



Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais¹



Ermelinda M. M. Oliveira², Hugo A. Ruiz³, Paulo A. Ferreira⁴,
Víctor H. Alvarez V.⁵ & João C. F. Borges Júnior⁶

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada na UFV

² UFV/DPS. CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-2632. E-mail: ermelandamota@yahoo.com.br (Foto)

³ DPS/UFV. Fone: (31) 3899-1052. E-mail: hruiuz@mail.ufv.br

⁴ DEA/UFV. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: pafonso@mail.ufv.br

⁵ DPS/UFV. Fone: (31) 3899-1061. E-mail: vaav@mail.ufv.br

⁶ UFV/DEA. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: jcborges@alunos.ufv.br

Protocolo 132 - 9/9/2002 - Aprovado em 11/2/2004

Resumo: Através deste estudo objetivou-se comparar os fatores de retardamento (R) e os coeficientes de dispersão-difusão (D) do fosfato, potássio e amônio, determinados em cinco solos de Minas Gerais (um Neossolo Quartzarênico órtico - RQo; três Latossolos Vermelhos distróficos - LVd1, LVd2 e LVd3; e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico - LVAd). O experimento foi realizado utilizando-se colunas de percolação, que receberam aplicações de uma das soluções resultantes das oito possíveis combinações de duas concentrações de fosfato, potássio e amônio (15 e 60 mg L⁻¹ de P, 75 e 300 mg L⁻¹ de K e 15 e 60 mg L⁻¹ de N). Valores menores de R para o potássio e o amônio, foram observados, quando comparados com os do fosfato. O R para fosfato foi menor no solo mais arenoso (RQo) e maior no mais oxidico (LVd2), enquanto nos Latossolos os maiores valores do R para potássio e amônio estiveram relacionados com o incremento do teor de argila, sem tendência definida quanto á concentração do íon em estudo ou do íon acompanhante. Não se evidenciou relação nítida entre as concentrações de fosfato, potássio e amônio e os D desses íons nos solos estudados.

Palavras-chave: transporte de solutos, fosforo, nitrogênio, Latossolos

Retardation factors and dispersion-diffusion coefficients of phosphate, potassium and ammonium in soils of Minas Gerais - Brazil

Abstract: The objective of this study was to compare the retardation factors (R), and dispersion-diffusion coefficients (D) of phosphate, potassium and ammonium, determined in five Brazilian soils from Minas Gerais State (Orthic Quartzarenic Neosol, RQo; three dystrophic Red Latosols, LVd1, LVd2 and LVd3; and a dystrophic Yellow-Red Latosol, LVAd). The experiment used percolation columns, applying one of the eight possible solutions resulting from the mixture of two phosphate, potassium and ammonium concentrations (15 and 60 mg L⁻¹ P, 75 and 300 mg L⁻¹ K, and 15 and 60 mgL⁻¹ N). Lower values of R were observed for potassium and ammonium compared to phosphate. The value of R for phosphate was the lowest in the most sandy soil (RQo) and highest in the most oxidic soil (LVd2). The highest Latosol values of R, calculated for potassium and ammonium, were positively related to clay content with no defined relationship for the ion concentration or the accompanying ion under study. No clear relationship was observed for the concentration of these ions in the soils studied and dispersion - diffusion coefficients.

Key words: solute transport, phosphorus, nitrogen, Latosol

INTRODUÇÃO

A aplicação conjunta de água e fertilizantes ao solo por meio da irrigação, é denominada fertirrigação. Esta técnica, quando adequadamente usada, permite maior eficiência e flexibilização

da adubação, maior economia de fertilizantes e de mão-de-obra e também maior controle na prevenção da contaminação do solo (Frizzone & Botrel, 1994).

