

Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon

Paulo Afonso Ferreira^{1*}, Giovanni de Oliveira Garcia¹, Antônio Teixeira de Matos¹, Hugo Alberto Ruiz² e João Carlos Ferreira Borges Junior³

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. P.H. Rolfs, s/n, 36571-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. ²Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa (UFV). ³Bolsista de Pós-doutorado do CNPq. *Autor para correspondência.

RESUMO. Neste estudo, determinaram-se em colunas de solos os fatores de retardamento, coeficientes dispersivo-difusivos e curvas de efluente, assim como a concentração residente dos íons potássio, sódio, cálcio e magnésio presentes na água residuária da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro conilon. Inicialmente, as colunas foram interligadas a frascos de Mariotte contendo água destilada, durante período suficiente para passar dois volumes de poros e, em seguida, a frascos contendo a água residuária. As concentrações relativas das amostras oriundas do efluente, correspondentes aos respectivos volumes de poros, foram utilizadas a fim de obter as curvas experimentais de efluente para sódio, potássio, cálcio e magnésio. Modelos matemáticos para concentração no fluxo foram ajustados aos pontos amostrais das curvas de efluente, permitindo, assim, obter os valores dos fatores de retardamento e coeficientes dispersivo-difusivos para os íons. Para o latossolo, os fatores de retardamento foram superiores àqueles encontrados para o aluvial e argissolo. Por outro lado, os coeficientes dispersivo-difusivos não apresentaram tendência entre os três solos. As concentrações residentes dos solutos apresentaram a ordem de grandeza: aluvial < argissolo < latossolo.

Palavras-chave: águas residuárias, mobilidade de íons no solo, café conilon.

ABSTRACT. *Soil transported-solutes found in conilon coffee wastewater.* This study was carried out to determine the retardation factors, diffusive-dispersive coefficients and effluent curves, as well as the resident concentration of potassium, sodium, calcium and magnesium ions found in the wastewater from washing and pulping of the conilon coffee cherries. Initially, the columns were interlinked to Mariotte flasks containing distilled water, over period enough to pass two pore volumes of the soil, and then being linked to flasks containing this wastewater. The relative concentrations of the samples from the effluent, corresponding to the respective pore volumes, were used in order to obtain the experimental effluent curves for sodium, potassium, calcium and magnesium. Mathematical models for concentration of the flow were adjusted to the sample points of the effluent curves, therefore allowing it to obtain the values of either retardation factors and dispersive-diffusive coefficients for those ions. For Latosol, the retardation factors were superior to those found for the Alluvial and Argisol. However, the dispersive-diffusive coefficients presented no tendency among those three soils. The resident solute concentrations showed the following magnitude order: Alluvial < Argisol < Latosol.

Key words: wastewaters, soil ion mobility, conilon coffee.

Introdução

Ao movimentar-se no solo, a água leva consigo os solutos, podendo uma parte destes ser adsorvida ao complexo coloidal, outra absorvida pelas plantas e, ainda, uma terceira parte precipitada. Entretanto, o movimento de solutos no solo não acontece, apenas, em decorrência do fluxo de massa, podendo também ocorrer por difusão, em resposta a gradientes de concentração. Além disto, ao serem transportados através do perfil do solo, os solutos reagem entre si e interagem com a fração sólida do solo,

podendo ocorrer uma sucessão de processos físicos e químicos inter-relacionados. Estas interações envolvem características químicas, mineralógicas e físicas do solo, que podem ser influenciadas por uma série de fatores como acidez, temperatura, potencial de óxido-redução, composição e concentração da solução do solo (Prevedello, 1996).

Segundo Ferreira (2001), o deslocamento de fluidos miscíveis é um processo que ocorre quando um fluido mistura-se com outro fluido e o desloca. A lixiviação de sais do perfil do solo é um exemplo de deslocamento

miscível.

Dodds *et al.* (1998) afirmam que quando os fertilizantes são transportados para os estratos inferiores do solo, além de ficarem indisponíveis às plantas, acarretam riscos de contaminação das águas subterrâneas. Dessa forma, a contaminação por nitrato e pesticidas tem-se tornado um sério problema ambiental. Áreas agrícolas possuem diferentes graus de exploração e potencial de poluição do lençol freático, dependendo do tipo de solo, geologia, clima e, principalmente, das práticas agrícolas.

