



Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo

Antonio T. de Matos¹, Helder A. de A. Gariglio² & Paola A. V. Lo Monaco³

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o fator de retardamento, o coeficiente de dispersão-difusão e as curvas de efluente dos íons cálcio, magnésio e potássio presentes na vinhaça, realizou-se um experimento em laboratório com colunas dos solos Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd). As colunas foram interligadas a frascos de Mariotte contendo água destilada e, em seguida, a frascos contendo água residuária. As concentrações relativas às amostras do efluente, correspondentes aos respectivos volumes de poros, foram utilizadas a fim de se obter as curvas experimentais de efluente para o potássio, cálcio e magnésio. Utilizou-se o programa Disp 1.1 para, a partir dos dados das curvas de efluente, obter os valores dos fatores de retardamento (fR) e os coeficientes de dispersão-difusão (D) para os íons. Os maiores valores de fR foram obtidos para o potássio no LVd, seguido do cálcio no LVAd e por último o potássio no LVAd. Os menores valores de fR e de D para todos os íons avaliados foram obtidos no LVef. O magnésio apresentou os menores valores de fR e D , nos três solos avaliados.

Palavras-chave: água residuária, fator de retardamento, coeficientes de dispersão-difusão

Miscible displacement of cations from vinasse in soil columns

ABSTRACT

In order to evaluate the retardation factor, dispersion coefficient and diffusion-effluent curves of calcium, magnesium and potassium present in the vinasse, a laboratory experiment was conducted in soil columns of typical Distrophic Red Latosol (LVd), typical Eutroferric Red Latosol (LVef) and typical Distrophic Yellow Red Latosol (LVAd). The columns were connected to the Mariotte bottle containing distilled water and then the vials containing wastewater. The relative concentrations of the samples of the effluent corresponding to the respective pore volumes were used to obtain the experimental curves of the effluent for potassium, calcium and magnesium. To obtain the retardation factors (fR) and dispersion-diffusion coefficients (D) for the ions, the data of the effluent curves and the Disp 1.1 program were used. The highest values of fR were obtained for potassium in LVd, followed by calcium in the LVAd and lastly, the potassium in the LVAd. The lowest fR and D values for all studied ions were obtained in LVef. Magnesium showed the lowest values of fR and D in the three evaluated soils.

Key words: wastewater, retardation factor, dispersion-diffusion coefficients

¹ DEA/UFV. Av. PH Rolfs, s/n, Campus da UFV, CEP 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1886. E-mail: atmatos@ufv.br

² FEAM/GPROD. Av. Prefeito Américo Gianetti, s/n, 1º andar – Bairro Serra Verde, CEP 31630-900, Belo Horizonte, MG. Fone: (31) 3915-1465. E-mail: helder.gariglio@meioambiente.mg.gov.br

³ IFES. Rod. ES 080, km 21 – São João de Petrópolis, Campus Santa Teresa, CEP 29650-000, Santa Teresa, ES. Fone: (27) 3259-7878. E-mail: paolalm@ifes.edu.br

INTRODUÇÃO

A preocupação com os impactos ambientais cresce sempre que os resíduos agroindustriais são utilizados na agricultura como forma de compatibilizar sua destinação final com as necessidades de fertilizantes das culturas e a economia obtida em substituição aos adubos convencionais. Dentre as diversas águas residuárias aplicadas ao solo a vinhaça se destaca como principal efluente líquido gerado na fabricação de álcool e aguardente, nas indústrias sucroalcooleiras.

A vinhaça apresenta vários atributos favoráveis, do ponto de vista do uso agrícola, tais como o aumento de matéria orgânica no solo (Barros et al., 2010) e da capacidade de troca catiônica (Silva et al., 2007) além de ser fonte de nutrientes às plantas (Bebé et al., 2009; Barros et al., 2010; Zolin et al., 2011). No entanto, por ser uma água residuária rica em potássio (Silva et al., 2007) quando aplicada sem critérios técnicos, desconhecendo-se a capacidade de sua assimilação pelos diferentes tipos de solo, pode aumentar a probabilidade de lixiviação de íons, de forma a contaminar as águas subterrâneas quando em concentrações elevadas. Além disto, pode promover a dispersão de partículas do solo, com redução da sua taxa de infiltração de água e elevação do escoamento superficial, com possível contaminação de águas superficiais. Assim, Anami et al. (2008) ressaltaram que o conhecimento da dinâmica da água e solutos no solo em condições de não saturação, é importante para a proposição de técnicas e medidas que, além de ganhos econômicos, possam viabilizar a exploração racional e a preservação dos recursos hídricos.

