão ou, de forma conjunta, a dispersão-difusão, quando resolvidos para condições iniciais e de contorno, estimam as concentrações do soluto no efluente em função do tempo ou do número de volume de poros, permitindo traçar as curvas teóricas de efluentes (FERREIRA, 2001).

O transporte de íons no solo, como amônio, fosfato e potássio, pode ser simulado por meio de modelos físico-matemáticos. Em situações de escoamento permanente, o movimento de solutos no solo pode ser estimado pela aplicação de modelos fundamentados na equação de transporte (Van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986), na forma

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

em que

$R$ : fator de retardamento (adimensional);  
 $C$ : concentração do soluto na solução do solo ( $\text{mg/mL}$ );  
 $t$ : tempo transcorrido durante a coleta do efluente (min);  
 $D$ : coeficiente dispersivo-difusivo ( $\text{cm}^2/\text{min}$ );  
 $x$ : coordenada espacial (cm); e  
 $v$ : velocidade média de avanço ( $\text{cm}/\text{min}$ ).

O primeiro membro à direita da equação 2 representa o transporte difusivo-dispersivo, e o segundo, o fluxo de massa.

A solução analítica da equação 2 para  $R = 1$  proposta por LAPIDUS & AMUNDSON (1952) é

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \frac{R - p}{2(DRp/vL)^{\frac{1}{2}}} \right] + e^{\frac{vL}{D}} \operatorname{erfc} \left[ \frac{R + p}{2(DRp/vL)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \quad (3)$$

em que

erfc: função-erro complementar;

L: comprimento da coluna de solo (cm); e

p: número de volume de poros.

Conhecendo os valores de  $v$ ,  $L$  e  $D$  para um dado soluto e meio poroso, podem-se estimar os valores de  $C/C_0$  para vários valores de  $p$  e construir a curva teórica de efluente.

## **2.2. Fator de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão**

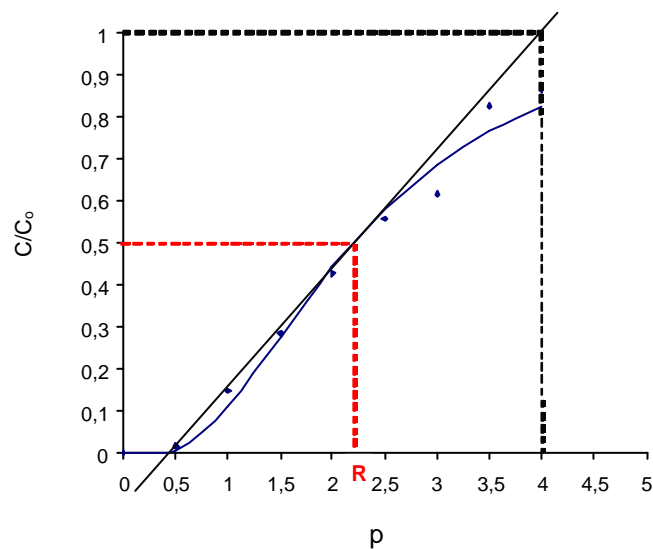
O sucesso dos modelos físicos-matemáticos propostos para simular o transporte de solutos no solo, em grande parte, depende da confiabilidade das variáveis envolvidas. Portanto, velocidade de avanço, coeficiente de dispersão-difusão ( $D$ ) e fator de retardamento ( $R$ ) devem ser necessariamente determinados com exatidão (Van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986).

$R$  pode ser definido como a capacidade de retenção ou efeito-tampão do solo para o deslocamento de determinado elemento ou composto existente no solo (CAMPOS & ELBACHÁ, 1991; MATOS, 1995). Ele representa a defasagem existente entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante, sendo a primeira menor quando há interação entre os solutos e os componentes da fase sólida do solo (VALOCCHI, 1984).

$D$ , também chamado de coeficiente de difusão aparente ou coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal, representa o efeito combinado da dispersão mecânica e da difusão iônica. A dispersão mecânica é um movimento proporcionado por variações na velocidade de deslocamento da solução dentro de poros individuais e entre poros de diferentes tamanhos, formas e direções. A difusão iônica origina-se em resposta à existência de gradientes de concentração (NIELSEN et al., 1986).

Van GENUCHTEN & WIERENGA (1986) descrevem diferentes métodos para determinação de R e D a partir de ensaios em colunas de lixiviação. Os mais utilizados em estudos de mobilidade de solutos são os baseados na declividade da curva de eluição e na análise dos mínimos quadrados. O primeiro tem sido usado em virtude de sua facilidade de aplicação e pouca exigência de cálculos. Já o segundo, apesar de exigir número maior de cálculos, tornou-se fácil e prático com o advento de programas de computação (RAMOS, 1998).

As estimativas iniciais de R e D, usadas nesses métodos, são obtidas por meio das curvas experimentais de efluentes (Figura 1). Considera-se o valor de R quando o número de volume de poros corresponde ao valor  $C/C_0 = 0,5$ . Pode-se obter este valor graficamente, pela curva experimental de efluente, ou matematicamente, a partir de uma equação de regressão ajustada aos valores de  $C/C_0$  em função de p. O valor da declividade da curva experimental de efluente (S) pode ser estimado diretamente no gráfico ou matematicamente. Na estimativa matemática, é o valor da derivada primeira da equação de regressão para p correspondente a  $C/C_0 = 0,5$ .



$$R = 2,2 \quad S = 1/(4 - 0,5) = 0,28$$

Figura 1 – Método gráfico para determinar o valor do fator de retardamento (R) e da declividade da curva experimental de efluente (S).

Com o valor de R e S, estima-se D, pela equação

$$D = \frac{vL}{4\pi R^2 S^2} \quad (4)$$

em que

v: velocidade média de avanço da solução percolante (cm/min);

L: comprimento da coluna de solo (cm); e

S: declividade da curva de efluente para  $C/C_0 = 0,5$ .

### **2.3. Transporte de nitrogênio, fósforo e potássio em colunas de solo**

Trabalhos têm sido realizados para descrever o transporte de amônio, fosfato e potássio em colunas de percolação, estudando-se, separadamente, o comportamento desses nutrientes em eluições realizadas com agregados de diferentes tamanhos (2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,105; e <0,105 mm) separados de um Latossolo Vermelho-Escuro (ARAÚJO, 1997; COELHO et al., 2000; ARAÚJO et al., 2000).

Um estudo do comportamento do nitrogênio, quando aplicado na forma de amônio e associado com os ânions sulfato, nitrato ou cloreto, mostrou que, na maioria dos tratamentos, houve superposição das curvas teóricas representadas pelo modelo que descreve a dispersão com o que descreve a dispersão-difusão, indicando que o transporte do amônio é, predominantemente, efetuado por dispersão. Em acréscimo, não houve diferença significativa em relação ao ânion acompanhante (COELHO et al., 2000). A predominância do transporte por dispersão justifica-se pelas características do sistema poroso dos Latossolos. A bimodalidade do sistema poroso leva à distinção de duas regiões: uma de solução móvel (interagregados), onde se desenvolve grande parte do sistema radicular, e outra de solução imóvel (intra-agregados), com escassa presença de raízes. Na primeira verificam-se ao menos dois dos três processos previamente indicados (convecção, dispersão e difusão) e, na segunda, o transporte é

fundamentalmente efetuado por difusão. Em solos com estrutura diferente daquela dos Latossolos, esse fenômeno pode ser menos evidente. Apesar disso, a quase totalidade do escoamento ocorrerá pelos macroporos, localizados no espaço poroso interagregados, caracterizando a predominância do transporte por convecção e dispersão (ARAÚJO, 1997).

O transporte de amônio descrito por COELHO et al. (2000) também foi verificado para o fosfato (ARAÚJO et al., 2000). Este nutriente, quando em contato por períodos relativamente prolongados com os colóides inorgânicos do solo, principalmente nos solos mais oxídicos, sofre um processo de adsorção e uma transformação gradativa de formas lábeis para formas não-lábeis (NOVAIS & SMYTH, 1999). Entretanto, no escoamento em meio saturado, o modelo que considera apenas o escoamento dispersivo apresentou melhor predição do transporte, revelando predomínio da dispersão hidrodinâmica sobre a difusão do fosfato, durante o deslocamento (ARAÚJO et al., 2000). Essa forma de transporte é válida também para o caso do potássio em meio saturado (ARAÚJO et al., 2000).

Para agregados de diferentes tamanhos, foi observado que o coeficiente dispersivo-difusivo para o potássio foi maior que para o fosfato nas maiores classes de agregados. Nas menores classes, verificou-se comportamento contrário, indicando que o fosfato se move mais facilmente que o potássio nos agregados menores (ARAÚJO et al., 2000). Quando se considera o solo em conjunto, a proporção de agregados de diferentes classes poderá determinar um comportamento diferenciado para o escoamento desses dois nutrientes num meio saturado. Avaliações desse tipo são importantes na otimização do manejo e uso de fertilizantes via água de irrigação (ARAÚJO et al., 2000).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se um experimento em laboratório utilizando colunas de percolação preenchidas com amostras de cinco solos, de diferentes regiões do Estado de Minas Gerais (Quadro 1), com características texturais contrastantes. As amostras foram coletadas da camada superficial (0 a 20 cm). Esses materiais foram secos ao ar e passados em peneiras de 2 mm. Posteriormente, foram caracterizados física e quimicamente (Quadro 2).

Os tratamentos corresponderam a um fatorial  $5 \times 2^3$ , sendo os cinco solos indicados que receberam aplicações de soluções de fosfato, potássio e amônio com duas concentrações (Quadro 3). O delineamento experimental, em blocos casualizados, permitiu a execução seqüencial das três repetições, utilizando-se 40 colunas de cada vez.

Quadro 1- Identificação, classificação e localização dos cinco solos estudados

Identificação	Classificação	Localização (MG)
RQo	Neossolo Quartzarênico órtico	Jaíba
LVd1	Latossolo Vermelho distrófico	Santa Bárbara
LVAd	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	Santa Bárbara
LVd2	Latossolo Vermelho distrófico	São Sebastião do Paraíso
LVd3	Latossolo Vermelho distrófico	Sete Lagoas

Quadro 2 - Caracterização física, química e mineralógica das amostras dos cinco solos estudados

Característica	RQo	LVd1	LVAd	LVd2	LVd3
Análise textural (kg/kg)					
-Areia grossa	0,490	0,420	0,260	0,050	0,070
-Areia fina	0,380	0,160	0,170	0,270	0,050
-Silte <sup>(1)</sup>	0,020	0,080	0,100	0,170	0,130
-Argila <sup>(1)</sup>	0,110	0,340	0,470	0,510	0,750
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )					
-do solo <sup>(2)</sup>	1,33	1,15	1,09	1,15	0,84
-de partículas	2,56	2,46	2,56	2,89	2,56
Porosidade (dm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> )					
-total	0,480	0,532	0,574	0,602	0,671
-macroporosidade	0,340	0,256	0,250	0,274	0,317
-microporosidade	0,140	0,276	0,324	0,328	0,354
pH em água (1:2,5)	4,8	4,3	4,5	5,3	5,3
P (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup>	2,1	2,3	1,5	1,3	5,4
K <sup>+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup>	15	13	24	30	69
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>(4)</sup>	0,53	0,07	0,08	0,61	2,76
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>(4)</sup>	0,09	0,05	0,05	0,16	0,51
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>(4)</sup>	0,50	1,20	1,20	0,10	0,30
H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>(5)</sup>	2,97	7,92	5,61	5,61	9,57
Carbono orgânico (dag/kg)	0,45	2,58	1,20	1,61	3,70
Minerais da fração argila <sup>(6)</sup>	Ka	Ka	Ka	Gt	Ka
(em proporção decrescente)	Gb	Gb	Gb	Ka	Gt
	Gt	VHE	VHE	Gb	Hm

<sup>(1)</sup> Método da pipeta (EMBRAPA, 1997). <sup>(2)</sup> Método da proveta (EMBRAPA, 1997). <sup>(3)</sup> Extrator Mehlich-1 (BRAGA & DEFELIPO, 1974). <sup>(4)</sup> Extrator KCl 1 mol/L (EMBRAPA, 1997). <sup>(5)</sup> Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L, pH = 7,0 (EMBRAPA, 1997). <sup>(6)</sup> Hm: hematita, Gb: gibbsita; Gt: goethita, Ka: caulinita, VHE: vermiculita com hidróxido-entrecamadas. Referências: AMARAL, 2000 (LVAd e LVd1); ARAÚJO, 1997 (LVd3); FREITAS, 1998 (RQo e LVd2).

Quadro 3 - Concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador

Codificação <sup>(1)</sup>	Fosfato <sup>(2)</sup>	Potássio <sup>(3)</sup>	Amônio <sup>(4)</sup>
	mg/L do íon		
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	15	75	15
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	15	75	60
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	15	300	15
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	15	300	60
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	60	75	15
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	60	75	60
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	60	300	15
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	60	300	60

<sup>(1)</sup> Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente. <sup>(2)</sup> Fonte: Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. <sup>(3)</sup> Fonte: KCl. <sup>(4)</sup> Fonte: NH<sub>4</sub>Cl.

A coluna de percolação de vidro, com 2,58 cm de diâmetro interno e 30 cm de comprimento, teve a extremidade inferior preenchida com uma camada de 0,5 cm de areia (1,0-0,5 mm), para facilitar a drenagem e evitar perda de material do solo. A altura de solo no interior da coluna foi de 20 cm.

Para permitir distribuição mais homogênea do solo na coluna foi utilizada uma escova para limpeza de buretas. Durante o enchimento da coluna, a escova era movimentada constantemente, girando sobre seu eixo, para prevenir a separação do material de solo pelo tamanho diferencial dos agregados e, também, para evitar o aparecimento de volumes livres de solo. A coluna, já preenchida, foi ligeiramente compactada. Essa compactação foi realizada deixando a coluna cair sobre um retângulo de borracha de 2 cm de espessura, com distância de queda de aproximadamente 3 cm. Essa operação foi repetida duas vezes, de forma que a coluna de solo ficasse na altura de 20 cm. Na superfície do solo foram colocados discos de lã de vidro, a fim de evitar o turbilhonamento da solução e o conseqüente selamento pelo contato direto do fluido deslocador.

O volume de poros ( $V_o$ , em  $\text{cm}^3$ ) para cada um dos cinco solos estudados foi determinado pela relação

$$V_o = V_T f = \pi r^2 h \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (5)$$

em que

$V_T$ : volume total do solo na coluna ( $\text{cm}^3$ );

f: porosidade total ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

r: raio interno da coluna (cm);

h: altura de solo na coluna (20 cm);

$D_s$ : densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); e

$D_p$ : densidade de partículas ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

As colunas com solo foram saturadas de forma ascendente com uma solução de  $\text{CaCl}_2$  0,005 mol/L, para diminuir ao máximo a presença de ar nos

poros. Terminada a saturação, o sistema de carga constante do tipo frasco de Mariotte foi posicionado na extremidade superior da coluna. Aplicou-se, então, a mesma solução de  $\text{CaCl}_2$  até obtenção de escoamento permanente, mantendo-se uma lâmina constante de 2 cm acima da superfície do solo.

O fluxo ( $q$ , em cm/min) foi calculado por meio da relação

$$q = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

em que

Q: vazão ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ); e

A: seção transversal da coluna ( $\text{cm}^2$ ).