As teorias que descrevem os processos físicos e químicos que ocorrem no solo, aliadas às técnicas de resoluções analíticas e numéricas da equação de transporte de solutos no solo e aos recursos computacionais disponíveis, possibilitam, por meio da aplicação de modelos de simulação, prever riscos de contaminação e impactos de determinados componentes químicos no ambiente solo-água-plantas (Miranda e Duarte, 2002).

Um grande número de modelos de simulação do movimento de solutos através do perfil do solo foi desenvolvido nos últimos anos. Todavia, há grande dificuldade em envolver todas as características pertinentes ao meio ambiente, a fim de se obter um modelo realmente capaz de prever o processo de deslocamento e retenção dos solutos ao meio. A presença de diferentes espécies de cátions na solução do solo proporciona competição entre eles pelos sítios de adsorção, favorecendo a lixiviação daqueles com menor energia de adsorção, o que constitui um alerta quanto ao perigo de contaminação dos mananciais de água subterrânea (Costa *et al.*, 1999).

A mobilidade dos íons no solo depende de suas propriedades químicas e físicas, além daquelas inerentes à fração coloidal do solo. Matos (1995) define o fator de retardamento como a capacidade de retenção ou efeito tampão do solo, para um elemento ou composto existente em um resíduo. Conforme Ferreira (2001), o fator de retardamento expressa a capacidade de um meio poroso em reter um soluto durante um processo de escoamento de uma solução. Seu valor depende das interações entre o soluto e a fase sólida do solo.

Ao aplicar um líquido no solo, a interface entre o líquido aplicado e a solução do solo não é nítida. Segundo Van Genuchten e Wierenga (1986), a perda de nitidez da interface entre o líquido deslocador e o deslocado é devido ao efeito aditivo de dois fenômenos de mistura, ou seja, a difusão, que é o movimento térmico natural de solutos, e a dispersão mecânica, 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.

Os autores afirmam, ainda, que o modo mais prático de estimar os valores do fator de retardamento e do coeficiente dispersivo-difusivo consiste em usar soluções analíticas da equação de transporte de solutos, empregando modelos computacionais. Os modelos estimam estas características por meio de ajustamento aos dados experimentais, obtidos em colunas de solo em condições laboratoriais ou de campo.

O presente trabalho teve como objetivos determinar: curvas de efluentes, fatores de retardamento e coeficientes dispersivos-difusivos dos íons de potássio, sódio, cálcio e magnésio; concentrações residentes dos solutos presentes na água residuária da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro conilon, em colunas de três solos.

Material e métodos

Amostras de água residuária foram coletadas durante o período de colheita e processamento dos frutos do cafeeiro conilon, nos meses de julho e agosto de 2002, na Fazenda Experimental de Marilândia, pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa e Extensão Rural (Incaper), município de Marilândia, Estado do Espírito Santo.

Subamostras da água residuária de aproximadamente dois litros foram acondicionadas em recipientes plásticos e conservadas em caixas de isopor, contendo gelo, e levadas para o laboratório, onde foram efetuadas as seguintes análises: pH, por potenciometria; demanda química de oxigênio (DQO), pelo método do refluxo aberto; demanda bioquímica de oxigênio (DBO), por meio da determinação do oxigênio dissolvido nas amostras (Método Winkler), APHA (1995); concentrações de nitrogênio e fósforo, determinadas por colorimetria; concentrações de cálcio e magnésio por titulometria, e de potássio e sódio por fotometria de chama (Rump e Krist, 1992).

Foram feitas as determinações para: sólidos sedimentáveis (SP), em cone de Imhoff; sólidos totais (ST), após secagem em estufa a 110°C, por 24 horas; sólidos fixos totais (SFT), por combustão em mufla a 550°C; sólidos voláteis totais (SVT), por diferença entre os sólidos totais e fixos; sólidos em suspensão (SS), em filtros de acetato de celulose de 0,45 mm. A condutividade elétrica (CE) foi medida com o auxílio de condutivímetro.

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios dos componentes de natureza química e física da água residuária.

As amostras de três solos classificados como aluvial eutrófico, argissolo vermelho amarelo e latossolo vermelho-amarelo, todos sob cultivo do cafeeiro conilon,

foram retiradas às profundidades de 0 a 40 cm e, após secagem ao ar, foram destorroados e passados em peneira de 4 mm. Em seguida, retirou-se uma subamostra à qual foi levada ao laboratório, a fim de proceder às caracterizações química e físico-hídrica.