No Brasil, a fertirrigação se tem firmado, nos últimos anos, como prática adequada, sendo empregada sobretudo no cultivo

de hortaliças e fruteiras mas, 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, condições em que 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). Por outro lado, 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, 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. Desta 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 valiosa ferramenta no estudo do transporte de nutrientes no solo. Nesses modelos, procura-se descrever o estado atual e prever o comportamento futuro do movimento dos elementos no perfil do solo, contribuindo 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 fator de retardamento e coeficiente dispersivo-difusivo, as quais expressam a maior ou menor capacidade de um soluto em se mover no solo, devem ser determinadas com exatidão (van Genuchten & Wierenga, 1986). Por estarem intimamente relacionadas com a interação solo-soluto, essas determinações são fundamentais na descrição do deslocamento de solutos no solo.

O fator retardamento 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).

O coeficiente dispersivo-difusivo, também chamado 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, através 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).

Objetivou-se, com este trabalho, determinar os fatores de retardamento e os coeficientes de dispersão-difusão do fosfato,

potássio e amônio, quando aplicados em duas concentrações, em colunas com amostras de cinco solos de diferentes texturas, do Estado de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se um experimento em laboratório utilizando-se colunas de percolação preenchidas com amostras de cinco solos do Estado de Minas Gerais, com características texturais contrastantes. As amostras foram coletadas da camada superficial (0 a 20 cm); esses materiais foram secados ao ar e passados em peneiras de 2 mm e, posteriormente, caracterizados física, química e mineralogicamente (Tabela 1).

Os tratamentos corresponderam a um fatorial 5×2^3 , com os cinco solos (um Neossolo Quartzarênico órtico - RQo; três Latossolos Vermelhos distróficos - LVd1, LVd2 e LVd3; e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico - LVAd) recebendo aplicações de soluções de fosfato ($H_2PO_4^-$), potássio e amônio com duas concentrações, correspondentes a 15 e 60 mg L⁻¹ de P, 75 e 300 mg L⁻¹ de K e 15 e 60 mg L⁻¹ de N. O delineamento experimental, em blocos casualizados, permitiu a execução seqüencial das três repetições, utilizando-se 40 colunas de cada vez.

As colunas de percolação foram construídas de segmentos de tubo de vidro, com 2,58 cm de diâmetro interno e 30 cm de comprimento, cujas as extremidades inferiores foram preenchidas

Tabela 1. Caracterização física, química e mineralógica das amostras dos cinco solos estudados

Característica*	RQo	LVd1	LVAd	LVd2	LVd3
Análise textural (g kg ⁻¹)					
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	0,020	0,080	0,100	0,170	0,130
Argila	0,110	0,340	0,470	0,510	0,750
Densidade (kg dm ⁻³)					
Solo	1,33	1,15	1,09	1,15	0,84
Partículas	2,56	2,46	2,56	2,89	2,56
Porosidade (dm ³ dm ⁻³)					
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 ⁻³)	2,1	2,3	1,5	1,3	5,4
K ⁺ (mg dm ⁻³)	15	13	24	30	69
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,53	0,07	0,08	0,61	2,76
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,09	0,05	0,05	0,16	0,51
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,50	1,20	1,20	0,10	0,30
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	2,97	7,92	5,61	5,61	9,57
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹)	0,45	2,58	1,20	1,61	3,70
Minerais da fração argila**					
	Ka	Ka	Ka	Gt	Ka
	Gb	Gb	Gb	Ka	Gt
	Gt	VHE	VHE	Gb	Hm

* Para determinação de características físicas e químicas foi utilizada metodologia da EMPRAPA (1997)

** Em proporções decrescentes. Hm: hematita, Gb: gibbsita; Gt: goethita, Ka: caulinita, VHE: vermiculita com hidróxido-entrecamadas.

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 20 cm.

Para distribuição mais homogênea do solo na coluna, utilizou-se 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 por tamanho de agregados e, também, para evitar o aparecimento de espaços livres de solo. A coluna, já preenchida, foi ligeiramente compactada; esta compactação foi realizada deixando-se a coluna cair sobre um retângulo de borracha de 2 cm de espessura, com distância de queda de aproximadamente 3 cm; a 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 contato direto com o fluido deslocador e consequente selamento do solo.