A mobilidade dos íons no solo pode ser avaliada por meio de técnicas baseadas em deslocamento de fluidos miscíveis e recursos computacionais. Os modelos físico-matemáticos podem ser ajustados a dados experimentais oriundos de ensaios de lixiviação e eluição de íons em colunas de solo, em campo ou no laboratório, por meio de programas computacionais, tais como o Disp-1.1, desenvolvido por Borges Júnior & Ferreira (2006). Tais modelos se constituem em ferramentas poderosas por possibilitarem a caracterização da mobilidade dos solutos no solo com base na dispersão, difusão e retardamento dos solutos em relação ao avanço da interface entre o líquido deslocador e o deslocado.

O fator de retardamento expressa a capacidade do solo reter os solutos à medida em que o fluxo de massa avança e depende das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação (Melo et al., 2006).

O coeficiente dispersivo-difusivo traduz o efeito aditivo de dois fenômenos de mistura, ou seja, a difusão, que é um processo espontâneo que resulta do movimento térmico dos íons e moléculas em solução, e a dispersão, que decorre do movimento diferenciado de solutos no solo, proporcionado por variações na velocidade de deslocamento da solução dentro dos poros individuais e entre poros de diferentes formas, tamanhos e direções (Ferreira et al., 2006).

A importância do estudo do transporte de solutos no solo reside no fato de que, a partir do conhecimento das propriedades e das interações de determinada substância química com o meio e de sua movimentação e persistência no solo, é possível se prever os riscos de contaminação e os impactos que ela possa causar ao meio ambiente (Costa et al., 1999).

Alguns trabalhos vêm reportando o deslocamento de cátions provenientes de diversos tipos de água residuária, tais como as domésticas (Santos et al., 2010), as de suinocultura (Santos et al., 2010), do processamento dos frutos do cafeeiro (Ferreira et al., 2006), águas residuárias da mandioca (Melo et al., 2006) e até mesmo da vinhaça (Silva et al., 2012); este último, no entanto, apenas em colunas de Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe). Em razão da escassez de informações a respeito do deslocamento desses cátions em colunas constituídas por diferentes tipos de Latossolos, classe comumente encontrada em áreas de aplicação de vinhaça, no estado de Minas Gerais objetivou-se, com a realização deste trabalho, obter as curvas de efluente e a partir delas os fatores de retardamento e os coeficientes de dispersão-difusão dos íons cálcio, magnésio e potássio em colunas de solos, quando submetidas à aplicação da vinhaça.

MATERIAL E MÉTODOS

A vinhaça utilizada no experimento foi coletada em outubro de 2007, na Companhia Agrícola Pontenovense, localizada no município de Urucânia-MG, coordenadas 20°18'4,8" Latitude Sul e 42°41'23,8" Longitude Oeste. As amostras foram coletadas na unidade de produção de açúcar e álcool, após passagem pelo sistema de resfriamento, a uma temperatura de 60 °C.

A caracterização da vinhaça (Tabela 1) foi realizada no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) tendo sido determinadas as seguintes características: condutividade elétrica (CE), utilizando-se um condutivímetro; pH com água destilada na proporção 1:2,5, utilizando-se um peagômetro; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pelo método de Winkler, Demanda Química de Oxigênio (DQO), em condensador, pelo método do refluxo aberto; potássio e sódio por fotometria de emissão de chama; cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica; sólidos totais, após secagem, em estufa, a 103-105 °C; sólidos fixos totais, após combustão em mufla, a 550-600 °C; sólidos voláteis totais, mediante a diferença entre os totais e os fixos; todas as análises foram efetuadas de acordo com o que está estabelecido no Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2005), à exceção do nitrogênio total cuja quantificação foi realizada utilizando-se o método de Kjeldahl com a adição de ácido salicílico (Matos, 2012).

Amostras de Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Eutrófico (LVef) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) foram coletadas na camada de 0-20 cm, nos municípios de Capinópolis (LVd e LVef) e Viçosa

Tabela 1. Características da vinhaça utilizada no experimento

CE	pH	DBO	DQO	ST	SV	N	K	Ca	Mg
dS m ⁻¹									
mg L ⁻¹									
9,0	3,8	16.769	28.572	31.522	21.443	733	2.484	1.340	473

DBO - demanda bioquímica de oxigênio; DQO - demanda química de oxigênio; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis totais

(LVAd); sua caracterização física-química foi realizada nos Laboratórios de Solo e Resíduos Sólidos do DEA e Física do Solo do Departamento de Solos da UFV (Tabela 2).