Tabela 1. Valores médios dos componentes de natureza química e física da água residuária da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro conilon.

Característica	Efluente
pH	4,10
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	0,99
Sólidos sedimentáveis (mg L ⁻¹)	330
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	6.403
Sólidos em suspensão (mg L ⁻¹)	2.336
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	4.067
Sólidos fixos totais (mg L ⁻¹)	848
Sólidos voláteis totais (mg L ⁻¹)	5.555
Demanda química de oxigênio (mg L ⁻¹)	11.000
Demanda bioquímica de oxigênio (mg L ⁻¹)	3.374
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	160
Fósforo total (mg L ⁻¹)	13,90
Sódio (mg L ⁻¹)	77,10
Potássio (mg L ⁻¹)	204,70
Cálcio (mg L ⁻¹)	30,50
Magnésio (mg L ⁻¹)	15,30

As análises químicas compreenderam as determinações dos teores de P disponível, K, Ca, Mg, Na, Al trocável, H+Al e matéria orgânica, bem como a saturação de bases, CTC efetiva e pH. Na análise física, determinou-se: massa específica, pelo método da proveta; partículas, pelo método do balão volumétrico; análise granulométrica, pelo método da pipeta; equivalente de umidade, pelo método da centrifuga (Embrapa, 1997). Os resultados das análises físico-hídricas e químicas dos solos são apresentados na Tabela 2.

Na determinação das características de transporte de potássio, sódio, cálcio e magnésio usaram-se materiais das amostras dos três tipos de solos, em colunas de PVC rígido de 0,20 m de comprimento e 0,05 m de diâmetro, preenchidas com agregados de solo de até dois milímetros, devidamente homogeneizados.

No ensaio de colunas, utilizou-se apenas a água residuária bruta, sem diluições, sendo realizada uma repetição, para cada tipo de solo. Inicialmente, as colunas de solos foram saturadas com água destilada, processo este realizado de forma lenta, quando as colunas foram colocadas dentro de recipiente com altura de lâmina de água equivalente a 2/3 da coluna, deixando-as em repouso por 24 horas. A seguir, as colunas foram interligadas a frascos de Mariotte contendo água destilada, por um período suficiente para passar dois volumes de poros. Após completa infiltração da água destilada, os frascos de Mariotte contendo a água residuária eram interligados às colunas de solo.

Recipientes de aproximadamente 50 mL foram utilizados na coleta de efluente, para determinação das concentrações iônicas. O volume de cada amostra foi o de

20 mL, correspondente a 0,2 volume de poros, determinado em função do volume de poros do solo na coluna, da exigência de um volume mínimo para as análises químicas e do número de pontos para gerar a curva experimental de efluentes.

Tabela 2. Análises granulométrica, físico-hídrica e química para a caracterização dos materiais de solos coletados na Fazenda Experimental de Marilândia no município de Marilândia, Estado do Espírito Santo.

Solo	Aluvial	Argissolo	Latossolo
Areia grossa (dag kg ⁻¹)	60	44	12
Areia fina (dag kg ⁻¹)	21	12	6
Silte (dag kg ⁻¹)	6	5	28
Argila (dag kg ⁻¹)	13	39	54
Massa específica do solo (kg dm ⁻³)	1,30	1,15	1,12
Massa específica das partículas (kg dm ⁻³)	2,56	2,53	2,51
Porosidade (dm ³ dm ⁻³)	0,546	0,595	0,608
pH	4,81	4,68	5,92
P (mg dm ⁻³)	1,5	0,7	1,8
K (mg dm ⁻³)	50	20	110
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,23	0,71	3,38
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,95	0,33	2,10
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,4	0,0
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,0	3,3	4,0
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	2,31	1,09	5,76
CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	2,51	1,49	5,76
CTC _{7,0} (cmol _c dm ⁻³)	5,31	4,39	9,76
Saturação por bases (%)	43,5	24,8	59,0
Saturação por Alumínio (%)	8,0	26,8	0,0
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹)	5,31	5,76	5,98
Fósforo remanescente (mg L ⁻¹)	32,0	33,4	20,3

pH em água; P e K – Extrator de Mehlich 1; Ca, Mg e Al – Extrator KCl – 1 mol L⁻¹; H+Al – Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0.