A velocidade de avanço da solução percolante ( $v_f$ , em cm/min) para cada solo foi determinada pela relação entre  $q$  e  $f$

$$v_f = \frac{q}{f} \quad (7)$$

Foi também calculada a velocidade de avanço ( $v_M$  em cm/min), considerando exclusivamente a macroporosidade ( $M$ , em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$$v_M = \frac{q}{M} \quad (8)$$

Após atingir o escoamento permanente na coluna de percolação, aplicou-se um pulso de sete volumes de poros das soluções deslocadoras, recolhendo-se frações de efluente com 0,5 volume de poros, que foram acondicionadas em recipientes plásticos com tampa de pressão e congelados para análise posterior. Determinaram-se as concentrações de fosfato e amônio em cada fração do efluente por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974; e KEMPERS & ZWEERS, 1986, respectivamente). A concentração de potássio, na mesma solução, foi determinada por fotometria de chama. Conhecendo as concentrações do fosfato, potássio e amônio no efluente ( $C$ ), calcularam-se as

concentrações relativas ( $C/C_0$ ) para cada nutriente, sendo  $C_0$  a concentração no fluido deslocador.

O número de volume de poros ( $p$ ) foi calculado utilizando a equação 1. As concentrações relativas do fosfato, potássio e amônio relacionaram-se com o número de volume de poros, para obter as curvas experimentais de efluente para cada íon.

Os dados de fluxo, porosidade total, altura de solo na coluna, número de volume de poros e concentração relativa experimental constituem as variáveis de entrada do programa para o cálculo do coeficiente de dispersão-difusão e fator de retardamento (DISP)<sup>1</sup>. As variáveis de saída foram os valores ajustados do R e D para fosfato, potássio e amônio. As concentrações relativas estimadas foram também determinadas por meio do programa. Com os valores de  $C/C_0$  estimados, construíram-se as curvas teóricas de efluentes.

O programa DISP, que foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, é o ajustamento do modelo aos dados experimentais e baseia-se na soma dos mínimos quadrados dos resíduos,  $R_s$ . O programa possui uma rotina que permite a variação dos valores de R e D continuamente, até que concentrações relativas sejam obtidas, isto é

$$R_s = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{C}{C_0}(L, p) - \frac{C}{C_{oe}}(L, p) \right]^2 \quad (9)$$

em que

n: número de observações;

$C/C_0$ : concentração relativa dos dados experimentais;

$C/C_{oe}$ : concentração relativa estimada;

L: comprimento da coluna de solo; e

p: número de volume de poros.

---

<sup>1</sup> Paulo Afonso Ferreira e João Carlos F. Borges Júnior, UFV. Programa não-publicado.

Os resultados foram submetidos à análise de variância. Os solos que apresentaram homogeneidade de variância foram comparados por contrastes ortogonais. Os efeitos principais e as interações das concentrações de fosfato, potássio e amônio foram analisados estatisticamente, desdobrando-se os graus de liberdade em contrastes ortogonais correspondentes aos efeitos principais e às interações do fatorial  $2^3$  dentro de cada solo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas variáveis importantes para os modelos matemáticos foram calculadas durante a caracterização do solo e a realização do experimento em colunas. Inicialmente, determinou-se o volume de poros correspondente a cada solo (equação 5). Os valores resultantes foram de 50,18 cm<sup>3</sup> para RQo; 55,62 cm<sup>3</sup> para LVd1; 60,01 cm<sup>3</sup> para LVAd; 62,93 cm<sup>3</sup> para LVd2 e 70,15 cm<sup>3</sup> para LVd3. Seguidamente determinaram-se a vazão, o fluxo (equação 6) e as velocidades de avanço das soluções percolantes, considerando a porosidade total (equação 7) e a macroporosidade (equação 8) (Quadro 4).

Apesar da aplicação de uma lâmina constante de solução, houve variação no fluxo entre as diferentes colunas para um mesmo solo (Quadro 4). Essa variação pode ser atribuída à não-uniformidade na distribuição do solo na coluna, com reflexos na porosidade total e na macroporosidade.

A velocidade de avanço foi maior nos solos mais arenosos (RQo e LVd1) e naquele com maior teor de argila (LVd3). Como o ensaio foi conduzido em meio poroso saturado, o deslocamento da solução ocorreu preferencialmente pelos macroporos. Os solos RQo e LVd3, de maior macroporosidade (Quadro 2), permitem maior deslocamento da solução, justificando os altos valores de velocidades de avanço verificados. A velocidade de avanço da solução deslocadora no LVd1 foi superior à do

Quadro 4 – Fluxo e velocidade de avanço pela porosidade total e a macroporosidade, considerando as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

Tratamentos <sup>(1)</sup>	RQo	LVd1	LVAd	LVd2	LVd3
cm/min					
<b>Fluxo</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	4,56	2,52	1,70	1,23	3,28
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	4,69	2,65	1,63	1,35	2,45
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	4,67	2,53	1,62	1,27	2,70
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	4,20	3,21	1,49	1,90	2,03
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	3,99	2,54	1,58	1,39	2,54
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	4,47	2,49	1,88	1,72	2,52
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	4,40	2,45	1,81	1,28	3,06
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	4,63	2,57	1,41	1,38	2,92
<b>Média</b>	4,45	2,62	1,64	1,44	2,69
<b>Velocidade de avanço (Porosidade Total)</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	9,51	4,74	2,96	2,05	4,89
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	9,77	4,98	2,84	2,24	3,66
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	9,73	4,75	2,81	2,10	4,02
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	8,74	6,03	2,59	3,15	3,03
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	8,31	4,77	2,75	2,30	3,78
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	9,32	4,68	3,27	2,85	3,75
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	9,17	4,60	3,15	2,12	4,56
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	9,65	4,83	2,46	2,30	4,35
<b>Média</b>	9,28	4,92	2,86	2,39	4,00
<b>Velocidade de avanço (Macroporosidade)</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	13,42	9,86	6,81	4,50	8,84
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	13,79	10,36	6,52	4,92	6,61
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	13,74	9,88	6,46	4,62	7,27
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	12,34	12,53	5,95	6,93	5,48
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	11,74	9,92	6,33	5,06	6,84
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	13,16	9,73	7,52	6,62	6,79
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	12,95	9,56	7,24	4,65	8,25
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	13,62	10,03	5,64	5,05	7,87
<b>Média</b>	13,10	10,23	6,56	5,25	7,24

<sup>(1)</sup> Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

LVd3, apesar do primeiro apresentar menor macroporosidade. Isso pode ser justificado pela maior relação areia grossa/areia fina no LVd1 (2,63) (Quadro 2), o que favorece o deslocamento de volume maior de solução.

Quando comparadas as velocidades de avanço considerando a porosidade total e a macroporosidade, a segunda determinação, obviamente, apresenta valores superiores (Quadro 4). As diferenças entre essas duas formas de cálculo deve m-se à relação macro/microporosidade em cada solo (Quadro 2). Quanto maior essa relação, mais próximas serão as duas velocidades de avanço. A presença de óxido de Fe e Al confere uma estrutura maciça porosa aos Latossolos, evidenciada por elevada macroporosidade, mesmo nos solos muito argilosos. Nos solos estudados, a correlação entre a porosidade total e a macroporosidade foi de 0,956<sup>\*\*</sup>. Essa correlação não seria esperada em solos característicos de regiões temperadas, onde o incremento de argila é acompanhado, geralmente, de diminuição da macroporosidade. Essa alta correlação entre a porosidade total e a macroporosidade sugere que a utilização dos valores de velocidade de avanço calculados com porosidade total não interfere no estudo do deslocamento de solutos na solução do solo em ensaios de percolação em meio saturado, quando se trabalha com solos característicos de regiões tropicais e úmidas.

Para passar um mesmo número de volume de poros, as maiores velocidades de avanço da solução levam à diminuição da interação entre os solutos e os colóides do solo, em razão do menor tempo de contato. Isso pode resultar em menores valores do fator de retardamento, quando considerada a mesma mineralogia e superfície específica.

O fator de retardamento também depende da concentração do soluto. Dos três nutrientes estudados, o fosfato é o que mais interage com a fração mineral dos solos característicos das regiões tropicais e úmidas, em especial os Latossolos. A presença de óxidos de ferro e alumínio, a baixa proporção de argilas silicatadas, principalmente do tipo 2:1, e o baixo pH favorecem a adsorção de fosfato. Em solos extremamente intemperizados, o  $\Delta\text{pH}$

( $\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{\text{água}}$ ) pode ser positivo, o que indica elevada potencialidade de interação com ânions.

Os fatores de retardamento determinados para o fosfato, considerando os tratamentos aplicados, encontram-se no Quadro 5. Por ser uma variável que indiretamente representa a capacidade do solo em reter íons, o fator de retardamento dependerá das interações entre as fases líquida e sólida que ocorram durante a percolação da solução no solo. Assim, os maiores fatores de retardamento do fosfato estão associados com a maior interação íon-colóide e a menor velocidade de avanço.

As características dos solos influenciaram significativamente os fatores de retardamento para o fosfato, como indicado pelos contrastes apresentados no Quadro 6. Deve-se considerar que a textura e a mineralogia da fração argila são informações fundamentais na predição do movimento do fosfato. Os menores valores médios de R para fosfato encontram-se no solo arenoso (RQo), no de textura média (LVd1) e num dos argilosos (LVAd) (Quadro 5). Tanto o LVd1 quanto o LVAd apresentam mineralogia predominantemente caulínica, com pouca quantidade de óxido de ferro, o que proporciona menor interação fosfato-colóides do solo.

Na comparação do LVd2 com o LVd3 (Quadros 5 e 6), há valores diferenciados no teor de argila e também na mineralogia (Quadro 2). O LVd2 apresenta um teor de argila menor, porém é mais oxídico que o LVd3. Portanto, a maior presença de óxidos e a menor velocidade de avanço do LVd2 (Quadro 4) resultam em maior R para o fosfato nesse solo. Ainda, a dificuldade na dispersão do solo para análise textural entre os materiais oxídicos (DONAGEMA, 2000) permite supor que o contraste textural entre os solos LVd2 e LVd3 não seria tão pronunciado (Quadro 2).

Considerando a concentração de fosfato no fluido deslocador, verificam-se maiores valores do fator de retardamento na concentração menor, em virtude da maior interação do fosfato com os sítios de adsorção (Quadros 5 e 7). Quanto maior a concentração de fosfato no fluido deslocador, mais rapidamente os sítios de adsorção serão saturados e, conseqüentemente, a

Quadro 5 – Fator de retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, considerando as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

Tratamentos <sup>(1)</sup>	RQo	cm/min			
		LVd1	LVAd	LVd2	LVd3
<b>Fosfato</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	8,77	16,67	16,93	19,79	15,74
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	10,50	16,57	16,06	19,44	18,49
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	10,99	16,39	18,14	19,62	16,29
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	8,97	16,49	19,62	19,00	19,29
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	4,26	10,74	11,40	17,10	14,34
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	4,11	12,99	14,07	14,31	13,75
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	4,08	17,42	13,45	16,60	13,13
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	4,66	14,28	13,00	15,69	14,29
<b>Média</b>	7,04	15,20	15,33	17,70	15,66
<b>Potássio</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	3,63	2,34	2,57	2,92	6,57
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	3,77	2,10	2,20	3,04	4,95
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	3,14	2,13	2,24	3,07	4,54
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	2,46	2,19	2,13	2,32	3,38
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	3,93	1,99	2,51	2,38	4,14
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	2,98	2,68	2,36	2,07	3,81
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	2,63	3,40	2,56	2,57	3,07
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	2,75	2,39	2,37	2,33	2,94
<b>Média</b>	3,16	2,40	2,37	2,59	4,18
<b>Amônio</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	3,27	1,83	2,02	3,09	3,29
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	2,70	1,34	1,48	3,82	2,72
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	1,99	1,07	1,80	3,11	3,86
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	2,95	2,52	1,26	3,43	3,71
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	2,97	1,51	1,51	1,62	3,12
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	2,23	1,63	1,69	1,46	2,22
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	2,32	1,92	1,25	1,49	1,97
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	1,91	2,59	1,83	2,91	2,82
<b>Média</b>	2,54	1,80	1,61	2,62	2,96

<sup>(1)</sup> Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

Quadro 6 – Contrastes ortogonais médios do fator de retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, comparando as médias para as soluções percolantes dos solos estudados

Íon	Contraste	Valor
Fosfato	4 RQo - LVd1 - LVAd - LVd2 - LVd3	-8,93 <sup>**</sup>
	3 LVd1 - LVAd - LVd2 - LVd3	-1,03 <sup>**</sup>
	2 LVAd - LVd2 - LVd3	-1,35 <sup>**</sup>
	LVd2 - LVd3	2,04 <sup>**</sup>
Potássio <sup>(1)</sup>	RQo - LVd1	0,76 <sup>**</sup>
	LVAd - LVd2	-0,22 <sup>*</sup>
Amônio	4 RQo - LVd1 - LVAd - LVd2 - LVd3	0,29 <sup>*</sup>
	3 LVd1 - LVAd - LVd2 - LVd3	-0,60 <sup>**</sup>
	2 LVAd - LVd2 - LVd3	-1,18 <sup>**</sup>
	LVd2 - LVd3	-0,34 <sup>*</sup>

<sup>\*\*</sup> Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

<sup>(1)</sup> Contrastes restritos a solos que apresentaram homogeneidade de variâncias.

concentração relativa  $C/C_0 = 0,5$  será atingida com menores valores de número de volume de poros.

Com relação à concentração do íon acompanhante, quando considerado o potássio, diferenças são evidenciadas em dois dos três solos predominantemente cauliniticos (LVd1, LVAd e LVd3) (Quadros 5 e 7). Em LVd1 e LVAd há relação direta entre R, para o fosfato, e a concentração de potássio na solução deslocadora, mostrando a retenção do cátion pelas caulinitas. No entanto, a análise estatística não indicou essa resposta para o LVd3. Pesquisa realizada por ARAÚJO (1997) mostrou presença de illita nesse solo e elevada capacidade de liberação de potássio, o que levou à não-significância na análise estatística do R do fosfato, quando confrontadas as concentrações diferenciadas de potássio no fluido deslocador.