Tabela 2. Características físicas e químicas dos solos* utilizados no experimento

Características	LVAd	LVd	LVef
Areia grossa (dag kg ⁻¹)	27	24	4
Areia fina (dag kg ⁻¹)	14	43	7
Silte (dag kg ⁻¹)	7	7	29
Argila (dag kg ⁻¹)	52	26	60
Classe textural	Argila	Franco-Argilo- -Arenosa	Muito Argilosa
Densidade do solo (g cm ⁻³)	0,95	1,32	1,18
Densidade de partículas (g cm ⁻³)	2,36	2,43	2,40
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	0,08	0,12	0,07
Capacidade de Campo (%)	37,72	17,36	41,97
Argila dispersa em água (%)	14,67	3,33	10,00
pH _{H₂O}	5,20	6,10	6,20
pH _{KCl}	3,89	4,69	5,45
MO (dag kg ⁻¹)	6,04	4,13	4,04
N-total (dag kg ⁻¹)	0,20	0,09	0,13
K disponível (mg dm ⁻³)	41,20	107,50	175,30
Na disponível (mg dm ⁻³)	4,00	4,00	2,80
Ca+Mg trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	0,32	3,78	6,30
Al ³⁺ trocável (cmol _c dm ⁻³)	1,51	0,31	0,09
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,85	2,47	5,01
CTC _{E1} (cmol _c dm ⁻³)	1,98	4,38	6,80
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	9,31	6,54	11,71

*LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVd - Latossolo Vermelho Distrófico; LVef - Latossolo Vermelho Eutrófico; pH_{H₂O} - 1N (1:2,5); MO (Walkley-Black); N por digestão Kjeldahl; Na⁺ e K⁺ extraído por Mehlich¹; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ extraídos por KCl 1 mol L⁻¹; H+Al extraído por acetato de Ca 0,5 mol L⁻¹- pH7

Os solos foram secados ao ar, destorroados, passados em peneira de malha 2 mm; foram incluídos, em sua caracterização física, teor de água, obtido em mesa de tensão a 0,01 MPa; massa específica do solo, pelo método da proveta; massa específica de partículas, pelo método do balão volumétrico, análise granulométrica e argila dispersa em água (AD), pelo método da pipeta, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997) porém com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16 h (Ruiz, 2005). Obteve-se o conteúdo de água retida na capacidade de campo (CC) em mesa de tensão, a 0,01 MPa.

As análises químicas compreenderam a medição do pH em água e KCl; quantificação das concentrações de potássio e sódio disponíveis, com extrator de Mehlich-1 e determinação por fotometria de chama; cálcio e magnésio trocáveis por extração com KCl 1 mol L⁻¹; acidez trocável por titulação utilizando-se, como solução extratora, o KCl 1 mol L⁻¹ e acidez potencial, igualmente por titulação, com extração por extrator de Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997). As capacidades de troca catiônica efetiva e potencial foram determinadas pela soma de bases (SB) mais acidez trocável e SB mais acidez potencial, respectivamente. A concentração de nitrogênio total e o conteúdo de matéria orgânica foram obtidos utilizando-se o método Kjeldahl modificado (Matos, 2012).

O experimento constou de ensaio em colunas de solo contidas em segmentos de tubo de PVC rígido, de 20 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro, preenchidas com as três classes de solo previamente passados em peneira de 2 mm.

Os segmentos de tubo de PVC tiveram a superfície lateral interna revestida com material arenoso impregnado na cola de

PVC comercial que foi aplicada na superfície lateral interna dos tubos, com o objetivo de se evitar caminhos preferenciais para o efluente. O preenchimento das colunas foi realizado de forma gradativa adicionando-se pequenas porções de solos por meio de funil, deixando-se 5 cm de borda livre nas colunas, ficando cada coluna de solo com 15 cm de espessura.

Para cada coluna foram determinadas as características físico-hídricas: volume de poros, fluxo e velocidade de avanço. O volume de poros de cada coluna (VP) foi determinado utilizando-se a Eq. 1:

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

em que:

- r - raio da coluna, cm
- h - comprimento da coluna, cm
- D_s - densidade do solo, g cm⁻³
- D_p - densidade das partículas, g cm⁻³

O fluxo de água e solutos em cada coluna foi calculado utilizando-se a Eq. 2:

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

em que:

- q - fluxo, cm h⁻¹
- Q - vazão, cm³ h⁻¹
- A - seção transversal da coluna, cm²
- V_e - volume total de efluente, cm³
- T - intervalo de tempo para coletar o volume V_e

A velocidade de avanço da solução percolante para cada solo foi definida por meio da Eq. 3:

$$V_f = \frac{q}{P} \quad (3)$$

em que:

- V_f - velocidade de avanço, cm h⁻¹
- q - fluxo, em cm min⁻¹
- P - porosidade total, em cm³ cm⁻³

Com vista a se evitar distúrbios superficiais quando da aplicação da vinhaça e proporcionar uma infiltração uniforme, a superfície do solo foi coberta com uma lâmina fina (cerca de 2 mm de espessura) de lã de vidro; lâmina idêntica foi colocada sobre a tela, na base da coluna, para se evitar perdas de solo.