A superfície do solo foi coberta com mecha de lã de vidro a fim de se evitar alterações superficiais, durante a aplicação da água, e garantir uniformidade de infiltração. O ensaio foi finalizado quando a condutividade elétrica do efluente coletado tornava-se constante, ou seja, aproximadamente igual àquela da água aplicada.

As concentrações relativas das amostras oriundas do efluente C/C₀, em que C é a concentração de solutos no efluente e C₀ a concentração na água residuária, o número de amostras, fluxo e massa específica do solo constituíram dados de entrada do programa computacional DISP¹, cujos dados de saída foram as curvas de efluente para cada íon e solo, fatores de retardamento e coeficientes dispersivos-difusivos. A concentração residente dos solutos presentes na água residuária, ao longo dos perfis dos três solos, foram então simuladas com o DISP.

Resultados e discussão

¹Programa desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa por João Carlos Ferreira Borges Júnior e Professor Paulo Afonso Ferreira.

A Tabela 3 apresenta as características obtidas durante os ensaios de deslocamento miscível, usando água residuária da lavagem e despulpagem de frutos do cafeeiro conilon, em colunas dos solos aluvial, argissolo e latossolo, em laboratório.

Tabela 3. Densidade do solo, porosidade, fluxo e velocidade de avanço em colunas de solo durante os ensaios de deslocamento miscível usando água residuária da lavagem e despulpagem de frutos do cafeeiro conilon.

Características	Aluvial	Argissolo	Latossolo
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,25	1,15	1,00
Porosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,51	0,55	0,60
Fluxo (cm h^{-1})	10,83	9,46	7,97
Velocidade de avanço (cm h^{-1})	21,16	17,34	13,25

Segundo Nielsen e Biggar (1962), as curvas de efluente são importantes para estudar o transporte de solutos no perfil do solo, durante uma percolação. O número de volume de poros correspondente à concentração relativa 0,5 é uma primeira indicação, no sentido da existência ou não de interações soluto-solo. Quando o valor correspondente a 0,5 da concentração relativa é 1,0 volume de poros, o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo. Por outro lado, quando o valor é maior que 1,0, isto é, a curva de efluente apresenta-se deslocada para a direita, significa que ao escoar através do perfil do solo parte do soluto é adsorvida, resultando um fator de retardamento acima da unidade. Portanto, quanto maior é o fator de

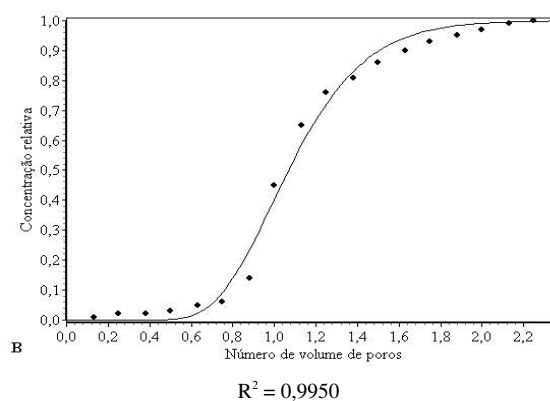
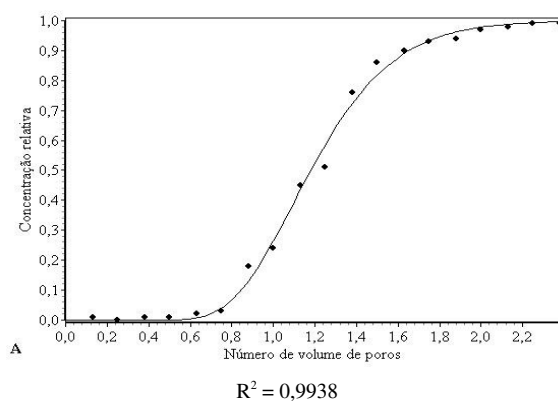
retardamento maior será a interação soluto-solo.