O volume de poros no interior de cada coluna (V_0 , em cm^3) para os cinco solos estudados, foi determinado pela relação:

$$V_0 = V_T f = \pi r^2 h \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (1)$$

em que:

V_T - volume total do solo na coluna (cm^3)

f - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)

r - raio interno da coluna (cm)

h - altura de solo na coluna (20 cm)

D_s - densidade do solo (g cm^{-3})

D_p - densidade das partículas (g cm^{-3}).

As colunas de solo foram saturadas de forma ascendente, com solução de CaCl_2 0,005 mol L^{-1} , 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 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^{-1}) foi calculado por meio da relação:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

em que:

Q - vazão ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$); e

A - seção transversal da coluna (cm^2).

A velocidade de avanço da solução percolante (v_f , em cm min^{-1}) para cada solo foi determinada pela relação entre q e f :

$$v_f = \frac{q}{f} \quad (3)$$

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

$$v_M = \frac{q}{M} \quad (4)$$

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-se 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.

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 do fator de retardamento (DISP)¹. As variáveis de saída foram os valores ajustados do R e D para fosfato, potássio e amônio. O programa DISP, ajusta o modelo matemático de deslocamento de fluidos miscíveis aos dados experimentais por meio da soma dos mínimos quadrados dos resíduos, Rs. O programa possui uma rotina que permite a variação dos valores de R e D continuamente, até obter as concentrações relativas estimadas, isto é:

$$R_s = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C}{C_0} (L, p) - \frac{C}{C_{0e}} (L, p) \right]^2 \quad (5)$$

em que:

n - número de observações

C/C_0 - concentração relativa dos dados experimentais

C/C_{0e} - concentração relativa estimada

L - altura de solo na coluna de solo (cm)

p - número de volume de poros.

Os resultados de R e D 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.

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 (Eq. 1). Os valores resultantes foram de 50,18 cm^3 para RQo;

¹ Paulo Afonso Ferreira e João Carlos F. Borges Júnior, UFV. Programa computacional não-publicado

55,62 cm³ para LVd1; 60,01 cm³ para LVAd; 62,93 cm³ para LVd2; e 70,15 cm³ para LVd3. Determinaram-se, ainda, a vazão, o fluxo (Eq. 2) e as velocidades de avanço das soluções percolantes, considerando-se a porosidade total (Eq. 3) e a macroporosidade (Eq. 4) (Tabela 2).

Apesar da aplicação de uma lâmina constante de solução, ocorreu variação no fluxo entre as diferentes colunas para um mesmo solo (Tabela 2). Esta 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 (Tabela 1), 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 LVd3, apesar do primeiro apresentar menor

macroporosidade, podendo ser justificado pela maior relação areia grossa/areia fina no LVd1 (2,63) (Tabela 1), o que favorece o deslocamento de volume maior de solução.

A velocidade de avanço calculada com base na macroporosidade, apresenta valores superiores quando comparada com a velocidade de avanço considerando-se a porosidade total (Tabela 2). As diferenças entre essas duas formas de cálculo se devem à relação macro/microporosidade em cada solo (Tabela 1). Quanto maior essa relação, mais próximas serão as duas velocidades de avanço. A presença de óxido de Fe e Al confere 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^{**}. Esta correlação, por sua vez, não seria esperada em solos característicos de regiões temperadas, onde o incremento de argila é acompanhado, em geral, de diminuição da macroporosidade. Esta alta correlação entre a porosidade total e a macroporosidade, sugere que a utilização dos valores de velocidade de avanço calculados com porosidade total apresentaria valores mais próximos daqueles calculados com a macroporosidade, quando os solos característicos das regiões tropicais e úmidas são comparados com solos de clima temperado.

Para passar um mesmo número de volume de poros através do perfil do solo, 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, o que pode resultar em menores valores do fator de retardamento e maior deslocamento de íons para camadas mais profundas do solo, quando considerada a mesma mineralogia e superfície específica. O fator 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 (Novais & Smith, 1999).