Os solos acondicionados nas colunas foram saturados ficando as colunas imersas durante quatro dias em água até dois terços da espessura; findo este período as colunas, sendo três repetições para cada classe de solo, foram interligadas a frascos de Mariotte contendo vinhaça.

Para eliminação de bolhas de ar e início do escoamento em meio saturado, aplicou-se água destilada em todas as colunas até que o sistema atingisse condição de escoamento

permanente. Posteriormente, interrompeu-se a aplicação da água e após a infiltração completa da lâmina de água, as colunas foram interligadas aos frascos de Mariotte para aplicação da vinhaça. O efluente obtido foi recolhido em recipientes de 100 mL os quais foram posicionados na base das colunas e acondicionados em frascos plásticos para a realização das análises das concentrações de potássio, cálcio e magnésio. No início as coletas ocorreram a cada 0,2 VP; posteriormente, essa coleta foi realizada a cada 0,3, depois 0,5 e finalmente a cada 1,0 VP. O total de efluente coletado variou de 1,0 a 5,5 VP, dependendo da classe de solo.

Para o cálculo dos parâmetros das equações de transporte dispersivo-difusivo de solutos no solo (Eq. 4) utilizando-se as condições iniciais e de contorno adequadas, utilizou-se o programa computacional Disp-1.1 (Borges Júnior & Ferreira, 2006).

$$\frac{\delta}{\delta_t}(\theta C_r + \rho S) = -\frac{\delta}{\delta_x} \left(\theta D \frac{\delta C_r}{\delta x} + q C_r \right) \quad (4)$$

em que:

- t - tempo, T
- θ - teor de água no solo, em base volumétrica, $L^3 L^{-3}$
- C_r - concentração residente ou concentração na solução do solo, $M L^{-3}$
- P - massa específica do solo, $M L^{-3}$
- S - concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de massa do solo)
- X - distância em relação à superfície do solo, L
- D - coeficiente dispersivo-difusivo, $L^2 T^{-1}$
- q - densidade de fluxo, $L T^{-1}$

O programa utilizado para ajuste das equações a partir dos dados das curvas de efluentes é baseado em procedimentos relativos ao cálculo das funções erro e erro complementar, cálculo do produto exp (P) por erfc (y), método de ajuste de curvas, balanço de massa e do desenvolvimento da interface (Borges Júnior & Ferreira, 2006); desta forma, foram obtidos as curvas de efluentes ajustadas, os fatores de retardamento e os coeficientes dispersivo-difusivo dos íons potássio, cálcio e magnésio, cujos dados de entrada foram as concentrações relativas às amostras oriundas do efluente C/C_0 , sendo C a concentração de solutos no efluente e C_0 a concentração na água residuária, comprimento da coluna, porosidade total, número de volume de poros e fluxo da solução na coluna.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de deslocamento miscível nas diferentes colunas de lixiviação submetidas à aplicação da vinhaça e, nas Figuras 1 a 3, as curvas de efluente com cálcio, potássio e magnésio, obtidas pelo ajustamento teórico aos dados experimentais.

De maneira geral, os resultados obtidos indicam grande mobilidade desses elementos nos solos. Os maiores valores para os fatores de retardamento, que são indicativos de uma retenção maior de íons, foram observados no LVAd excetuando-se no que se refere ao potássio, seguido dos LVd e LVef.

Tabela 3. Características obtidas no ensaio de deslocamento miscível e valores médios do fator de retardamento (fR) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) dos íons potássio, cálcio e magnésio nas diferentes colunas de lixiviação

Características	LVAd	LVd	LVef
Fluxo ($cm\ h^{-1}$)	0,99 - 1,36	0,33 - 1,06	0,11 - 0,21
Vel. de avanço ($cm\ h^{-1}$)	1,65 - 2,27	0,72 - 2,30	0,22 - 0,41
Volume de poros (cm^3)	175,96	134,53	149,71
K			
fR	1,63	2,17	1,43
D ($cm^2\ h^{-1}$)	6,76	3,44	1,22
Ca			
fR	1,98	1,27	1,11
D ($cm^2\ h^{-1}$)	41,46	9,01	0,54
Mg			
fR	1,49	0,85	0,75
D ($cm^2\ h^{-1}$)	12,67	15,05	0,15