Com relação à concentração do amônio, os dados não evidenciam modificações para o fator de retardamento do fosfato com a concentração nos três solos menos argilosos (Quadros 2, 5 e 7). Nos restantes, a significância registrada mostra comportamento contrário entre o LVd2 e o LVd3. No primeiro, diminuem os valores de R com o incremento da concentração de amônio e, no segundo, há relação direta entre as duas variáveis. As

Quadro 7 – Efeitos principais e interações das concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, para o fator de retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, nos cinco solos estudados

Tratamento <sup>(1)</sup>	Efeitos Principais e Interações						
	P	K	N	PxK	PxN	KxN	PxKxN
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	-1	-1	-1	1	1	1	1
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	-1	-1	1	1	-1	-1	1
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	-1	1	1	-1	-1	1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	1	-1	1	-1	1	-1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	1	1	-1	1	-1	-1	1
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	1	1	1	1	1	1	1
<b>Fosfato</b>							
RQo	-5,53**	0,26	0,03	0,08	-0,18	0,75	1,12**
LVd1	-2,67**	1,90**	-0,22	-2,08**	0,22	1,30*	-1,40**
LVAd	-4,71**	1,44**	0,71	0,95	-0,40	0,19	-1,37**
LVd2	-3,54**	0,07	-1,17*	-0,37	0,68	-0,40	0,54
LVd3	-3,57**	0,17	1,58**	0,50	1,29*	-0,50	0,37
<b>Potássio</b>							
RQo	-0,18**	-0,83**	-0,34**	-0,07	0,07	-0,06	0,47**
LVd1	0,42**	0,25**	-0,12*	-0,31**	0,03	0,35**	-0,50**
LVAd	0,16	-0,08	-0,20	-0,11	-0,03	-0,05	-0,07
LVd2	-0,50**	-0,03	-0,29*	-0,25*	-0,02	0,20	0,23*
LVd3	-1,37**	-1,38**	-0,81*	-0,41	-0,58	-0,16	-0,06
<b>Amônio</b>							
RQo	-0,37	-0,50*	-0,19	-0,01	0,38	-0,46*	-0,30
LVd1	0,22	0,45	0,44	-0,24	0,04	-0,62**	-0,35
LVAd	-0,07	-0,14	-0,08	-0,08	-0,46	-0,10	0,10
LVd2	-1,49**	0,24	0,58	-0,42*	-0,05	-0,29	0,50*
LVd3	-0,86**	0,25	-0,19	0,53**	-0,17	-0,54**	0,33

(1) Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

características mineralógicas dos dois materiais permitem a interpretação desse comportamento (Quadro 2). O LVd2, mais oxídico, apresenta maior repulsão por cátions; assim, as maiores concentrações de amônio levam a menores valores de R para o fosfato associado. O LVd3, mais caulínítico, evidencia comportamento inverso, pela maior capacidade de troca catiônica. A maior retenção de amônio dificulta o deslocamento do fosfato.

Correlações negativas foram observadas entre o fator de retardamento para fosfato e a velocidade de avanço, considerando a porosidade total e a macroporosidade, indicando a relação entre as duas variáveis (Figura 2). Isso confirma que as menores velocidades de avanço contribuem para maior interação soluto solo, o que resulta em maiores valores do fator de retardamento para o fosfato.

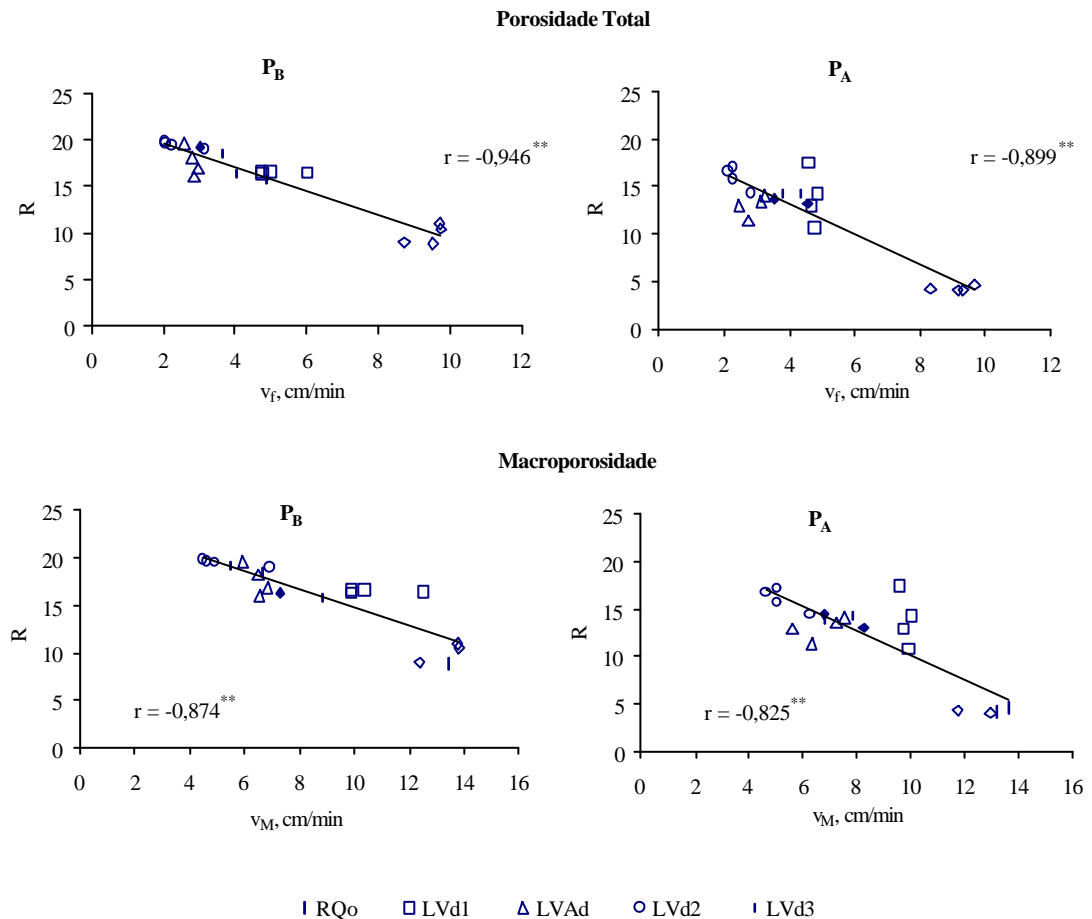


Figura 2 – Relação entre o fator de retardamento (R) e a velocidade de avanço (v) calculada para a porosidade total e a macroporosidade, considerando as concentrações de fosfato no fluido deslocador. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato, respectivamente.

Quando comparados com os do fosfato, observam-se valores menores dos fatores de retardamento para o potássio e para o amônio (Quadro 5). O caráter catiônico do potássio e do amônio e a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos estudados (Quadro 2) levam a uma menor interação desses íons com os colóides, indicada pelos menores valores do fator de retardamento.

Um aspecto interessante é a ocorrência de maior fator de retardamento do amônio no RQo, quando comparado com os Latossolos (LVd1 e LVAd) (Quadros 5 e 6). Também para o potássio, o RQo apresentou maior fator de retardamento quando comparado com o LVd1 (Quadros 5 e 6). Era de se esperar que esse solo apresentasse menores valores de R, em razão da menor CTC e da maior velocidade de avanço, o que proporciona menor tempo de interação íon-colóide. Para explicar esse comportamento, deve-se considerar a competição desses íons pelos sítios de adsorção, que, nesse caso, obedeceu à seguinte ordem decrescente:  $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ . A adsorção específica do fosfato explica a maior afinidade desse íon quando comparado ao potássio e ao amônio, que apresentam adsorção não-específica. Portanto, a diferença na CTC entre os solos pode ter sido mascarada pelo efeito competidor do fosfato, que ocupou proporcionalmente mais os sítios de adsorção dos Latossolos do que aquele do Neossolo (RQo), possibilitando maior interação íon-colóide e, conseqüentemente, menor fator de retardamento para amônio nos Latossolos estudados. O mesmo aconteceu para o fator de retardamento do potássio no LVd1, em comparação com o RQo. Quando existe grande diferença na competição pelos sítios de adsorção entre os íons estudados, não se deve considerar exclusivamente a CTC como explicação para os diferentes fatores de retardamento encontrados.

Entre os Latossolos, quando houve homogeneidade de variâncias para o potássio, e em todos os casos para o amônio, os maiores valores do fator de retardamento estiveram associados com o incremento da fração argila, independentemente de possíveis diferenciações mineralógicas (Quadros 2, 5 e 6). Como o fator de retardamento do nutriente no solo pode ser tomado como

a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da solução percolante, nutrientes que apresentam menor fator de retardamento e, portanto, menor defasagem são os mais móveis no solo. Por esse raciocínio, torna-se evidente que, para os solos estudados, a seqüência de mobilidade dos nutrientes é  $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{H}_2\text{PO}_4^-$ .

Os fatores de retardamento para potássio, quando considerada sua concentração no fluido deslocador, apresentaram comportamento diferenciado, com diferenças significativas em três deles (RQo, LVd1 e LVd3) e resultados semelhantes nos dois restantes (LVAd e LVd2) (Quadros 5 e 7). Nas amostras do RQo e do LVd3, houve diminuição no fator de retardamento com o incremento da concentração do íon na solução, à semelhança do observado para o fosfato. Essa resposta é coerente com a saturação mais rápida do complexo de troca pela maior concentração de potássio no fluido deslocador. A constatação de um comportamento oposto por parte do LVd1 não permite resposta imediata, à luz das determinações realizadas.

Os fatores de retardamento do amônio foram os menores detectados, indicando baixa interação soluto-solo (Quadro 5). Isso levou à não-apresentação de diferenças significativas, quando consideradas as concentrações do amônio no fluido deslocador (Quadro 7). Houve resposta do fator de retardamento do amônio nos dois solos mais argilosos (LVd2 e LVd3) à concentração de fosfato no fluido deslocador. A diminuição do fator de retardamento com o incremento da concentração de fosfato seria indicativa da formação de um par iônico, que facilitaria o deslocamento do amônio na coluna de percolação.

Não foram verificadas correlações significativas entre o fator de retardamento e a velocidade de avanço. Isso indica que, quando há menor interação entre o íon e o colóide, o fluxo é menos determinante na movimentação de solutos num meio poroso.

É de interesse indicar que, quando se pretende suprir as necessidades nutricionais de determinada cultura por meio de fertirrigação, os íons com maior fator de retardamento apresentam menor mobilidade e,

conseqüentemente, maior dificuldade de atingir a profundidade de máxima densidade do sistema radicular. Nesse sentido, os fatores de retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, considerando cada solo em particular, são de fundamental importância para a realização de experimentos que possibilitem calcular a concentração que proporcione menor perda desses íons por lixiviação. Assim, numa fertirrigação, considerando os solos aqui estudados, a forma (conjunta ou separada) e a ordem de aplicação são detalhes importantes para prever a mobilidade desses íons no perfil do solo. Nesse caso, havendo necessidade de aplicação seqüenciada, a ordem sugerida é:  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{NH}_4^+$ .

Os coeficientes de dispersão-difusão (D) determinados para o fosfato, considerando os tratamentos aplicados, encontram-se no Quadro 8. Como mostra a equação 4, diversos fatores contribuem para o valor de D, como a velocidade de avanço e a inversa do quadrado do fator de retardamento. No íon em foco, a velocidade de avanço foi fundamental, como indicado pela correlação entre os valores médios indicados no Quadro 8 e os valores das velocidades de avanço expressas no Quadro 4. Os coeficientes de correlação linear simples foram de 0,937\*\*, considerando a porosidade total, e de 0,853\*, quando a relação levou em consideração a velocidade de avanço calculada para a macroporosidade. A correlação entre D e a inversa do quadrado do fator de retardamento não foi significativa.

Como não houve homogeneidade de variância para os cinco materiais, somente dois contrastes foram calculados comparando os solos LVd1, LVAd e LVd3 (Quadros 8 e 9). O solo de textura média (LVd1) apresentou maiores valores de D para fosfato que os solos de textura argilosa (LVAd e LVd3) (Quadros 8 e 9). Esse solo apresenta maior proporção de espaço livre, o que levaria a um aumento do caráter errático do movimento do fluido deslocador na frente de avanço da solução. Quando comparado o LVAd com o LVd3, ambos de textura argilosa, verificaram-se maiores valores de D para o LVd3, com menor velocidade de avanço. MATOS et al. (1995) verificaram que a propriedade física que melhor explicou a variação de D para zinco, cádmio, cobre e chumbo foi a velocidade de avanço da solução considerando como

Quadro 8 – Coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato, do potássio e do amônio, considerando as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

<b>Tratamento<sup>(1)</sup></b>	<b>RQo</b>	<b>LVd1</b>	<b>LVAAd</b>	<b>LVd2</b>	<b>LVd3</b>
cm <sup>2</sup> /min					
<b>Fosfato</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	156,83	80,05	52,10	15,61	69,70
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	179,21	73,99	32,35	24,55	54,59
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	169,68	59,84	26,04	13,81	49,62
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	118,27	83,32	25,46	20,18	27,64
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	64,36	159,34	95,55	33,15	114,91
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	94,39	137,10	76,30	42,14	122,03
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	83,98	159,36	93,49	35,19	115,65
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	118,07	126,41	75,36	40,30	110,95
<b>Média</b>	123,10	109,93	59,58	28,12	83,14
<b>Potássio</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	31,63	30,16	34,24	29,14	92,13
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	63,34	41,69	20,39	38,60	70,23
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	60,30	41,48	25,54	43,72	70,68
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	36,66	48,16	24,46	29,52	30,50
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	42,22	30,17	30,01	24,71	58,11
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	52,35	75,17	43,52	39,10	43,30
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	40,03	76,30	40,23	36,03	56,70
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	62,49	64,86	34,18	36,33	43,93
<b>Média</b>	48,63	51,00	31,57	34,65	58,20
<b>Amônio</b>					
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	69,48	57,67	50,90	63,40	160,19
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	46,58	45,65	16,25	172,50	50,05
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	29,76	38,02	73,45	107,39	894,19
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	90,44	199,04	27,76	88,31	169,37
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	42,60	45,02	26,24	62,45	743,06
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	27,40	76,51	34,27	36,55	52,37
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	45,32	92,29	62,44	28,96	134,52
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	39,40	96,43	43,81	58,26	195,35
<b>Média</b>	48,87	81,33	41,89	77,23	299,89

<sup>(1)</sup> Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

seção de escoamento a macroporosidade, sendo de muita importância para estudos de dispersão-difusão de metais no solo, uma vez que a macroporosidade é a característica física responsável pela livre movimentação de água no solo.

Levando-se em conta a concentração de fosfato no fluido deslocador, comportamento diferenciado mostrou o RQo com relação aos quatro solos restantes (Quadros 8 e 10). Neste solo, extremamente arenoso, os maiores valores de D foram registrados na menor concentração de fosfato. Entende-se que a menor interação adsorvato/adsorvente leva a uma maior uniformidade de deslocamento do soluto, com a maior concentração no fluido deslocador. O contrário acontece nos outros solos, em que a interação colóide-fosfato é mais acentuada em resposta às características texturais dos solos (Quadro 2). O íon acompanhante, em geral, não influenciou o coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato. Eventuais contrastes significativos não evidenciaram tendência definida sobre os valores de D (Quadro 10).

Quando considerados os coeficientes dispersivo-difusivos para o potássio e o amônio, não foram determinadas correlações significativas entre seus valores (Quadro 8) e as velocidades de avanço ou a inversa do quadrado do fator de retardamento (Quadro 4). Nas análises estatísticas, diferenças entre solos não mostraram tendência definida indicada pela disparidade de sinais para os contrastes significativos (Quadro 9). Tampouco houve comportamento uniforme na consideração das concentrações no fluido deslocador, que apresentaram somente alguns contrastes significativos com tendências aleatórias (Quadro 10).