Os fatores de retardamento determinados para o fosfato, tendo em vista os tratamentos aplicados, encontram-se na Tabela 3. Por se tratar de uma característica que representa a capacidade do solo em reter íons, o fator retardamento depende das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação da solução no solo; assim, os maiores valores do fator retardamento do fosfato estão associados à maior interação íon-colóide e à menor velocidade de avanço.

As características dos solos influenciaram significativamente os valores do fator retardamento para o fosfato, como indicado pelos contrastes apresentados na Tabela 4. Ressalta-se 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 em um dos argilosos (LVAd) (Tabela 3). 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 (Tabelas 3 e 4), há valores diferenciados no teor de argila e também na mineralogia (Tabela 1). O LVd2 apresenta teor de argila menor, porém é mais

Tabela 2. Fluxo e velocidades de avanço calculadas com base na porosidade total e na macroporosidade, considerando-se as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

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

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

Tabela 3. Fator de retardamento do fosfato, potássio e amônio, considerando-se as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

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

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

oxidico que o LVd3; portanto, a maior presença de óxidos e a menor velocidade de avanço do LVd2 (Tabela 2) resultam em maior R para o fosfato nesse solo; além da dificuldade na dispersão do solo para análise textural entre os materiais oxidicos (Donagema, 2000) ainda permite supor que o contraste textural entre os solos LVd2 e LVd3 não seria tão pronunciado (Tabela 1).

Considerando a concentração de fosfato no fluido deslocador, verificam-se maiores valores do fator retardamento na concentração menor, em virtude da maior interação do fosfato com os sítios de adsorção (Tabelas 3 e 5). Quanto maior a concentração de fosfato no fluido deslocador, mais rapidamente os sítios de adsorção serão saturados e, conseqüentemente, a 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) (Tabelas 3 e 5). 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,

Tabela 4. Contrastes ortogonais médios do fator retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, comparando-se as médias para as soluções percolantes dos solos estudados

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

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

¹ Contrastes restritos a solos que apresentaram homogeneidade de variâncias

porém a análise estatística não indicou essa resposta para o LVd3. Pesquisa realizada por Araújo (1997) indicou presença de ílita 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 do fator retardamento do fosfato com a concentração nos três solos menos argilosos (Tabelas 1, 3 e 5); 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 características mineralógicas dos dois materiais permitem a interpretação desse comportamento (Tabela 1). O LVd2, mais oxidico, apresenta maior repulsão por cátions; assim, as maiores concentrações de amônio levam a menores valores de R para o fosfato associado. O LVd3, mais caulinitico, evidencia comportamento inverso, pela maior capacidade de troca catiônica. A maior retenção de amônio dificulta o deslocamento do fosfato.

Quando comparados com os do fosfato, observam-se valores menores dos fatores de retardamento do potássio e do amônio (Tabela 3). O caráter catiônico do potássio e do amônio e a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos estudados (Tabela 1) levam a uma interação menor 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) (Tabelas 3 e 4). Também para o potássio, o RQo apresentou maior fator de retardamento quando comparado com o LVd1 (Tabelas 3 e 4). Suponha-se que este 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: $H_2PO_4^- > K^+ > NH_4^+$. A adsorção específica do fosfato explica a maior afinidade desse íon quando comparado com o potássio e com o amônio, que apresentam adsorção não-específica; portanto, a diferença na CTC entre os

Tabela 5. Efeitos principais e interações das concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, para o fator retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, nos cinco solos estudados