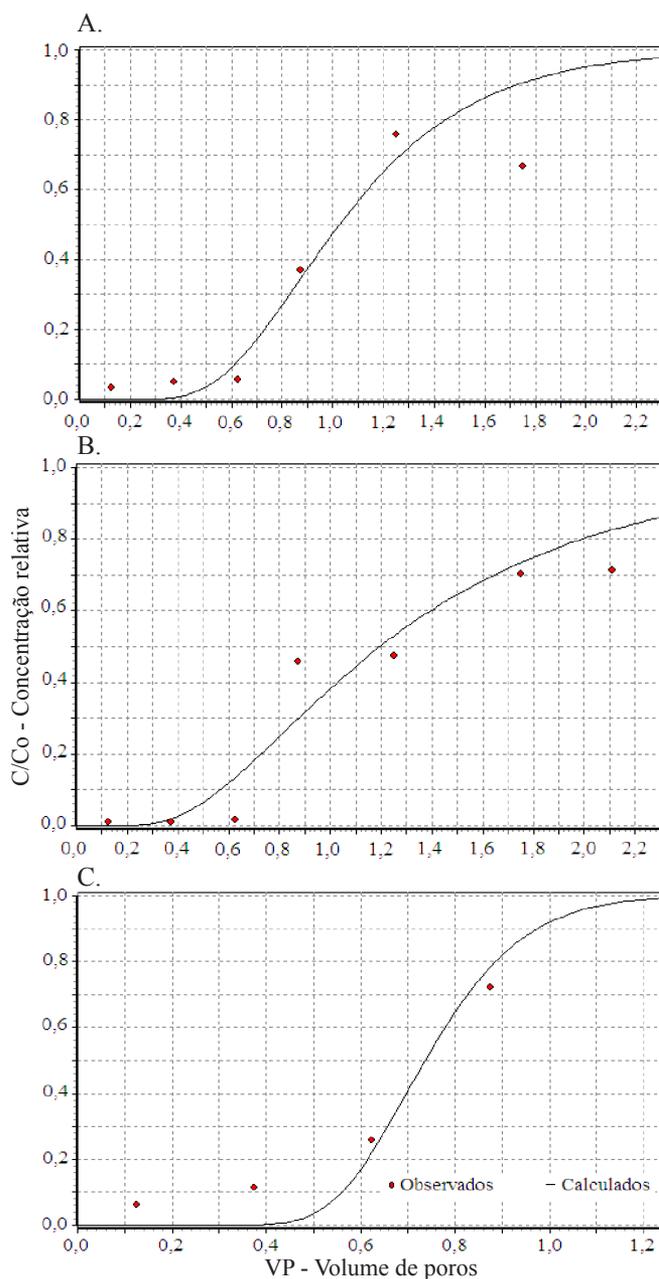


Figura 1. Curva de efluente para concentração de cálcio (A), potássio (B) e magnésio (C) no Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, o maior valor encontrado para o fator de retardamento ocorreu para o K, no LVd. O fator de retardamento, por ser uma característica que retrata a capacidade do solo em reter os solutos depende, à medida em que o fluxo de massa avança, das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação (Melo et al., 2006). Apesar de ser um cátion monovalente, o que conferiria menor força de atração do íon pela fração coloidal do solo, sua elevada concentração presente na vinhaça possibilitou o deslocamento de cátions bivalentes, principalmente o magnésio, favorecendo sua retenção no complexo de troca e aumento do seu fator de retardamento.

Santos et al. (2010) observaram, ao avaliar o fator de retardamento dos íons cálcio, magnésio, sódio e potássio das águas residuárias de origem doméstica tratada e de suinocultura, que quanto menor a velocidade de avanço da solução na coluna de solo maior é o tempo de contato entre os íons e os colóides do solo promovendo maior oportunidade de retenção dos solutos causando aumento no fator de retardamento. Mesmo tendo sido obtidos a menor velocidade de avanço (Tabela 3) e o maior teor de argila (Tabela 2) o que lhe conferiria maior interação dos íons presentes na solução com a fase sólida do solo, o LVef apresentou os menores fatores de retardamento para os três íons, dentre os três solos avaliados.

Os valores de f_R para cálcio e potássio, embora acima da unidade, estão muito próximos a esta, caracterizando baixa interação solo-soluto ou forte deslocamento proporcionado por outros cátions (sobretudo K^+) adicionados ao solo com a vinhaça.

Quanto ao magnésio, o fator de retardamento abaixo da unidade indica não ter havido interação do soluto com a fração coloidal do solo nem fraco poder competidor deste cátion pelos sítios de troca do solo. Acredita-se que o menor fator de retardamento obtido para todos os cátions no LVe esteja associado à sua condição inicial de possuir maior saturação por bases (Tabela 2). Com a aplicação da vinhaça o potássio em excesso passou a deslocar outros cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} e Na^+) do complexo de troca em maior proporção que os solos de menor saturação por bases possibilitando-lhe mais rápida lixiviação, o que se verifica observando-se as curvas de efluentes para os três íons no LVef (Figuras 1A, B e C).