As curvas de efluentes para fosfato, potássio e amônio são representadas pelas Figuras 3 a 17. O formato dessas curvas de efluentes é muito importante para compreensão do comportamento dos solutos em ensaios com colunas de percolação (NIELSEN & BIGGAR, 1962). Tomando-se como referencial o volume de poros unitário ( $p = 1$ ), podem-se inferir conclusões com relação às interações solo-soluto, pelo simples posicionamento das curvas. Caso não ocorra nenhuma interação solo-solução deslocadora, as

Quadro 9 – Contrastes ortogonais médios do coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato, do potássio e do amônio, comparando as médias para as soluções percolantes dos solos estudados<sup>(1)</sup>

Íon	Contraste	Valor
Fosfato	2 LVd1 - LVAd - LVd3	38,57**
	LVAd - LVd3	-23,56**
Potássio	3 RQo - LVd1 - LVAd - LVd2	9,58**
	2 LVd1 - LVAd - LVd2	17,89**
Amônio	LVAd - LVd2	-3,08
	3 RQo - LVd1 - LVAd - LVd2	-17,95**
	2 LVd1 - LVAd - LVd2	21,77**
	LVAd - LVd2	-35,34**

<sup>(1)</sup> Contrastes restritos a solos que apresentaram homogeneidade de variâncias.

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 10 – Efeitos principais e interações das concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, para o coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato, do potássio e do amônio, nos cinco solos estudados

Tratamento <sup>1</sup>	Efeitos Principais e Interações						
	P	K	N	PxK	PxN	KxN	PxKxN
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	-1	-1	-1	1	1	1	1
P <sub>B</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	-1	-1	1	1	-1	-1	1
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
P <sub>B</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	-1	1	1	-1	-1	1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>B</sub>	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>B</sub> N <sub>A</sub>	1	-1	1	-1	1	-1	-1
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>B</sub>	1	1	-1	1	-1	-1	1
P <sub>A</sub> K <sub>A</sub> N <sub>A</sub>	1	1	1	1	1	1	1
<b>Fosfato</b>							
RQo	-65,80**	-1,20	8,77	-22,85	-23,29*	17,43	19,46
LVd1	71,25**	-5,39	-9,44	-0,05	18,15**	-4,71	-10,06
LVAd	51,19**	-8,99	-14,43*	-7,49	4,26	-5,07	-4,51
LVd2	19,17**	-1,49	7,35**	-1,59	0,30	1,61	-0,33
LVd3	65,50**	-14,34*	-8,67	-9,17	-9,88	4,67	-1,24
<b>Potássio</b>							
RQo	1,29	2,48	10,16**	-1,49	-6,13*	10,75**	16,92**
LVd1	21,25**	13,40**	12,94**	-4,51	-3,84	15,32**	-12,90**
LVAd	10,83**	-0,94	-1,87	-13,8	-5,60*	1,70	-8,08**
LVd2	-1,20	3,51	2,49	-0,76	-4,86	9,44**	2,39**
LVd3	-15,38*	-15,49*	-22,41**	-15,10*	-8,62	4,06	5,08
<b>Amônio</b>							
RQo	-20,38	4,71	4,16	-2,64	14,72	-23,21*	-18,57
LVd1	-7,53	50,23**	46,16**	16,64	28,34	-36,42**	-50,01**
LVAd	-0,40	19,95	-22,73	-2,92	-17,43	9,42	-3,90
LVd2	-61,34**	-12,99	23,35	-7,10	21,65	18,24	45,84**
LVd3	-37,12	96,94*	-366,20**	329,72**	-51,27	-34,21	341,55**

<sup>(1)</sup> Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

curvas são locadas basicamente em cima de uma reta, obtida para um volume de poros (deslocamento hipotético tipo pistão). Em caso contrário, ou seja, ocorrendo interação solo-soluto, o que em condições normais geralmente acontece, o ajuste a essa reta não é perfeito, em razão da difusão iônica e da dispersão mecânica na solução do solo (KIRKHAM & POWERS, 1972). O deslocamento das curvas para a direita representa a existência de interação solo-soluto, ou seja, o retardamento do soluto, em relação ao avanço da solução, devido a processos de adsorção específica, adsorção ao complexo de troca ou mesmo por processo de precipitação. Quanto maior for esse deslocamento, maior será o fator de retardamento. Para uma mesma velocidade de avanço da solução, o aumento do coeficiente dispersivo-difusivo faz decrescer a inclinação da curva de efluente, visto que, proporcionando uma mistura mais completa da solução deslocadora e com solução do solo, obtém-se lento aumento da concentração relativa ( $C/C_0$ ) (NIELSEN & BIGGAR, 1962).

As curvas de efluente para fosfato nos Latossolos (Figuras 4 a 7) tornaram evidentes a grande afinidade do fosfato com esses solos, notadamente para soluções que receberam concentração menor de fosfato (15 mg/L). Essa afinidade se deve ao fato desses solos apresentarem caráter drenado para fósforo, ou seja, devido à adsorção específica desse ânion às superfícies dos minerais de argilas silicatadas e, principalmente, dos óxidos de ferro e de alumínio presentes.

Observa-se, nessas curvas (Figuras 4 a 7), lento aumento da concentração relativa ( $C/C_0$ ), o que indica maior mistura da solução deslocadora com a solução do solo, isto é, maior retenção do fosfato nos sítios de adsorção nesses solos em relação ao RQo (Figura 3). Nota-se também deslocamento das curvas para direita, para  $p < 3$ , nas curvas de efluente com menor concentração de fosfato nos Latossolos, em comparação ao RQo (Figura 3). Esse deslocamento justifica os maiores valores de fator de retardamento do fosfato nos Latossolos, em comparação ao Neossolo (RQo). Tais resultados assemelham-se aos encontrados por RAO et al. (1980), que

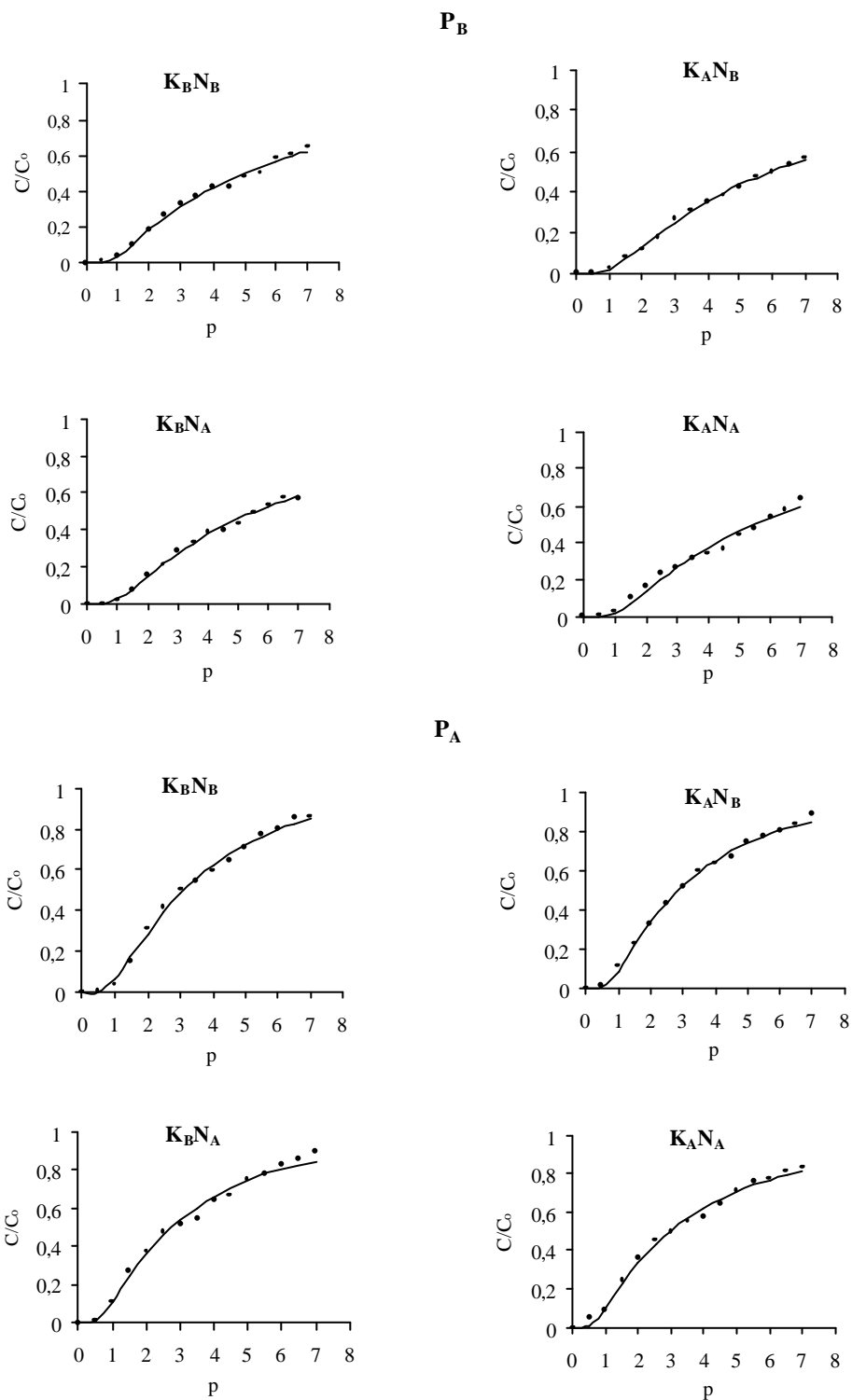


Figura 3 – Curva teórica de efluente para fosfato e pontos experimentais, considerando a concentração de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, em colunas do Neossolo Quartzarênico órtico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

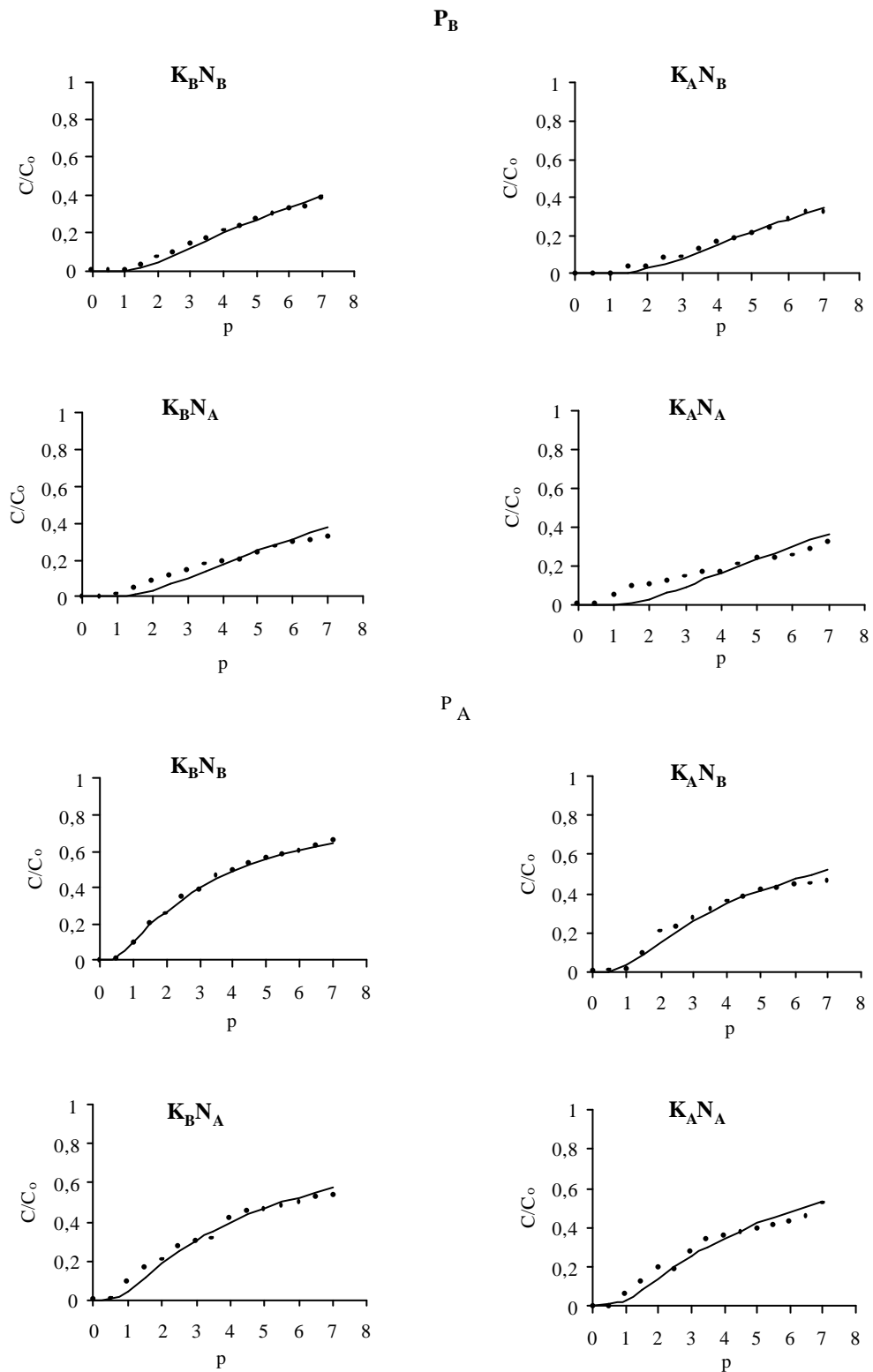
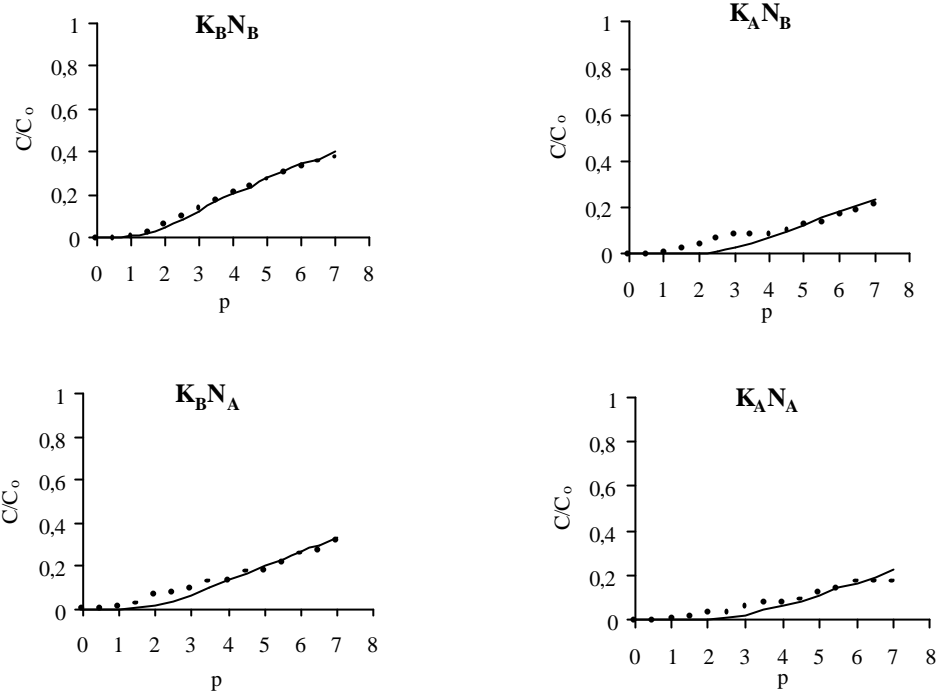