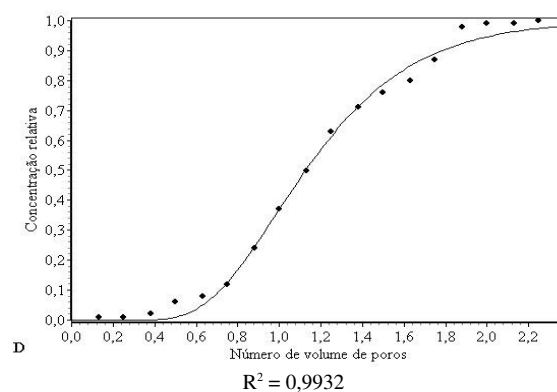
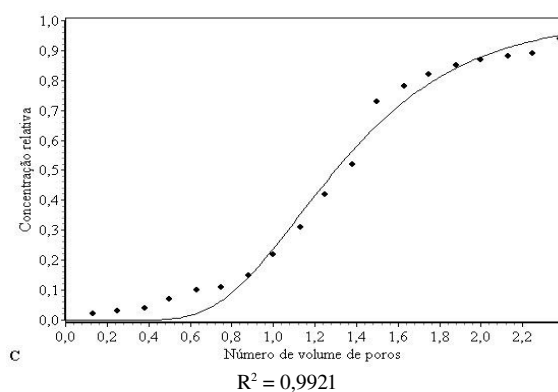
Para uma mesma velocidade média de escoamento de uma solução, valores mais elevados do coeficiente dispersivo-difusivo correspondem a uma menor declividade da curva de efluente, em virtude da maior mistura na interface entre os fluidos deslocado e deslocador. A Tabela 4 mostra, com base nos valores dos fatores de retardamento, a crescente interação dos íons analisados com a fração coloidal dos solos no sentido do aluvial para o latossolo, uma vez que a energia de adsorção aos sítios de troca nos solos aluvial e argissolo foi $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$, enquanto que no latossolo a ordem foi $\text{K}^{+} > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^{+}$.

Tabela 4. Fator de retardamento (f_R) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) dos íons de potássio, sódio, cálcio e magnésio, obtidos pelo ajustamento do modelo teórico aos dados experimentais, para os três solos.

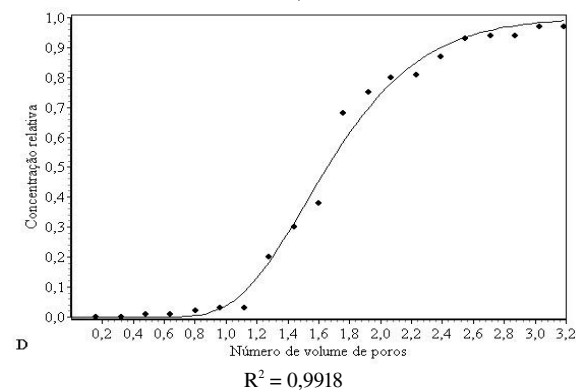
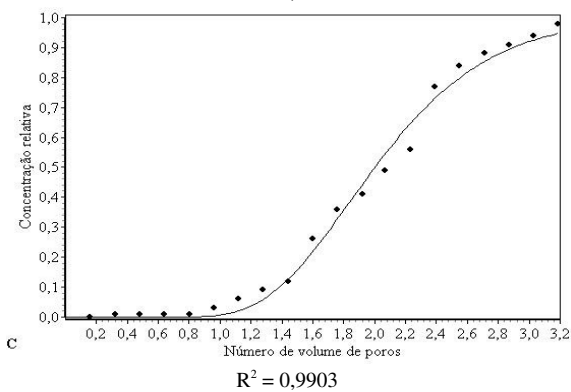
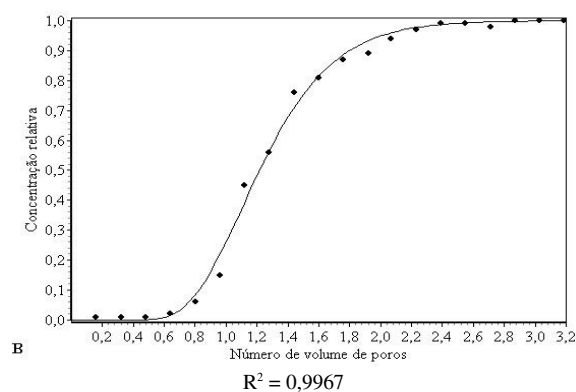
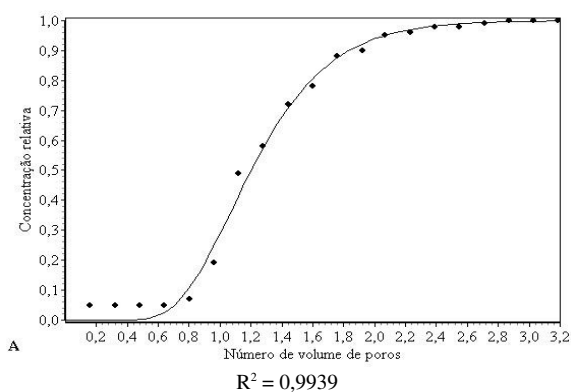
Solos	Potássio		Sódio		Cálcio		Magnésio	
	f_R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	f_R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	f_R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	f_R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)
Aluvial	1,22	7,02	1,12	7,28	1,39	14,11	1,20	13,28
Argissolo	1,27	12,84	1,24	10,92	2,09	9,74	1,73	9,62
Latossolo	2,58	8,25	1,82	5,24	2,28	9,83	2,21	25,64