De acordo com Santos et al. (2010) a análise do comportamento da curva de efluente ou curva de eluição, permite identificar as interações da solução com a fração sólida do solo. Para Nielsen & Biggar (1962) quando na curva o valor correspondente à concentração relativa de 0,5 é maior que 1 número de volume de poros, a curva de efluente se apresentará deslocada para a direita indicando retardamento na velocidade de avanço do soluto em relação à velocidade média de avanço da solução deslocadora. Esta análise identifica que, ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, sinalizando um fator de retardamento maior que a unidade. Desta análise se constata que, quanto mais o valor do número de volume de poros se distancia do valor unitário para a concentração relativa de 0,5, maior é a interação soluto-solo.

De acordo com o que está apresentado na Figura 1 observa-se que somente a curva efluente do potássio (Figura 1B) está deslocada para a direita indicando retardamento na velocidade

de avanço do soluto. A curva efluente do cálcio (Figura 1A) se manteve próximo à unidade e a do magnésio (Figura 1C) apresentou deslocamento para a esquerda indicando baixa adsorção desse íon pela solução do solo. Desta forma, a ordem decrescente da energia de adsorção aos sítios de troca no LVef, de acordo com as curvas efluentes, foi $K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2}$, corroborando com os dados apresentados de f_R na Tabela 3. Registra-se, em relação ao LVef, que o fluxo do efluente ocorreu, no máximo, até a passagem de 2,3 VP devido, provavelmente, ao entupimento dos poros ocasionado pela elevada concentração de sólidos totais presentes na vinhaça.

Na prática, os baixos valores de f_R para os três íons no LVef podem ser interpretados como grande possibilidade de lixiviação desses cátions, com tendência de contaminação de águas subterrâneas, caso a aplicação de vinhaça ocorra de forma exagerada e contínua.

Fator de retardamento menor ou igual a 1,0 indica meio com forte competição iônica havendo desorção de cátions do complexo de troca, ocorrendo claramente com o Mg nos solos LVd e LVef.

O fato de terem ocorrido maiores valores de f_R no LVAd para os íons Ca^{+2} e Mg^{+2} (Tabela 3) conferindo maior interação solo-soluto, pode ser creditado ao maior conteúdo de matéria orgânica (Tabela 2) e ao alto teor de argila (52 dag kg^{-1}) presente neste solo, o que lhe confere maior poder de adsorção iônica. De acordo com Melo et al. (2006) ambos os fatores resultam em maior defasagem entre o avanço do solvente e o avanço do soluto no solo. Ferreira et al. (2006) também observaram os maiores valores de f_R (2,58 para o potássio, 2,28 para o cálcio e 2,21 para o magnésio) em colunas de lixiviação contendo LVAd quando comparados com os da colunas contendo solos do tipo Aluvial e Argissolo, submetidas à aplicação de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro. De maneira semelhante Melo et al. (2006) observaram os maiores valores de f_R para o LVAd (2,39 para o potássio, 2,00 para o cálcio e 2,37 para o magnésio) quando comparados com os fatores de retardamento obtidos em colunas que continham Neossolo Quartzênico e Latossolo Amarelo distrófico sob aplicação de água residuária de manipueira.

De acordo com o que está apresentado na Figura 2, a curva efluente para o cálcio (Figura 2A) ficou deslocada para a esquerda, a do potássio (Figura 2B) para a direita e o magnésio apresentou valor de uma unidade de volume de poros para a concentração relativa de 0,5 (Figura 2C).

No tocante ao LVd, o fator de retardamento do cálcio ficou próximo da unidade (Figura 3A e a do magnésio (Figura 3C) abaixo da unidade, o que pode ser creditado ao deslocamento do último cátion para a solução do solo, situação que também caracteriza risco de seu aporte às águas subterrâneas. A curva de potássio deslocada para a direita (Figura 3B) evidencia a interação deste íon com a fase sólida do solo corroborando com o maior valor do fator de retardamento apresentado na Tabela 3, comparado com o obtido para os outros cátions.