Figura 4 – Curva teórica de efluente para fosfato e pontos experimentais, considerando a concentração de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 1. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

**P<sub>B</sub>**



**P<sub>A</sub>**

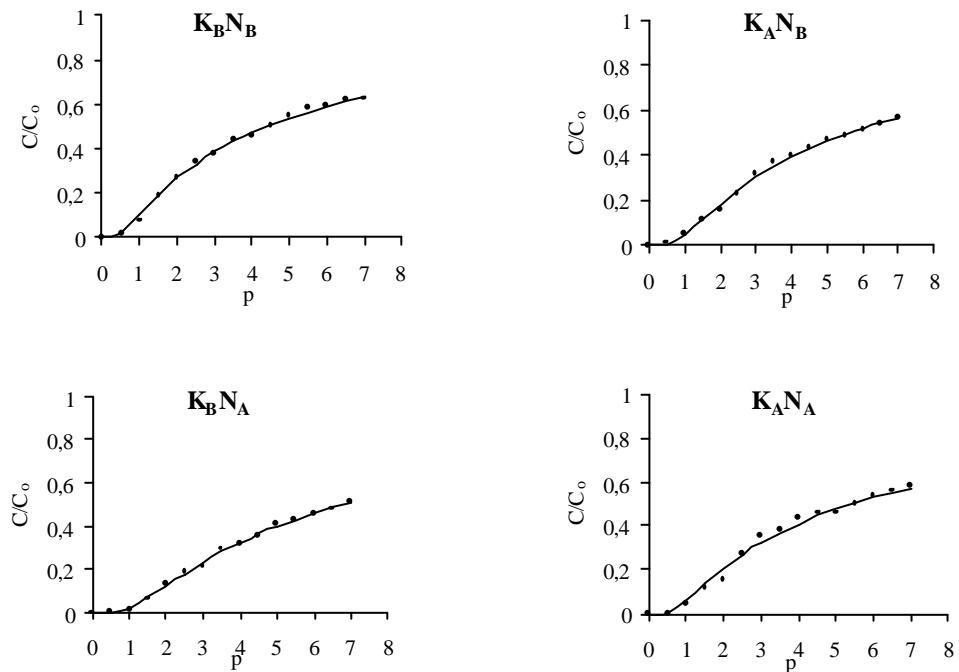


Figura 5 – Curva teórica de efluente para fosfato e pontos experimentais, considerando a concentração de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

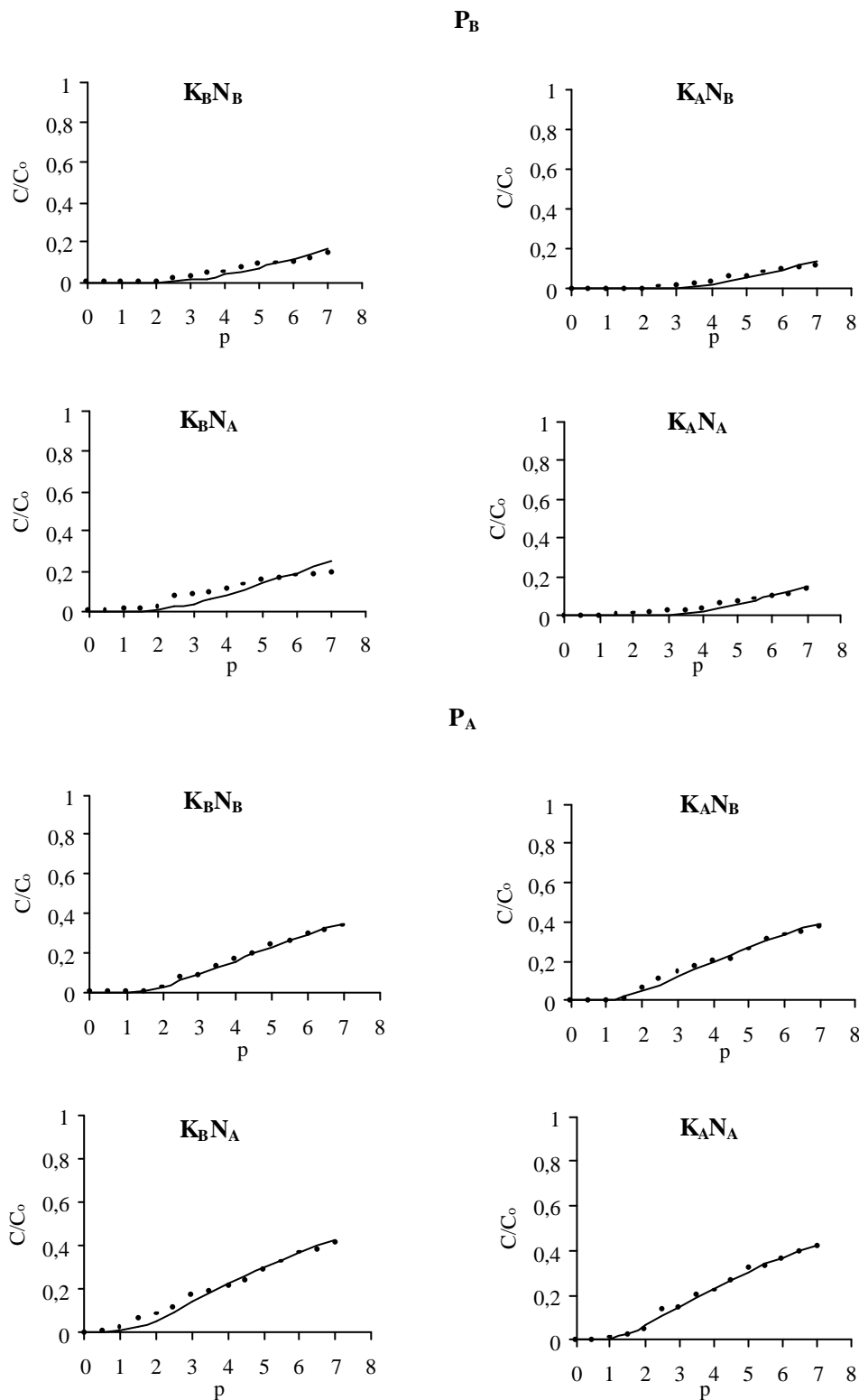
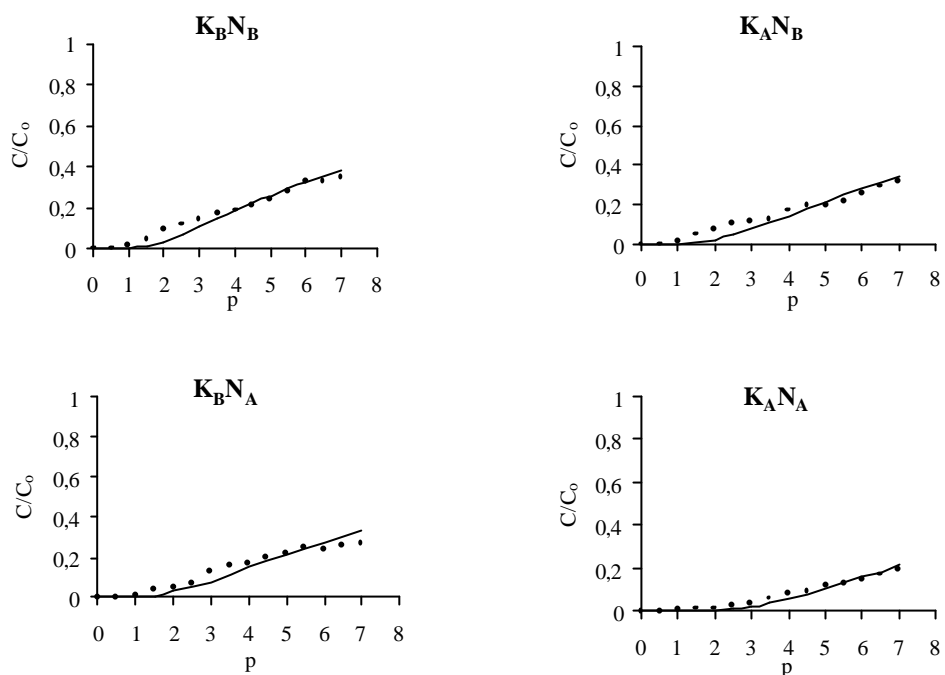


Figura 6 – Curva teórica de efluente para fosfato e pontos experimentais, considerando a concentração de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 2. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

**P<sub>B</sub>**



**P<sub>A</sub>**

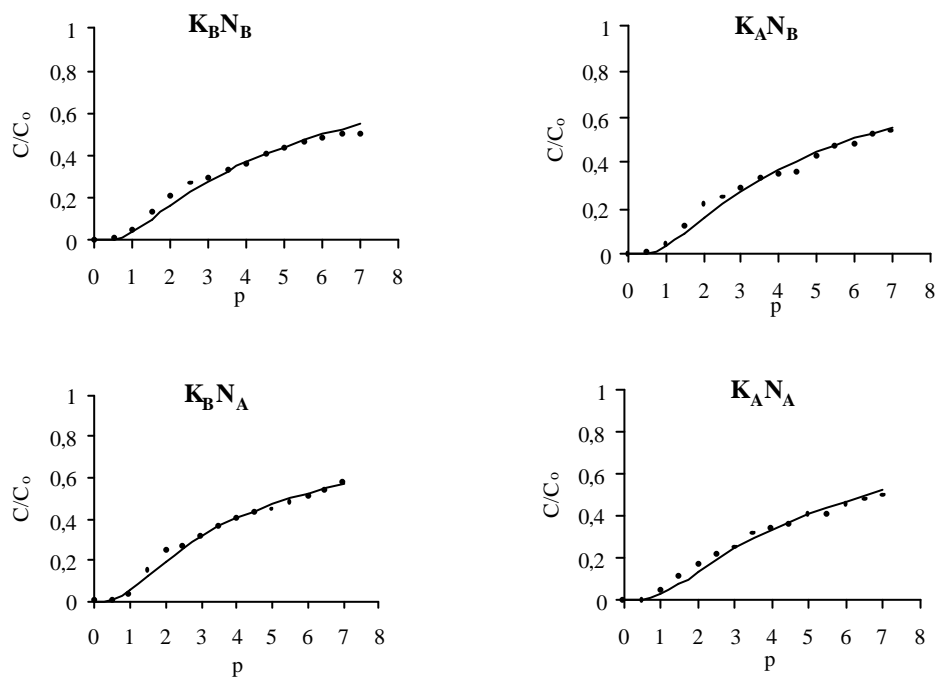


Figura 7 – Curva teórica de efluente para fosfato e pontos experimentais, considerando a concentração de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 3. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

confirmam que a magnitude do desvio para direita representa a adsorção na superfície dos colóides, a qual está relacionada com sua reatividade.

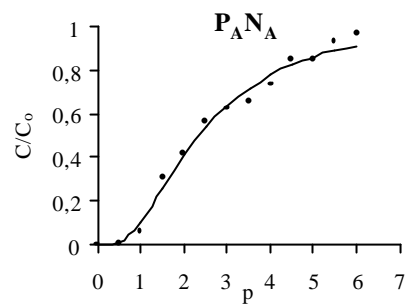
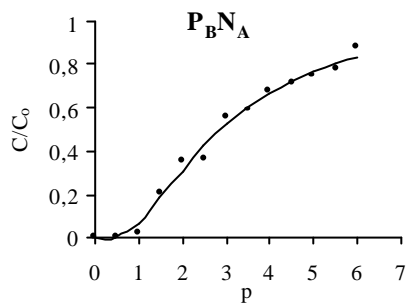
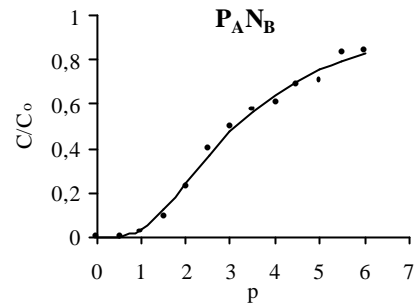
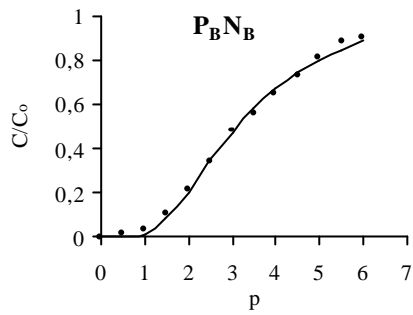
Nas curvas com menor concentração de fosfato (Figuras 4 a 7), observa-se que a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a frente de molhamento foi tão evidente que, após passados sete volumes de poros, a concentração no efluente não correspondia nem a 50% do P da solução aplicada.

O comportamento das curvas de efluente para potássio (Figuras 8 a 12), de maneira geral, assemelhou-se ao do amônio (Figuras 13 a 17). Verificam-se curvas com maior declividade e rápido aumento da relação  $C/C_0$ . Isso se deve à menor interação desses íons com os materiais de solo, em razão da baixa capacidade de troca catiônica, como já comentado anteriormente.

Nas curvas de efluente para amônio nos Latossolos (Figuras 14 a 17), observam-se curvas bastante verticalizadas, em virtude da ocorrência de pouca mistura entre a solução deslocadora e a solução deslocada, o que proporcionou o aparecimento precoce do soluto no efluente, ou seja,  $C/C_0$  diferente de zero, antes mesmo da coleta de um volume de poros.

A comparação entre a concentração relativa experimental e a estimada mostra que o modelo dispersivo-difusivo é sensível às variações no comportamento das curvas experimentais de efluente de fosfato, potássio e amônio, tornando-se um instrumento útil na previsão do deslocamento desses nutrientes nos solos estudados (Figuras 3 a 17). Nas curvas experimentais de efluente para amônio houve grande variação da  $C/C_0$  experimental, não havendo uma justificativa imediata para essa variação.