Trat. (1)	Efeitos Principais e Interações						
	P	K	N	PxK	PxN	KxN	PxKxN
P _B K _B N _B	-1	-1	-1	1	1	1	1
P _B K _B N _A	-1	-1	1	1	-1	-1	1
P _B K _A N _B	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
P _B K _A N _A	-1	1	1	-1	-1	1	-1
P _A K _B N _B	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
P _A K _B N _A	1	-1	1	-1	1	-1	-1
P _A K _A N _B	1	1	-1	1	-1	-1	1
P _A K _A N _A	1	1	1	1	1	1	1
Fosfato							
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
Potássio							
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
Amônio							
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⁻¹ para fosfato e amônio e 75 e 300 mg L⁻¹ para potássio, respectivamente
*, ** Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F

solos pode ter sido mascarada pelo efeito competidor do fosfato, que ocupou proporcionalmente mais os sítios de adsorção dos Latossolos que aquele do Neossolo (RQo), possibilitando maior interação íon-colóide e, em consequência, menor fator retardamento para amônio nos Latossolos estudados; o mesmo aconteceu para o fator 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 ocorreu homogeneidade de variância para o potássio, e em todos os casos para o amônio, os maiores valores do fator retardamento estiveram associados ao incremento da fração argila, independentemente de possíveis diferenciações mineralógicas (Tabelas 1, 3 e 4). Como o fator 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 retardamento e, portanto, menor defasagem, são os mais móveis no solo. Por este raciocínio, torna-se evidente que, para os solos estudados, a seqüência de mobilidade dos nutrientes é NH₄⁺ > K⁺ > H₂PO₄⁻.

Os valores do fator retardamento do 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) (Tabelas 3 e 5). Nas amostras do RQo e do LVd3, houve diminuição no fator retardamento com o incremento da concentração do íon na solução, à semelhança do observado para o fosfato. Esta 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 valores do fator retardamento do amônio foram os menores detectados, indicando baixa interação soluto-solo (Tabela 3); isto resultou na não-apresentação de diferenças significativas, quando consideradas as concentrações do amônio no fluido deslocador (Tabela 5). 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 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.

É conveniente 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. Neste sentido, os fatores de retardamento do fosfato, do potássio e do amônio, considerando-se 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 e se 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.

Os valores dos coeficientes de dispersão-difusão (D) determinados para o fosfato, levando-se em conta os tratamentos aplicados, encontram-se na Tabela 6. Diversos fatores contribuem para o valor de D, como a velocidade de avanço e a inversa do quadrado do fator retardamento. No íon em foco, a velocidade de avanço foi fundamental, como indicado pela correlação entre os valores médios mostrados na Tabela 6 e os valores das velocidades de avanço expressos na Tabela 2. Os coeficientes de correlação linear simples foram de 0,937**, tendo em vista a porosidade total, e 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 ocorreu homogeneidade de variância para os cinco materiais, somente dois contrastes foram calculados comparando-se os solos LVd1, LVAd e LVd3 (Tabelas 6 e 7). O solo de textura média (LVd1) apresentou maiores valores de D para fosfato que os solos de textura argilosa (LVAd e LVd3) (Tabelas 6 e 7). Este 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.

Tabela 6. Coeficientes dispersivo-difusivos do fosfato, potássio e amônio, considerando-se as concentrações de fosfato, potássio e amônio no fluido deslocador, nos cinco solos estudados

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

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

Tabela 7. Contrastes ortogonais médios do coeficiente dispersivo-difusivo do fosfato, do potássio e do amônio, comparando as médias para as soluções percolantes dos solos estudados⁽¹⁾

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**
	LVAd - LVd2	-3,08
Amônio	3 RQo - LVd1 - LVAd - LVd2	-17,95**
	2 LVd1 - LVAd - LVd2	21,77**
	LVAd - LVd2	-35,34**

⁽¹⁾ Contrastes restritos a solos que apresentaram homogeneidade de variâncias.

** Significativo a 1% pelo teste F.

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-se como seção de escoamento os macroporos, 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 (Tabelas 6 e 8). Neste solo, muito arenoso, os maiores valores de D foram registrados na menor concentração de fosfato. Entende-se que a menor interação adsorvato/adsorvente leva a uma uniformidade maior 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 (Tabela 1). 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 (Tabela 8).