Valores mais elevados dos coeficientes de dispersão-difusão (D) estão associados a menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo tornando os acréscimos na concentração relativa (C/C_0)

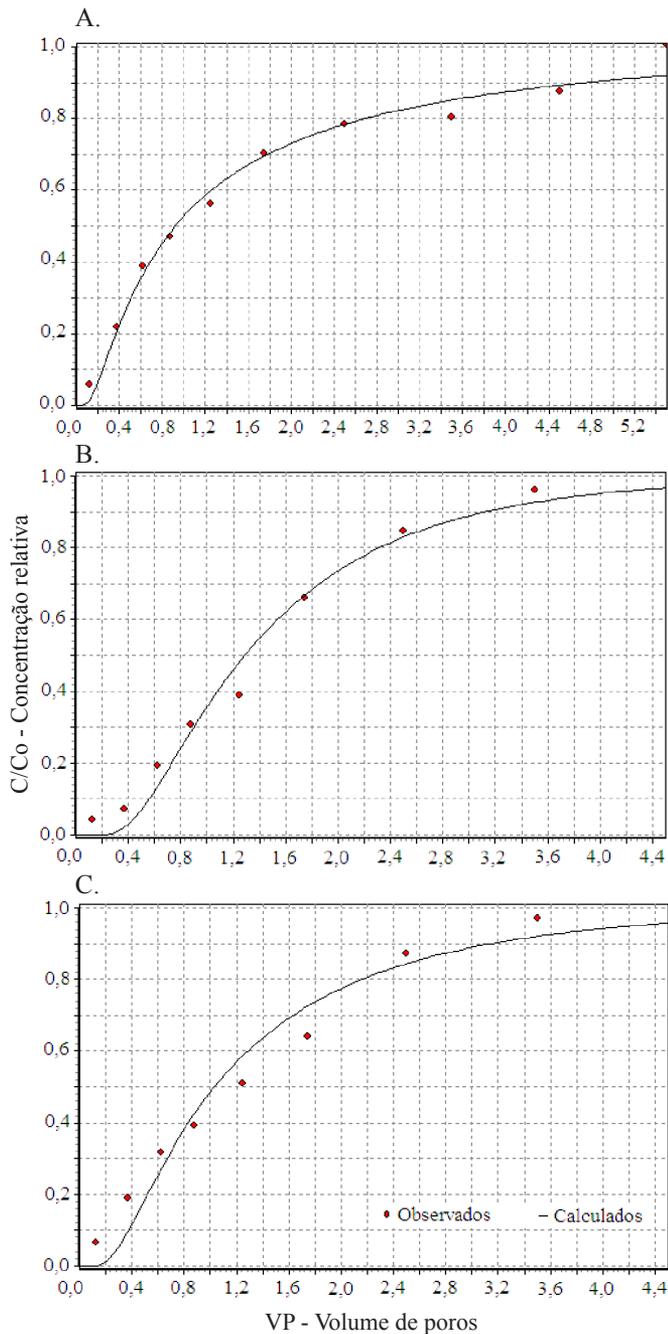


Figura 2. Curva de efluente para concentração de cálcio (A), potássio (B) e magnésio (C) no Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd)

baixos para acréscimos no número de volume de poros (Nielsen & Biggar, 1962).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3 observa-se que os maiores valores de D , excetuando-se para o magnésio, foram obtidos para o LVAd, quando comparados com os dos LVd e LVef. Tal como observado por Santos et al. (2010) há uma correlação direta dos valores observados para coeficiente de dispersão-difusão com a velocidade de avanço da solução, a qual foi maior para o LVAd. De maneira análoga, as baixas velocidades de avanço obtidas no LVef podem justificar os menores valores de D .

De acordo com Engler et al. (2008) o coeficiente de dispersão-difusão pode ser indicativo da capacidade do solo