$K_B$



$K_A$

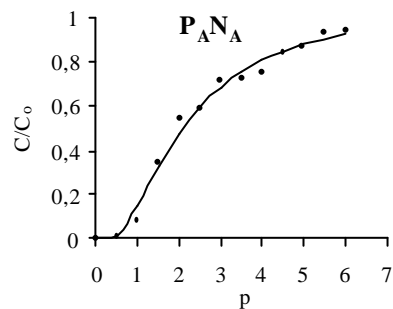
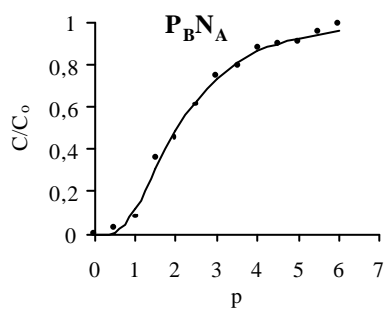
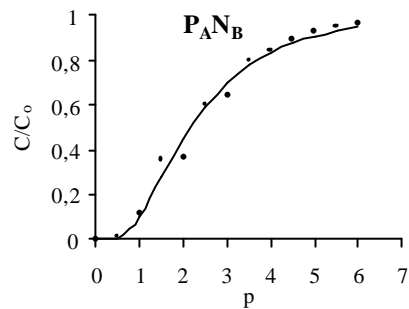
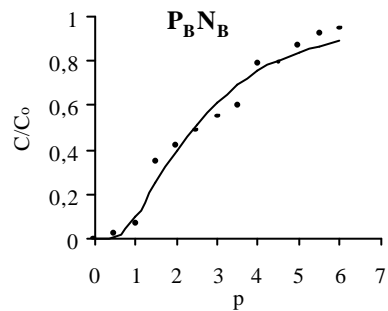
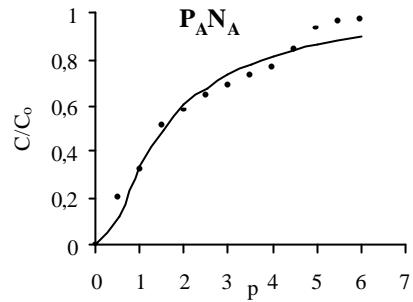
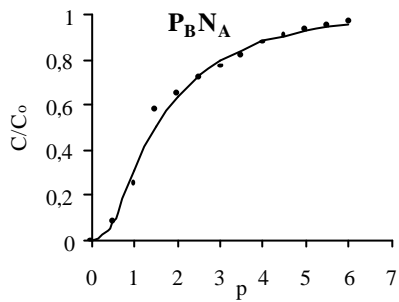
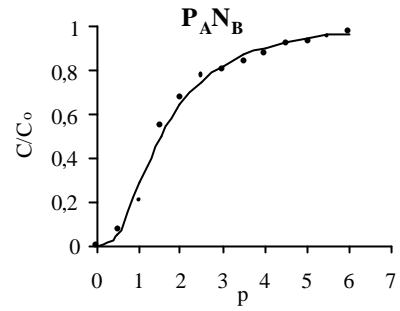
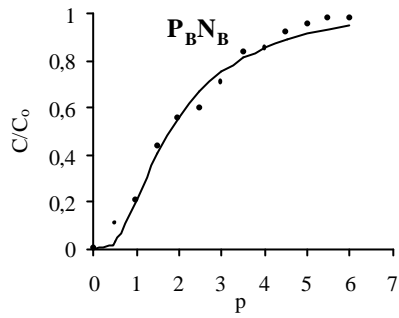


Figura 8 – Curva teórica de efluente para potássio e pontos experimentais, considerando a concentração de potássio, fosfato e amônio no fluido deslocador, em colunas do Neossolo Quartzarênico órtico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$K_B$



$K_A$

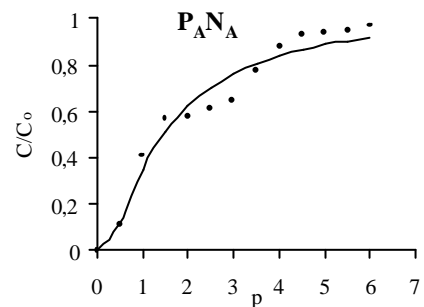
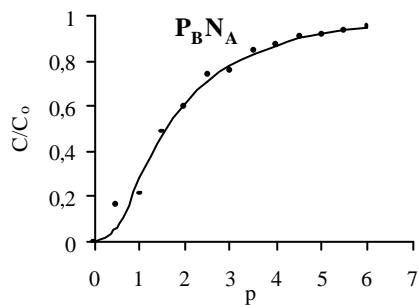
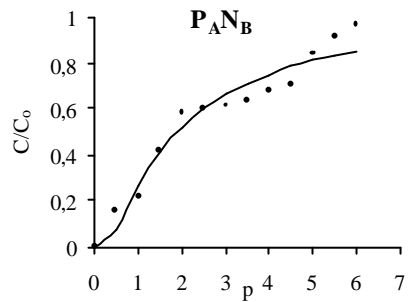
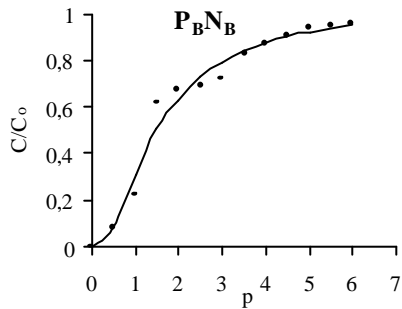
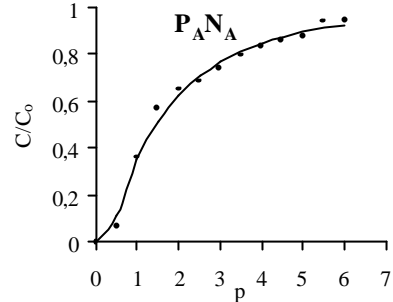
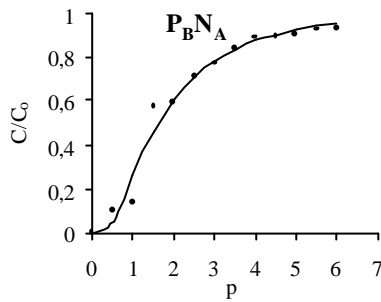
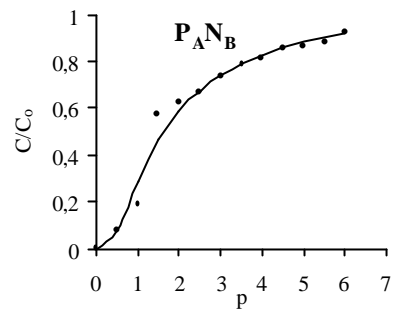
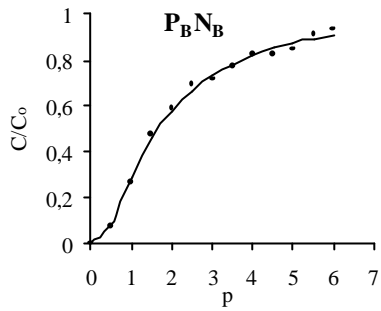


Figura 9 – Curva teórica de efluente para potássio e pontos experimentais, considerando a concentração de potássio, fosfato e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 1. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$K_B$



$K_A$

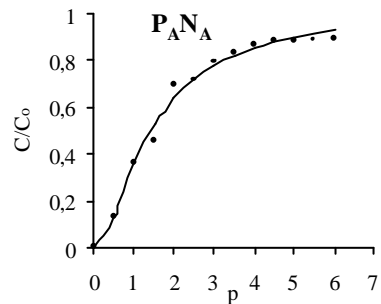
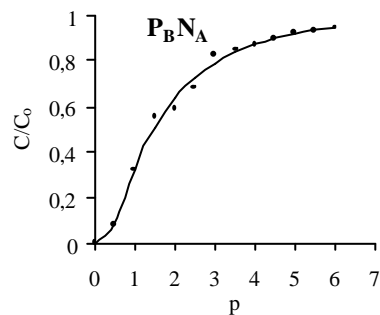
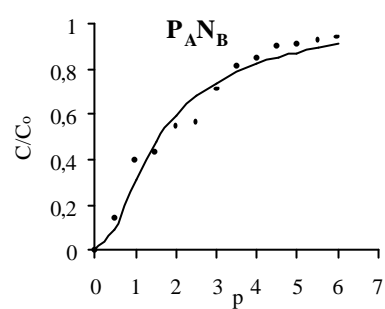
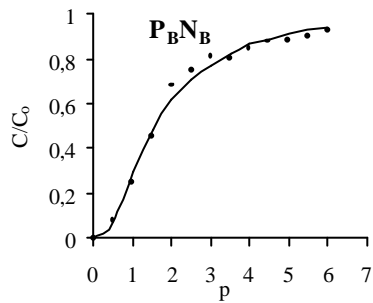
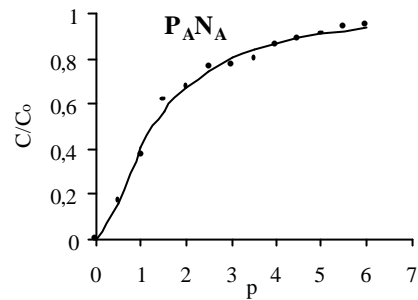
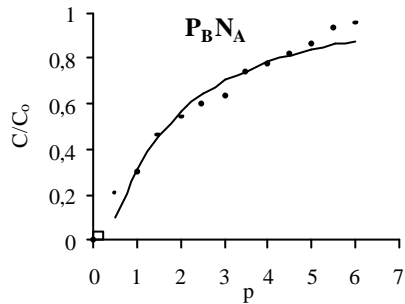
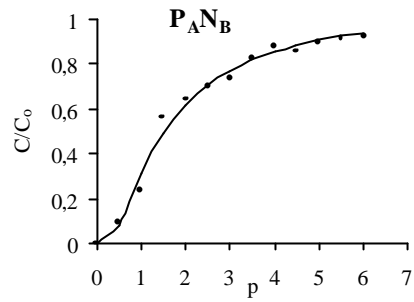
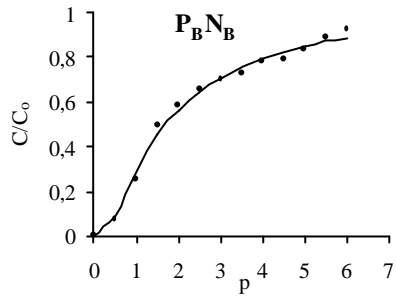


Figura 10 – Curva teórica de efluente para potássio e pontos experimentais, considerando a concentração de potássio, fosfato e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$K_B$



$K_A$

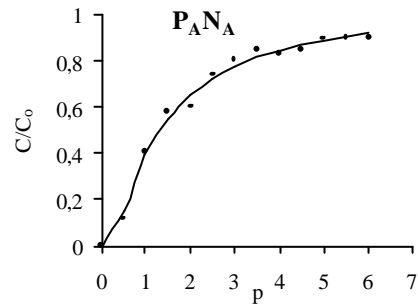
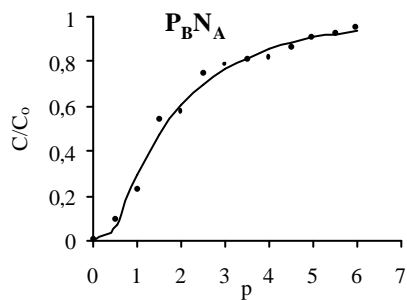
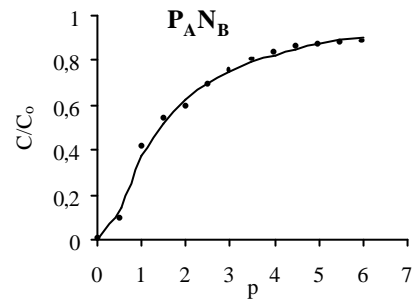
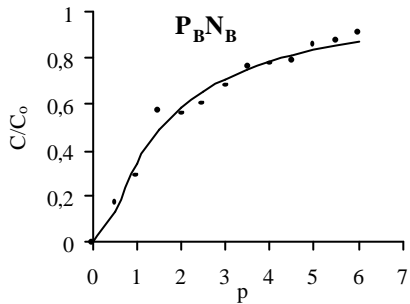


Figura 11 – Curva teórica de efluente para potássio e pontos experimentais, considerando a concentração de potássio, fosfato e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 2. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

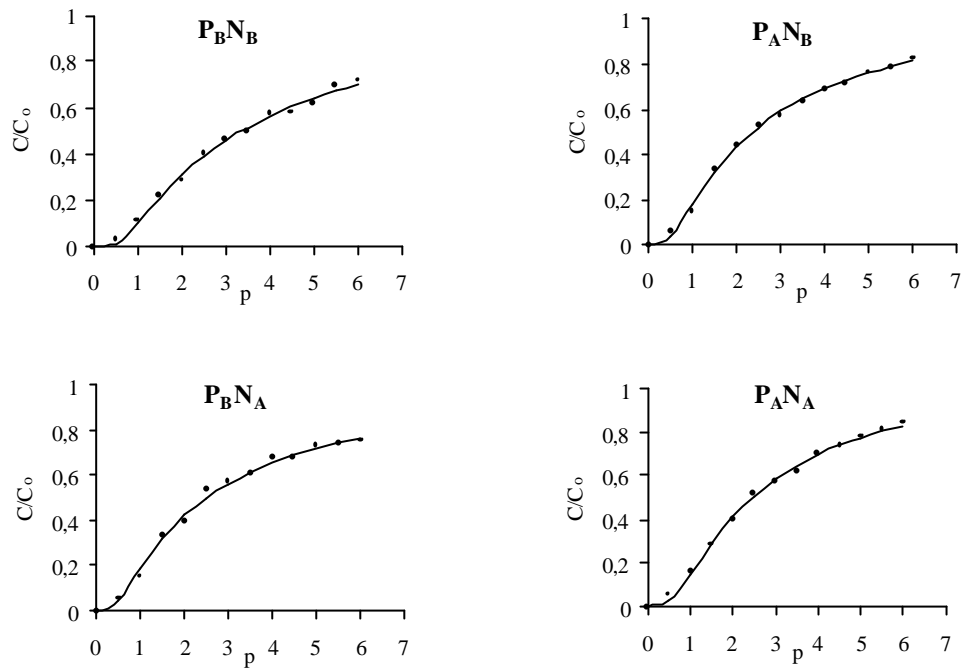
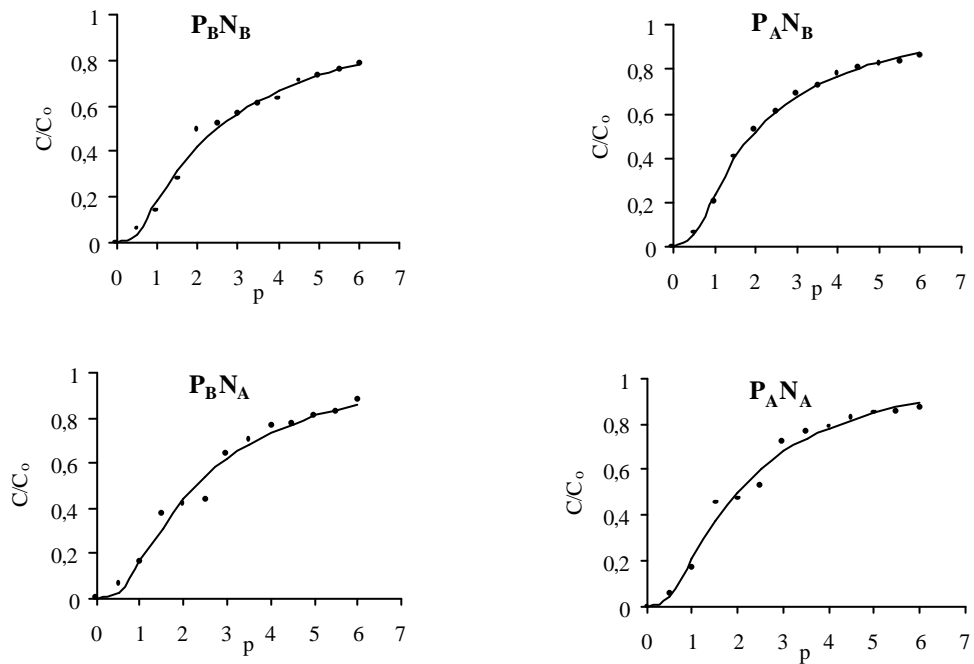
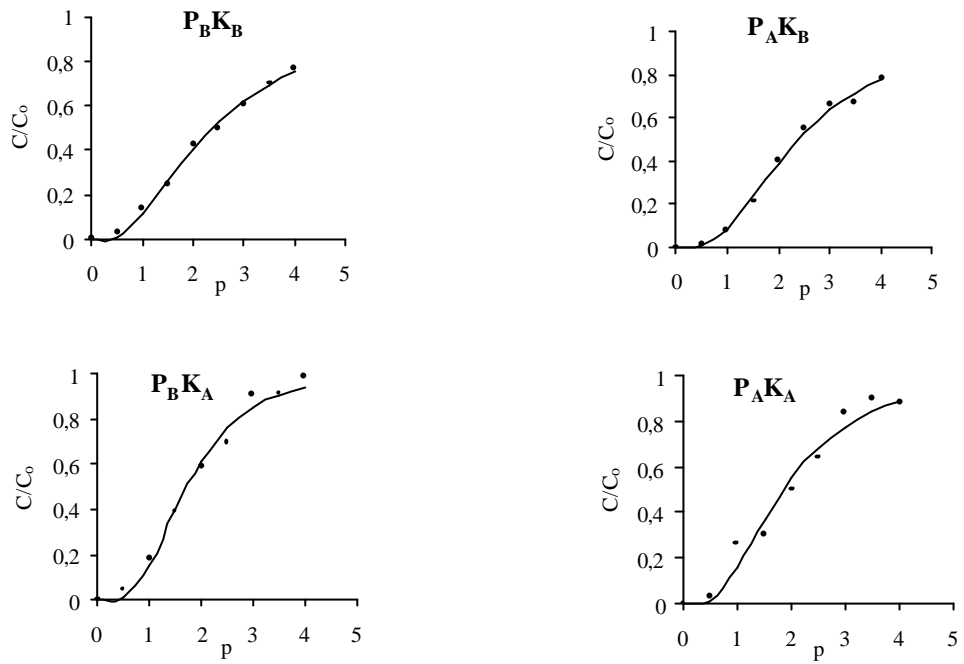
$K_B$  $K_A$ 