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as curvas de efluente para potássio, sódio, cálcio e magnésio, obtidas com os solos aluvial, argissolo e latossolo pelo ajustamento do modelo teórico aos dados experimentais, usando o programa computacional DISP.

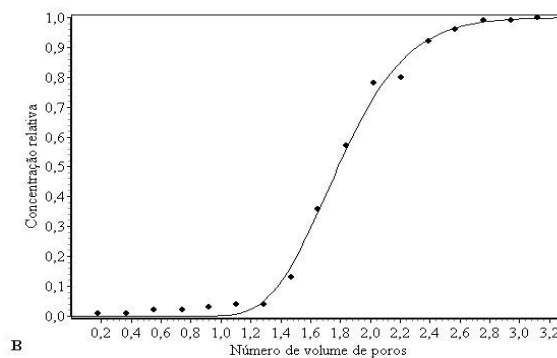
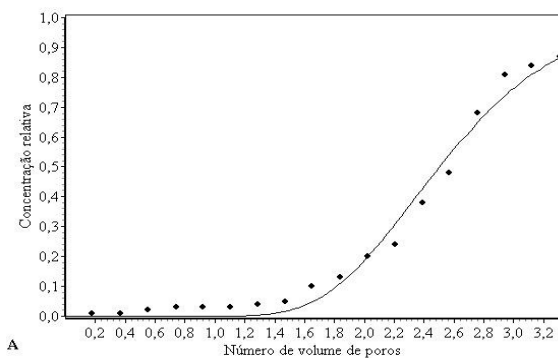




Figuras 1. Curvas de efluente potássio (A), sódio (B), cálcio (C) e magnésio (D) presentes na ARC, ajustada aos dados experimentais, obtidos com o aluvial.



Figuras 2. Curvas de efluente potássio (A), sódio (B), cálcio (C) e magnésio (D) presentes na ARC, ajustada aos dados experimentais, obtidos com o argissolo.



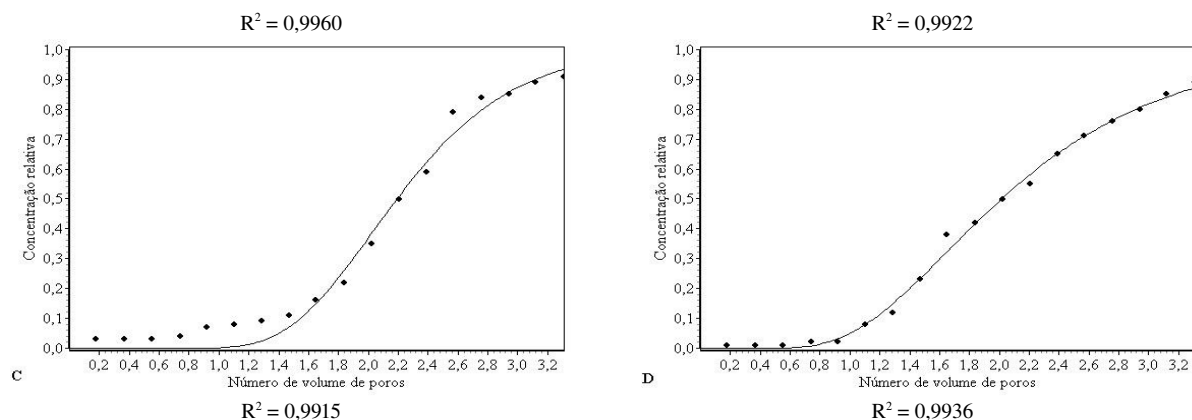


Figura 3. Curva de efluente potássio (A), sódio (B), cálcio (C) e magnésio (D) presentes na ARC, ajustada aos dados experimentais, obtidos com o latossolo.