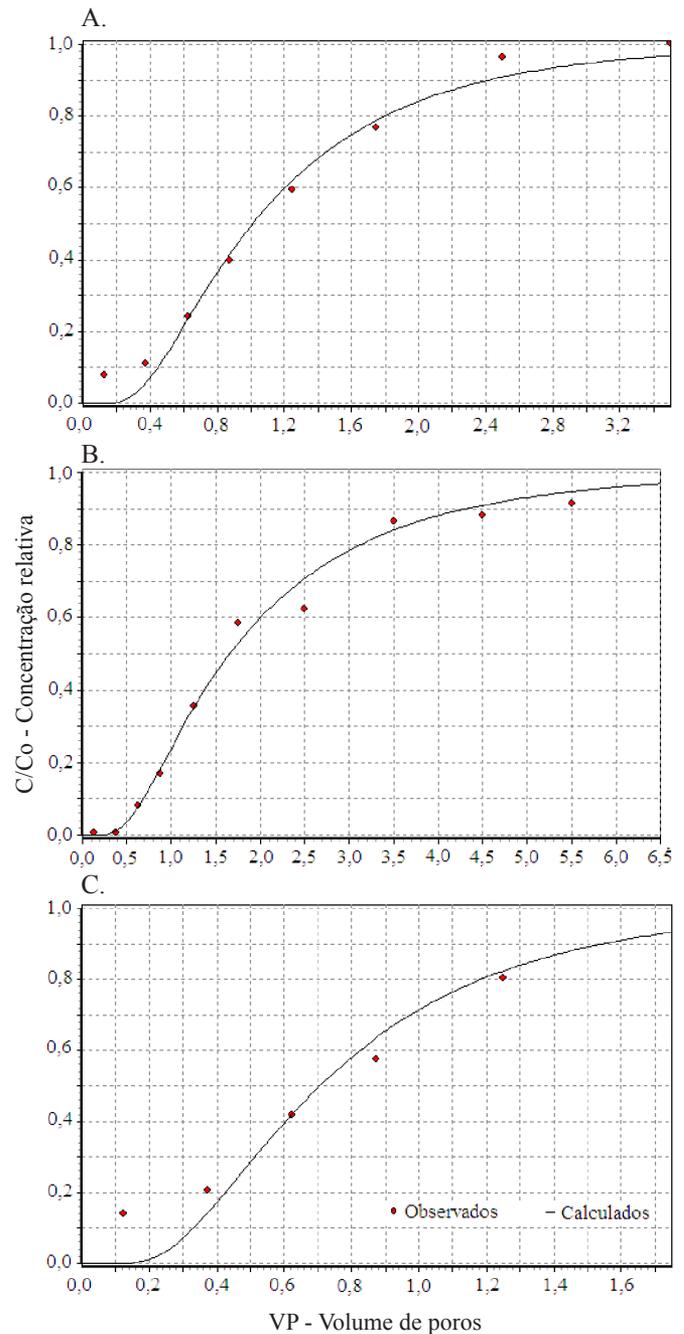


Figura 3. Curva de efluente para concentração de cálcio (A), potássio (B) e magnésio (C) no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

em reter determinado soluto à medida em que a frente de umedecimento da solução aplicada avança no perfil do solo; assim, de todos os solos avaliados o LVef apresentou a menor capacidade em reter os íons estudados da água residual em percolação.

CONCLUSÕES

1. O maiores valores de fator de retardamento foram obtidos para o potássio no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), seguido do cálcio no LVAd e por último, o potássio no Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd).

2. Os menores fatores de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão para todos os cátions avaliados foram obtidos no Latossolo Vermelho Eutroférrico (LVef).

3. O magnésio apresentou os menores valores de fator de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão nos três solos avaliados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FEAM pelo apoio e à FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos.

LITERATURA CITADA

- Anami, M. H.; Sampaio, S. C.; Suszek, M.; Gomes, S. D.; Queiroz, M. M. F. Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.75-80, 2008.
- APHA - American Public Health Association. AWWA - American Water Works Association. WEF - Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21.ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2005. 1268p.
- Barros, R. P.; Viégas, P. R. A.; Silva, T. L.; Souza, R. M.; Barbosa, L.; Viégas, R. A.; Barretto, M. C. V.; Melo, A. S. Alterações em atributos químicos do solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de Vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.40, p.341-346, 2010.
- Bebé, F. V.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, G. B.; Oliveira, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.781-786, 2009.
- Borges Junior, J. C. F.; Ferreira, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.604-611, 2006.
- Costa, S. N.; Martinez, M. A.; Matos, A. T.; Ramos, V. B. N. Mobilidade de nitrato em coluna de solo sob condições de escoamento não permanente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, p.190-194, 1999.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.
- Engler, M. P. C.; Cichota, R.; Lier, Q. J. V.; Bloem, E.; Sparovek, G.; Schnug, E. An alternative approach for the determination of soil water mobility. *Pedosphere*, v.18, p.328-334, 2008.
- Ferreira, P. A.; Garcia, G. O.; Matos, A. T.; Ruiz, H. A.; Borges Junior, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v.28, p.29-35, 2006.
- Matos, A. T. Qualidade do meio físico: Práticas de laboratório. Viçosa: UFV, 2012. 150p.
- Melo, R. F.; Ferreira, P. A.; Matos, A. T.; Ruiz, H. A.; Oliveira, L. B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.456-465, 2006.
- Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Miscible displacement: III, Theoretical considerations. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.26, p.216-221, 1962.
- Ruiz, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.297-300, 2005.
- Santos, J. S.; Lima, V. L. A. de; Borges Júnior, J. C. F.; Silva, L. V. B. D.; Azevedo, C. A. V. de. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.1226-1233, 2010.
- Silva, M. A. S.; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.108-114, 2007.
- Silva, N. F.; Lelis Neto, J. A.; Teixeira, M. B.; Cunha, F. N.; Miranda, J. H.; Coelho, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. *Irriga, Edição especial*, p.340-350, 2012.
- Zolin, C. A.; Paulino, J.; Bertonha, A.; Freitas, P. S. L.; Folegatti, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.22-28, 2011.