Quando considerados os coeficientes dispersivo-difusivos para o potássio e o amônio, não foram determinadas correlações significativas entre seus valores (Tabela 6) e as velocidades de

Tabela 8. 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

Trat. ⁽¹⁾	Efeitos Principais e Interações						
	P	K	N	PxK	PxN	KxN	PxKxN
P _B K _B N _B	-1	-1	-1	1	1	1	1
P _B K _B N _A	-1	-1	1	1	-1	-1	1
P _B K _A N _B	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
P _B K _A N _A	-1	1	1	-1	-1	1	-1
P _A K _B N _B	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
P _A K _B N _A	1	-1	1	-1	1	-1	-1
P _A K _A N _B	1	1	-1	1	-1	-1	1
P _A K _A N _A	1	1	1	1	1	1	1
Fosfato							
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
Potássio							
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
Amônio							
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**

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

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

avanço (Tabela 2). Nas análises estatísticas, diferenças entre solos não mostraram tendência definida indicada pela disparidade de sinais para os contrastes significativos (Tabela 7); tampouco houve comportamento uniforme na consideração das concentrações no fluido deslocador, que apresentaram somente alguns contrastes significativos com tendências aleatórias (Tabela 8).

CONCLUSÕES

1. O fator retardamento para fosfato, foi menor no solo mais arenoso (RQo) e maior no mais oxidico (LVd2).
2. A menor concentração de fosfato resultou em maiores valores do fator retardamento desse íon, para os cinco solos estudados.
3. Foi direta a relação entre o fator retardamento do fosfato e a concentração de potássio para o LVd1 e LVAd. A concentração de amônio não influenciou o fator retardamento do fosfato nos solos menos argilosos (RQo, LVd1 e LVAd).
4. Nos Latossolos, os maiores valores dos fatores retardamento do potássio e do amônio estiveram relacionados ao incremento da fração argila, sem tendência definida quanto à concentração do íon em estudo ou do íon acompanhante.
5. Não se evidenciou relação nítida entre as concentrações de fosfato, potássio e amônio e os coeficientes dispersivo-difusivos desses íons, nos solos estudados.

LITERATURA CITADA

- Alva, A.K.; Syvertsen, J.P. Soil and citrus tree nutrition are affected by salinized irrigation water. *Soil Science Society of América Journal*, Madison, v.104, p.135-138, 1991.
- Araújo, C.A.S. Movimento de fósforo e de macronutrientes catiônicos em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro. Viçosa: UFV, 1997. 124p. Tese Doutorado
- Bernardo, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: Conferência sobre Agricultura e Meio Ambiente, 1992, Viçosa. Anais... Viçosa: Núcleo de Estudos e Pesquisas em Meio Ambiente, 1994. p.93-100.
- Braga, J.M.; Defelipo, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *Revista Ceres*, Viçosa, v.21, p.73-85, 1974.
- 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 retardamento por adsorção no transporte de zinco em solos argilosos. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, 1991, Rio de Janeiro. 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*. Guaíba: Agropecuária, 1999. p.155-169.
- 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
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Fischer, J.R. Water and nutrient requirements for drip-irrigated vegetables in humid regions. Gainesville: University of Florida, 1992. 17p. Boletim 363
- 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. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.17, p.715-723, 1986.
- 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
- 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, 1995, Viçosa. Resumos Expandidos... Viçosa: SBCS, 1995. p.2333-2336.
- Nielsen, D.R.; van Genuchten, M.T.; Biggar, J.W. Water flow and solute transport process in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.9, p.89s-108s, 1986.
- Novais, R.F.; Smith, T.J. Fósforo em solo e planta sob condições tropicais. Viçosa: UFV, 1999. 399p
- 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
- Sampaio, R.A.; Fontes, P.C.R.; Sediyaama, C.S. Resposta do tomateiro à fertirrigação potássica e à cobertura plástica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, p.21-30, 1999.
- Valocchi, A.J. Describing the transporte of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. *Water Resources Research*, Washington, v.20, p.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.