A interação dos íons presentes na solução, com a fase sólida do solo, foi maior para o latossolo seguida do argissolo e aluvial, o que pode ser observado na Tabela 4 com os valores do fator de retardamento decrescendo no sentido do latossolo para o aluvial. Este efeito pode ser também observado nas Figuras 1 a 3. Estes resultados são coerentes com os teores de argila, conforme Tabela 2.

Observando, ainda, as curvas de efluente dos íons estudados, verifica-se que a mobilidade deles é elevada no aluvial, ou seja, baixa interação solo-soluto, razão porque os fatores de retardamento situaram-se próximos a 1,0 (Tabela 4). O oposto ocorreu para o latossolo cujos fatores de retardamento estão acima de 1,80 para os quatro íons estudados.

Enquanto a concentração do soluto no fluxo corresponde à massa de soluto por unidade de volume da solução que passa através de uma dada seção transversal durante um intervalo elementar de tempo, a concentração residente é a concentração média do soluto na solução do solo naquela seção. A unidade usual de ambas é g cm^{-3} . Deve-se salientar que a concentração no efluente é a concentração no fluxo na seção transversal de saída (Parker e van Genuchten, 1984).

As concentrações residentes dos solutos contidos na água residuária nos perfis dos solos aluvial, argissolo e latossolo, simuladas com o auxílio do programa computacional DISP, estão apresentadas na Figura 4.