Figura 12 – Curva teórica de efluente para potássio e pontos experimentais, considerando a concentração de potássio, fosfato e amônio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 3. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$N_B$



$N_A$

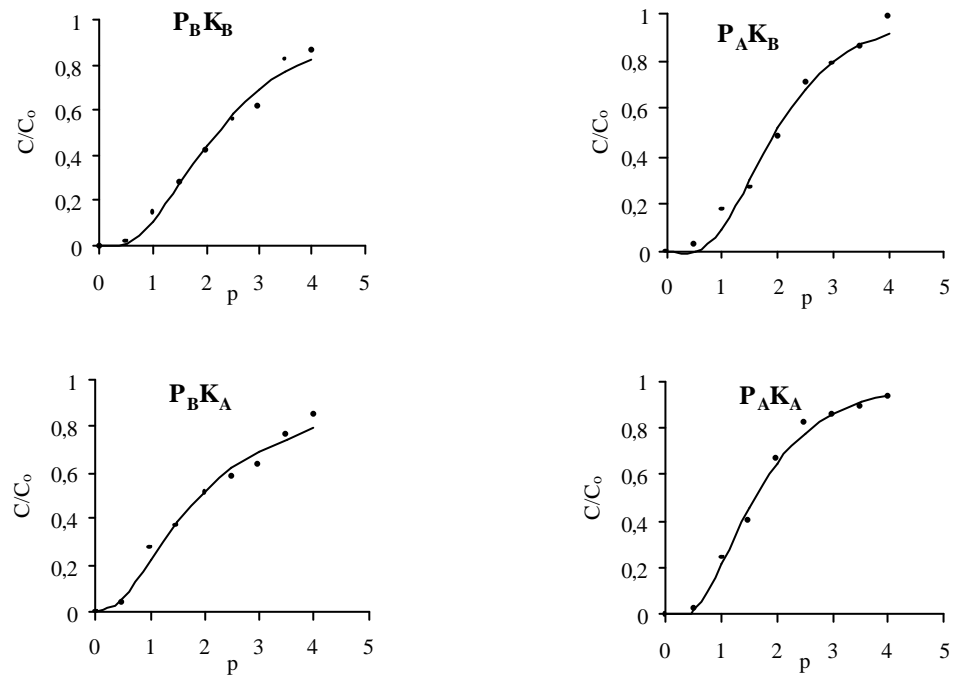


Figura 13 – Curva teórica de efluente para amônio e pontos experimentais, considerando a concentração de amônio, fosfato e potássio no fluido deslocador, em colunas do Neossolo Quartzarênico órtico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

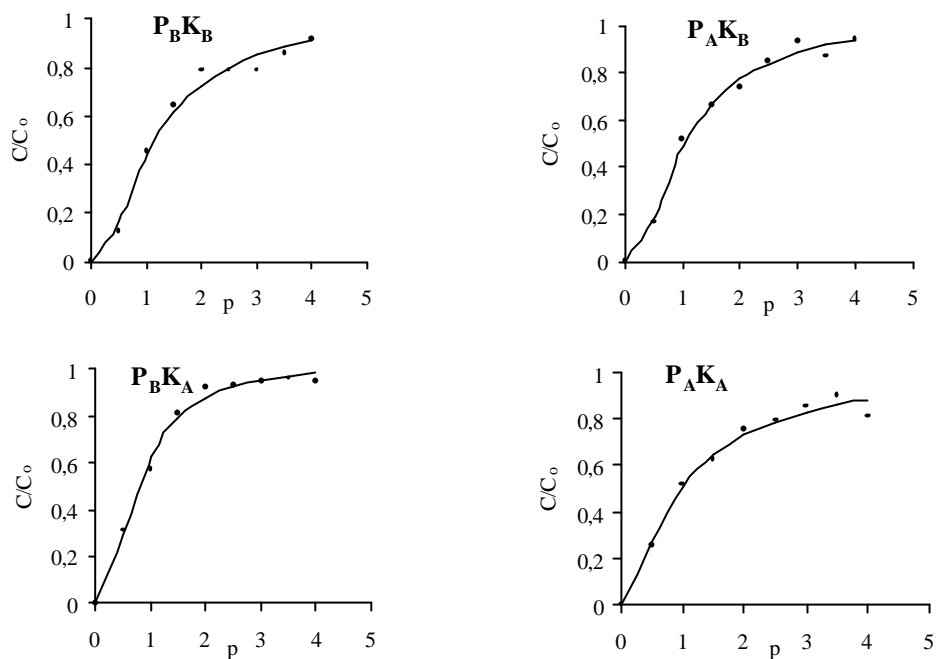
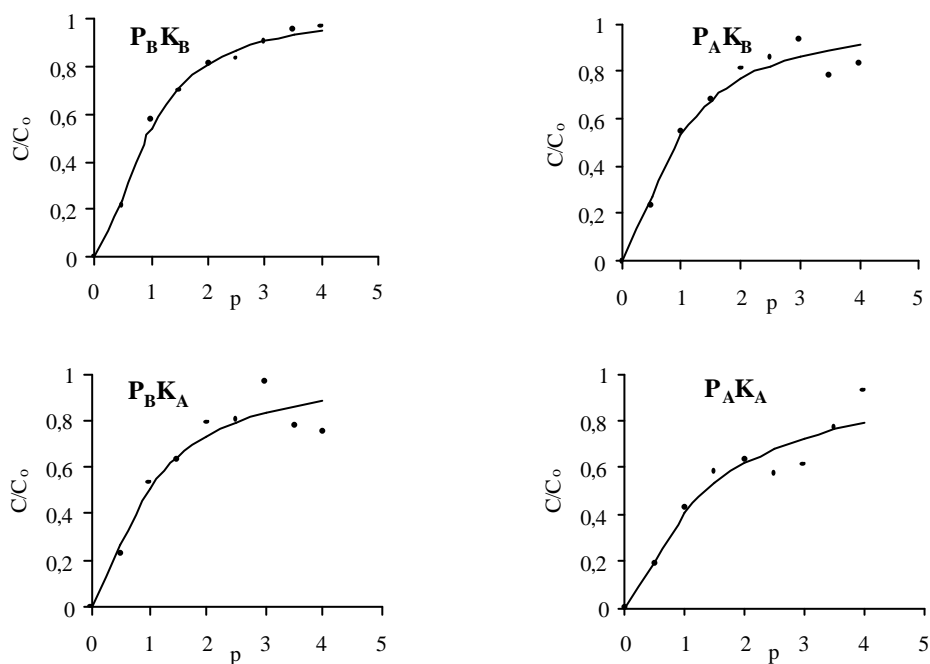
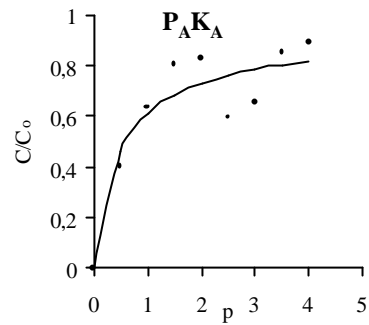
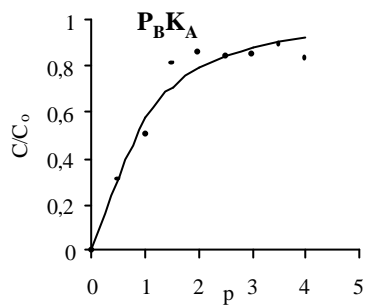
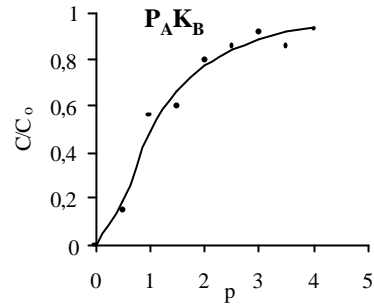
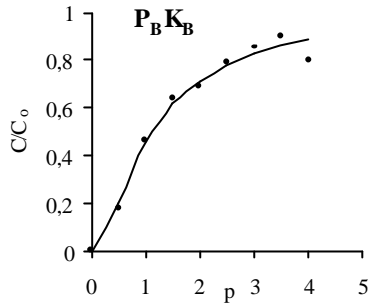
$N_B$  $N_A$ 

Figura 14 – Curva teórica de efluente para amônio e pontos experimentais, considerando a concentração de amônio, fosfato e potássio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 1. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$N_B$



$N_A$

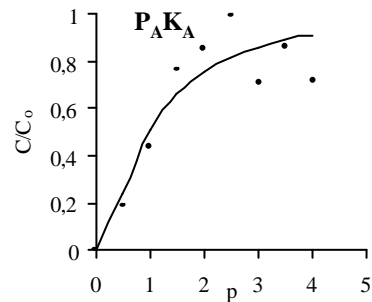
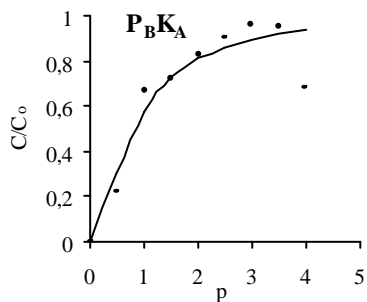
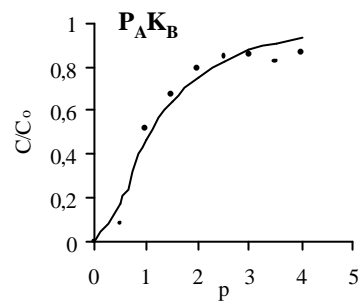
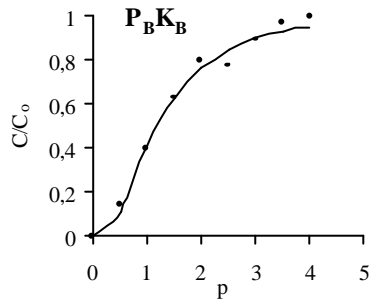


Figura 15 – Curva teórica de efluente para amônio e pontos experimentais, considerando a concentração de amônio, fosfato e potássio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

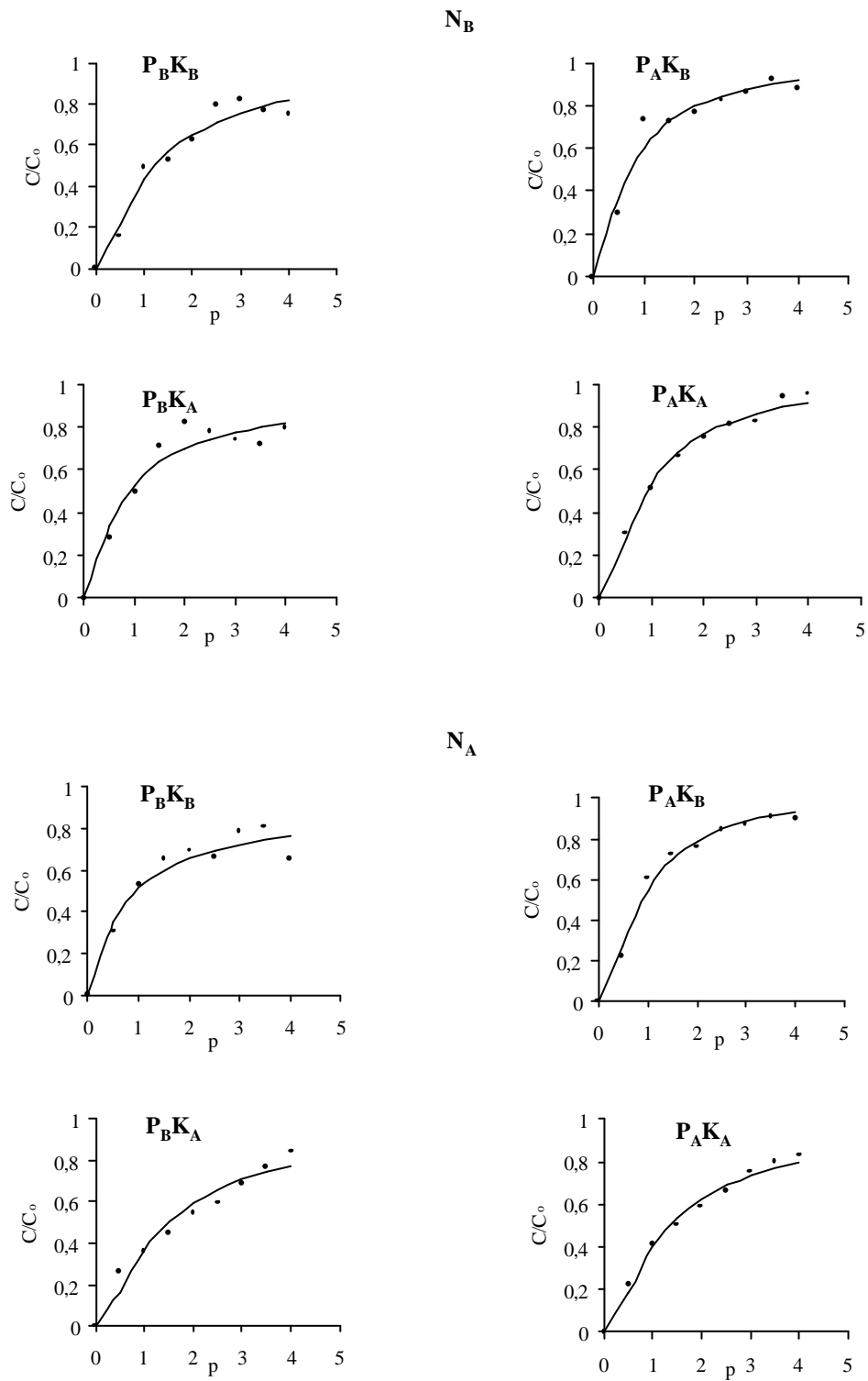
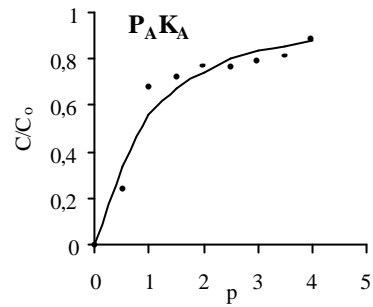
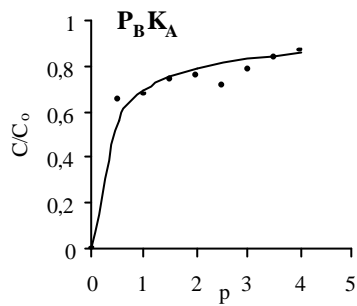
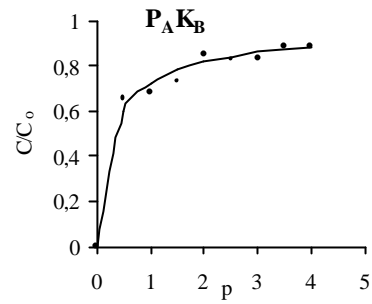
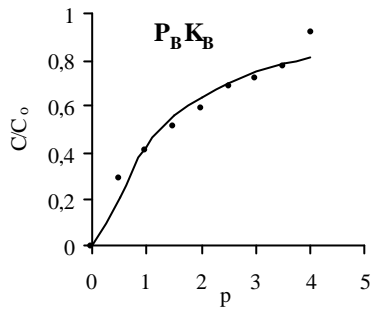


Figura 16 – Curva teórica de efluente para amônio e pontos experimentais, considerando a concentração de amônio, fosfato e potássio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 2. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

$N_B$



$N_A$

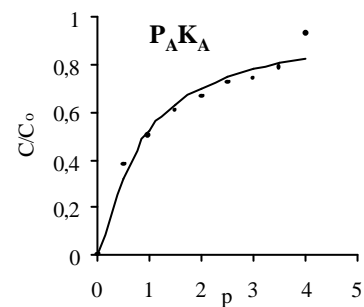
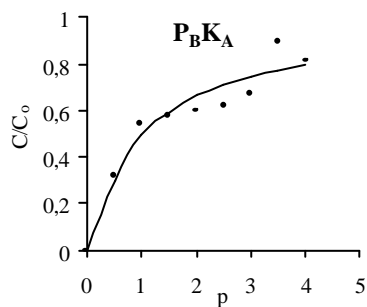
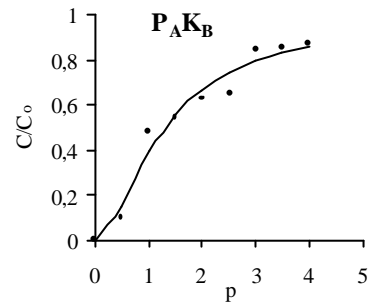
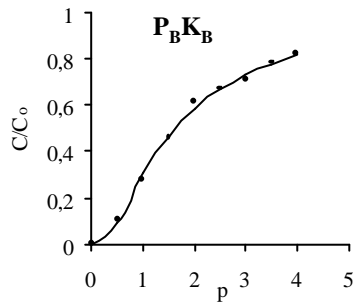


Figura 17 – Curva teórica de efluente para amônio e pontos experimentais, considerando a concentração de amônio, fosfato e potássio no fluido deslocador, em colunas do Latossolo Vermelho distrófico 3. Os subíndices B e A indicam menor e maior concentração do íon no fluido deslocador: 15 e 60 mg/L para fosfato e amônio e 75 e 300 mg/L para potássio, respectivamente.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Com o objetivo de determinar os fatores de retardamento e os coeficientes de dispersão-difusão do fosfato, potássio e amônio, quando aplicados em duas concentrações, realizou-se um experimento em laboratório utilizando colunas de percolação. Trabalhou-se com amostras de cinco solos do Estado de Minas Gerais (um Neossolo Quartzarênico órtico – RQo; três Latossolos Vermelhos distróficos – LVd1, LVd2 e LVd3; e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico – LVAd). Os solos diferenciaram-se pelo teor de argila, na ordem: RQo < LVd1 < LVAd < LVd2 < LVd3. Os tratamentos corresponderam a um fatorial  $5 \times 2^3$ , sendo cinco solos que receberam aplicações de soluções com duas concentrações de fosfato, amônio e potássio, correspondentes a 15 e 60 mg/L de P, 75 e 300 mg/L de K e 15 e 60 mg/L de N, respectivamente. Foram calculadas as concentrações relativas ( $C/C_0$ ) para cada nutriente, representando-as em função do número de volume de poros, o que permitiu obter as curvas experimentais de efluente para cada íon. As curvas teóricas foram calculadas utilizando o programa DISP, desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

Os resultados obtidos mostram que o fator de retardamento para fosfato foi menor no solo mais arenoso (RQo) e maior no mais oxidico (LVd2). A menor concentração de fosfato resultou em maiores valores do

fator de retardamento desse íon para os cinco solos estudados. No que se refere à concentração do íon acompanhante, houve relação direta entre o fator de retardamento do fosfato e a concentração de potássio para o LVd1 e LVAd. A concentração de amônio não influenciou o fator de retardamento do fosfato nos solos menos argilosos (RQo, LVd1 e LVAd). Para o LVd2, houve relação inversa entre o fator de retardamento do fosfato e a concentração de amônio. Já para o LVd3 essa relação foi direta. Esse comportamento pode ser atribuído a diferenças texturais e mineralógicas. Observaram-se valores menores dos fatores de retardamento para o potássio e para o amônio, quando comparados com os do fosfato. Nos Latossolos, os maiores valores do fator de retardamento para potássio e amônio estiveram relacionados com o incremento da fração argila, sem tendência definida quanto à concentração do íon em estudo ou do íon acompanhante. Não foi evidenciada relação nítida entre as concentrações de fosfato, potássio e amônio e os coeficientes dispersivo-difusivos desses íons nos solos estudados. O modelo dispersivo-difusivo foi sensível às variações no comportamento das curvas experimentais de efluente de fosfato, potássio e amônio, tornando-se um instrumento útil na previsão do deslocamento desses nutrientes nos solos estudados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVA, A.K. & SYVERTSEN, J.P. Soil and citrus tree nutrition are affected by salinized irrigation water. **Proc. Fla. State Hort. Soc.**, 104:135-138, 1991.
- AMARAL, G. **Características químicas e físicas de diferentes classes de solos da zona metalúrgica mineira e produtividade de eucalipto.** Viçosa: UFV, 2000. 98p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- ARAÚJO, C.A.S. **Movimento de fósforo e de macronutrientes catiônicos em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro.** Viçosa: UFV, 1997. 124p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- ARAUJO, C.A.S.; RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; SILVA, D.J. & CARVALHO, M.A. Transporte de fósforo e de potássio em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:259-268, 2000.
- BRAGA, J.M & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **R. Ceres**, 21:73-85, 1974.
- BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: CONFERÊNCIA SOBRE AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE, Viçosa, 1992. **Anais...** Viçosa, Núcleo de Estudos e Pesquisas em Meio Ambiente, 1994. p.93-100.

- BIGGAR, J.W. & NIELSEN, D.R. Miscible displacement: II. Behavior of tracers. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 26:125-128, 1962.
- CADAHIA LOPEZ, C.; EYMAR ALONSO, E. & LUCENA MAROTTA, J.J. Materiales fertilizantes utilizados en fertirrigación. In: CADAHIA LOPEZ, C., ed. **Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales**. Madrid, Mundi-Prensa, 1988. p.81-122.
- CAMPOS, T.M. & ELBACHÁ, A.T. Avaliação do fator de retardamento por adsorção no transporte de zinco em solos argilosos. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS-REGEO/91, Rio de Janeiro, 1991. Resumos expandidos. Rio de Janeiro, 1991. p.271-282.
- CARRIJO, O.A.; SILVA, W.L.C.; MAROUELLI, W.A. & SILVA, H.R. Tendências e desafios da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V., ed. **Fertirrigação: Citrus. Flores. Hortaliças**. 2.ed. Guaíba, Agropecuária, 1999. p.155-169.
- COELHO, F.C.; RUIZ, H.R.; FERREIRA, P.A.; FRANÇA, G.E.; ARAÚJO, C.A.S & DUARTE, M.A.. Transporte do amônio em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Eng. Ambiental**, 4:362-367, 2000.
- DONAGEMMA, G.K. **Pré tratamento na análise textural visando a minimização do pseudo-silte em Latossolos de Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 2000. 89p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- FERREIRA, P.A. **Qualidade de água e manejo água-planta em solos salinos**. Brasília-DF: ABEAS. Curso de engenharia e manejo de irrigação, 2001. p.64-85. (Módulo 10)
- FISCHER, J.R. **Water and nutrient requirements for drip-irrigated vegetables in humid regions**. Gainesville, University of Florida, 1992. 17p. (Boletim 363)
- FREITAS, J.A.D. **Determinação da necessidade de calagem para o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa: UFV, 1998. 99p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

- FRIZZONE, J.A & BOTREL, T.A. Aplicação de fertilizantes via água de irrigação. In: VITTI, G.C. & BOARETTO, A.E. (eds.) **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba, Potafos, 1994. p.227-260.
- KEMPERS, A.J. & ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate methods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 17:715-723, 1986.
- KIRKHAM, D. & POWERS, W.L. **Advanced soil physics**. New York, John Wiley-Interscience, 1972. 534p.
- LAPIDUS, L. & AMUNDSON, N.R. Mathematics of absorption in beds: IV. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange chromatographic columns. **J. Phys. Chem.**, 56:984-988, 1952.
- MATOS, A.T. **Fatores de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do Município de Viçosa-MG**. Viçosa: UFV, 1995. 110p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. & MARTINEZ, A.M. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do Município de Viçosa-MG. II. Correlação com algumas propriedades físicas dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. **Resumos Expandidos**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, 1995. p.2333-2336.
- NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Miscible displacement: I. Experimental information. **Soil Sci. Amer. Proc.**, 25:1-5, 1961.
- NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Miscible displacement: III. Theoretical considerations. **Soil Sci. Amer. Proc.**, 26:216-221, 1962.
- NIELSEN, D.R.; Van GENUCHTEN, M.T. & BIGGAR, J.W. Water flow and solute transport process in the unsaturated zone. **Water Resour. Res.**, 22:895-1085, 1986.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- RAMOS, V.B.N. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de zinco e cobre obtidos usando soluções mono e multiespécies**. Viçosa: UFV, 1998. 65p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

- RAO, P.S.C.; ROLSTON, D.E.; JESSUP, R.E. & DAVIDSON, J.M. Solute transport in aggregated porous media: theoretical and experimental evaluation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:1139-1146, 1980.
- SAMPAIO, R.A. **Produção, qualidade dos frutos e teores de nutrientes no solo e no pecíolo do tomateiro, em função da fertirrigação potássica e da cobertura plástica do solo.** Viçosa: UFV, 1996. 117p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- SAMPAIO, R.A.; FONTES, P.C.R.; SEDIYAMA, C.S. Resposta do tomateiro a fertirrigação potássica e a cobertura plástica do solo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 34:21-30, 1999.
- SCHULIN, R.; WIERENGA, P.J.; FLÜHLER, H. & LEUENBERGER, J. Solute transport through a stony. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 51:36-42, 1987.
- VALOCCHI, A.J. Describing the transporte of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resour. Res.**, 20:499-503, 1984.
- Van GENUCHTEN, M.T. & WIERENGA, P.J. Solute dispersion: coefficients and retardation factors. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis.** Part 1: Physical and mineralogical methods. Madison, ASA, SSSA, 1986. p.1025-1031.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE A

Quadro 1A – Análise de variância do fator de retardamento do fosfato e do amônio para os cinco solos estudados

Fonte de Variação	Fósforo		Nitrogênio	
	GL	Quadrado Médio	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	8,981242**	2	0,1083031
Solos	4	407,1404**	4	6,503783**
Tratamentos d/RQo	7	27,89116**	7	0,7533119**
Tratamentos d/LVd1	7	16,13861**	7	0,6629971*
Tratamentos d/LVAd	7	23,70784**	7	0,1167146
Tratamentos d/LVd2	7	12,80282**	7	1,683503**
Tratamentos d/LVd3	7	15,12500**	7	1,166541**
Resíduo	78	1,469207	66	0,2360464
CV (%)		8,54		20,98

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 2A – Análise de variância do fator de retardamento do potássio para os solos RQo e LVd1

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	0,1605772**
Solos	1	6,885674**
Tratamentos d/RQo	7	0,9211501**
Tratamentos d/LVd1	7	0,6213048**
Resíduo	30	0,01449941
CV (%)		4,33

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 3A – Análise de variância do fator de retardamento do potássio para os solos LVAd e LVd2

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	0,9626583**
Solos	1	0,5918517**
Tratamentos d/LVAd	7	0,08455656
Tratamentos d/LVd2	7	0,4278097**
Resíduo	30	0,07932723
CV (%)		11,37

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 4A – Análise de variância do fator de retardamento do potássio para o solo LVd3

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	3,348131**
Tratamentos	7	4,281018**
Resíduo	14	0,7708997
CV (%)		21,03

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 5A – Análise de variância do coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato para os solos RQo e LVd2

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		RQo	LVd2
Blocos	2	1664,908	0,1772170
Tratamentos	7	5275,679**	367,3882**
Resíduo	14	685,4079	17,14971
CV (%)		21,27	14,73

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 6A – Análise de variância do coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato para os solos LVd1, LVAd e LVd3

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	46,97755
Solos	2	15229,89**
Tratamentos d/LVd1	7	4840,853**
Tratamentos d/LVAd	7	2596,614**
Tratamentos d/LVd3	7	4093,352**
Resíduo	46	222,4431
CV (%)		17,71

\*\* Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 7A – Análise de variância do coeficiente dispersivo-difusivo do potássio e do amônio para os solos RQo, LVd1, LVAd e LVd2

Fonte de Variação	Potássio		Nitrogênio	
	GL	Quadrado Médio	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	679,4679**	2	329,2385
Solos	3	2292,850**	3	7595,336**
Tratamentos d/RQo	7	473,8924**	7	1339,681
Tratamentos d/LVd1	7	1058,668**	7	5547,887**
Tratamentos d/LVAd	7	191,2110**	7	839,5634
Tratamentos d/LVd2	7	119,0256*	7	3078,512**
Resíduo	62	46,18123	51	653,4412
CV (%)		16,39		43,40

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 8A – Análise de variância do coeficiente dispersivo-difusivo do potássio e do amônio para o solo LVd3

Fonte de Variação	Potássio		Nitrogênio	
	GL	Quadrado Médio	GL	Quadrado Médio
Blocos	2	1513,790**	2	5794,762**
Tratamentos	7	1134,556*	7	258436,3**
Resíduo	14	219,3496	13	2334,414
CV (%)		25,448		17,630

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.