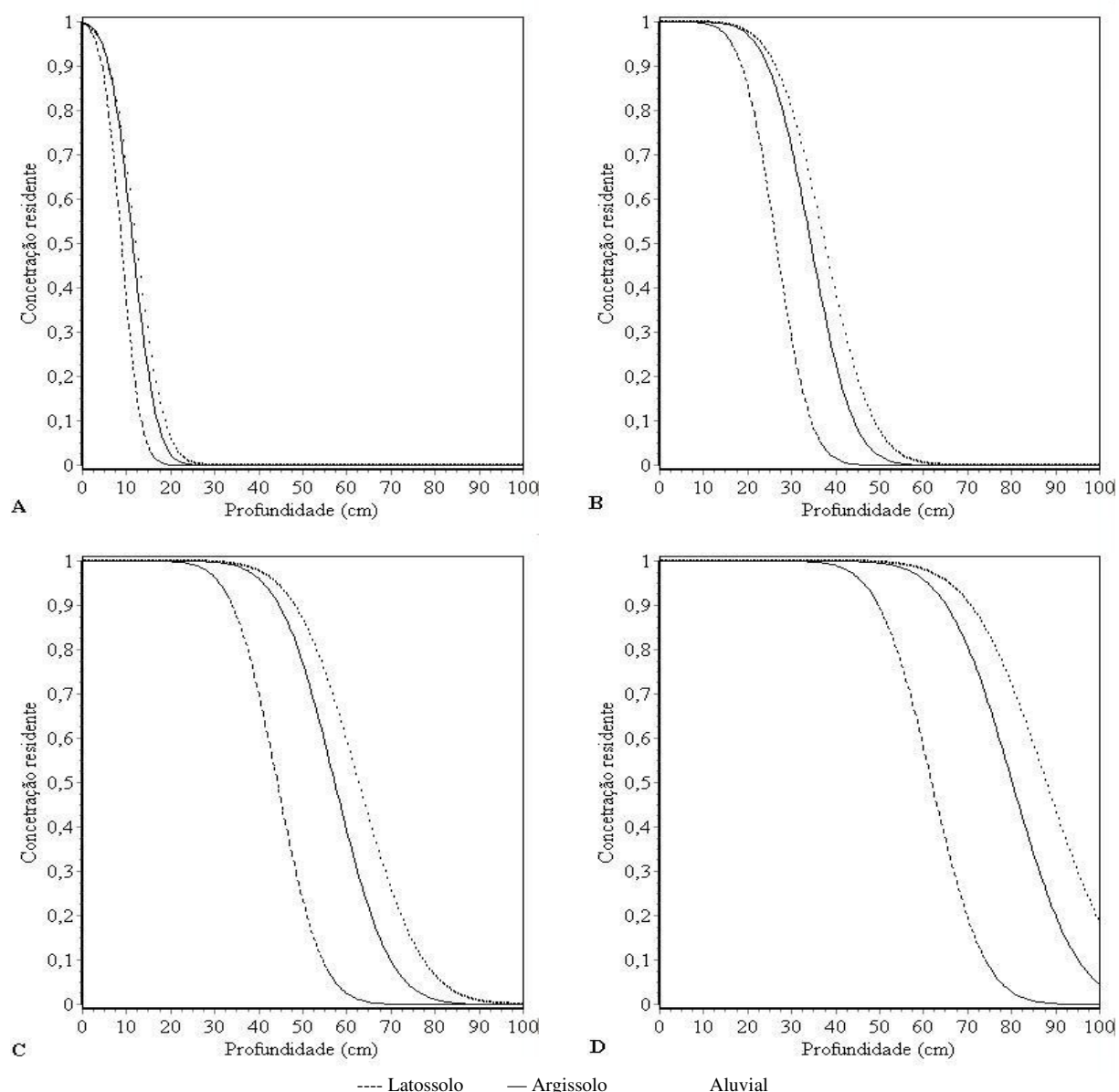


Figura 4. Concentração residente dos solutos no perfil de 100 cm nos solos aluvial, argissolo e latossolo após 1 (A), 3 (B), 5 (C) e 7 horas (D) de aplicação da água residuária da lavagem e despulpagem dos frutos do cafeeiro conilon.

Esta figura mostra o avanço dos solutos com o passar do tempo. Dois aspectos, importantes, merecem destaque: o primeiro deles refere-se ao avanço máximo do soluto ao cabo de uma, duas, três e sete horas, quando se verificam traços do soluto a 20, 50, 70 e 100 cm de profundidade, respectivamente; o segundo refere-se ao efeito do fator de retardamento inerente ao solo. É notório nas curvas de concentração residente que os solutos avançaram mais no perfil do solo cujo fator de retardamento é menor (Figura 4 e Tabela 4).

Estes aspectos alertam para os perigos de contaminação de lençol freático ao fazer aplicações

maciças de ARC em solos de baixa capacidade de adsorção, ou seja, baixo fator de retardamento, como é o caso do solo aluvial.

Conclusão

Os valores mais elevados dos fatores de retardamento verificados para o latossolo, seguidos do argissolo e aluvial, indicam maior retenção dos íons potássio, sódio, cálcio e magnésio neste solo.

Os valores dos coeficientes dispersivos-difusivos não apresentaram tendência entre os solos aluvial, argissolo e latossolo.

As concentrações residentes dos solutos presentes

na água residuária da lavagem e despolpa do café conilon, simuladas para perfis de solos de 100 cm de profundidade e intervalos de tempo de uma, três, cinco e sete horas, confirmam a menor mobilidade ou maior retenção no latossolo, seguido do argissolo e aluvial.

Referências

- APHA-American Public Health Association – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. New York: APHA, WWA, WPCR, 19. ed., 1995.
- DODDS, G.T. et al.. Predicting nitrate-N leaching under different tillage systems using LEACHM and NTRM. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v. 41, n. 4, p. 1025-1034, 1998.
- COSTA, S.N. et al. Mobilidade de nitrato em coluna de solo sob condições de escoamento não permanente. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 190-194, 1999.
- EMBRAPA. *Manual de análises de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa/SNCS, 1997.
- FERREIRA, P.A. *Manejo de água planta em solos salinos*. 2001. Apostila Acadêmica (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- MATOS, A.T. *Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão – difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo, em solos do município de Viçosa*. 1995. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.
- MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Modelo para simulação dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 235-241, 2002.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Missible displacement: III Theoretical considerations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 26, p. 216-211, 1962.
- PARKER, J.C.; GENUCHTEN, M.T.V. *Determining Transport Parameters from Laboratory and Field Tracer Experiments*. Virginia: Agric. Exp. Stn. Bull. 1984.
- PREVEDELLO, C.L. *Física de solos com problemas resolvidos*. Curitiba: SAEFAS. 1996
- RUMP, H.H.; KRIST, H. *Laboratory manual for the examination of water, waste water, and soil*. Weinheim: VCH, 1992.
- GENUCHTEN, M.T.V.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 67, p. 1025-1054, 1986.

Received on June 20, 2005.

Accepted on November 18, 2005.