

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias
v.1, n. único, p.81-87, out.-dez., 2006
Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br
Protocolo 58 - 15/12/2006

Mônica L. Milfont¹

Antônio C. D. Antonino¹

Jean M. F. Martins²

André M. Netto¹

Marcus M. Corrêa³

Caracterização hidrodispersiva de dois solos do Vale do Rio São Francisco

RESUMO

A caracterização hidrodispersiva de um Argissolo Amarelo e um Vertissolo, ambos da região do Vale do São Francisco, foi realizada em condições de laboratório por meio de ensaios de deslocamento de líquidos miscíveis em colunas de solo. Os ensaios compreenderam no deslocamento de um pulso de 1 volume de poros de solução de traçador da água, o KBr, a 0,1 M, sob condições de saturação e fluxo em regime permanente. Os parâmetros hidrodispersivos (D e R) foram obtidos utilizando-se o ajuste das soluções analíticas da equação da convecção-dispersão (CDE) e de duas regiões de água, móvel e imóvel, MIM (D, R, β e ω) aos pontos das curvas de eluição experimentais. A dispersividade do Vertissolo é maior que a do Argissolo Amarelo devido à textura e à estrutura. O fator de retardo (R) traduz a interação do traçador com os solos: existência de exclusão aniônica no Vertissolo e retenção no Argissolo Amarelo pela presença de óxido de ferro (goethita). O modelo CDE apresenta melhor desempenho que o MIM na descrição do transporte do traçador nas colunas com ambos os solos, indicando a ausência de duas regiões de água móvel e imóvel, ou seja, do não-equilíbrio físico.

Palavras-chave: deslocamento miscível, curva de eluição, modelo CDE e MIM, KBr

Hydrodispersive characterization of two soils of São Francisco River Valley

ABSTRACT

The hydrodispersive characterization of two soils: an Yellow Ultisol and a Vertisol, both from the region of São Francisco Valley, was performed through displacement experiments in soil column in the laboratory. The experiment consisted of displacement of a pulse of 1 pore volume of a 0.1 M KBr solution in saturated soil column under steady-state flow conditions. The hydrodispersive parameters (D, R) were obtained by fitting the analytical solution of the convection-dispersion equation (CDE) and the two-region transport model - MIM (D, R, β and ω) for the points of the experimental breakthrough curve. The soil dispersivity was found to be higher in the Vertisol than in the Yellow Ultisol, because of the higher aggregation of this soil. The retardation factor (R) represented the tracer interactions with the soils: anionic exclusion in the Vertisol and bromide retention in the Yellow Ultisol, due to the presence of iron-oxydes (Goethite). The CDE model presented a better performance than the MIM model, for fitting the bromide breakthrough curves in both soil columns, suggesting the absence of immobile water in the Yellow Ultisol and the Vertisol.

Key words: miscible displacement, breakthrough curve, models CDE and MIM, KBr

¹ Dept° de Energia Nuclear, UFPE, mmilfonte@clink21.com.br; acda@ufpe.br; amnetto@ufpe.br

² Laboratoire d' Etude de Transferts en Hydrologie et Environnement, CNRS, jean. martins@hmg.inpg.fr

³ Dept° de Tecnologia Rural, UFRPE, metri@ufrpe.br

INTRODUÇÃO

A compreensão dos mecanismos envolvidos no transporte e interações de compostos químicos nos solos é de fundamental importância para a prevenção e controle dos impactos ambientais causados pelo uso indiscriminado no solo. Experimentos em colunas de solo, conduzidos em laboratório, vêm sendo uma ferramenta fundamental para avaliar o comportamento do transporte e das interações de compostos químicos em diferentes solos.

Os parâmetros hidrodispersivos exerceram uma importância significativa na caracterização do movimento de solutos no solo. Os primeiros trabalhos com transporte de solutos tiveram início na década de sessenta (Nielsen & Biggar, 1961); desde então, o número de pesquisas tem crescido consideravelmente e com elas o número de situações experimentais e circunstâncias sobre as quais a modelagem matemática é aplicada. A literatura nacional cita alguns estudos envolvendo transporte de solutos e outras substâncias químicas em condições de laboratório (Cunha et al., 1996; Schindwein, 1998; Oliveira et al., 1999) e de campo (Bastos et al., 2005; Castro et al., 2005 e Dynia et al., 2006). No entanto, são poucos os trabalhos existentes relacionados aos solos do semi-árido do Nordeste do Brasil (Leite & Skogley, 1977; Costa et al., 2006).

Dentre os vários modelos teóricos, o modelo convecção-dispersão (CDE) vem sendo utilizado para descrever o transporte de solutos em condições controladas de laboratório e no campo. No caso de escoamento de água em solos heterogêneos, van Genuchten e Wierenga (1976) incorporaram ao modelo CDE o conceito de água móvel e imóvel desenvolvido por Coats e Smith (1964), resultando no modelo conhecido como modelo de não-equilíbrio físico ou MIM. Este modelo tem se mostrado superior ao modelo CDE na representação do transporte em solos estruturados devido ao fluxo preferencial (Seyfried & Rao, 1987).

É comum, em estudos de transporte de solutos, a utilização de traçadores químicos, produtos cuja interação com o solo é insignificante e apresentam facilidade na determinação química. Os traçadores são considerados ferramenta útil para simular a mobilidade de produtos que, de modo similar, são muito móveis porém de difícil quantificação, proporcionando a estimativa dos parâmetros hidrodispersivos para os poluentes com maiores poderes de contaminação.

O objetivo deste trabalho consiste em se avaliar os parâmetros hidrodispersivos de um Argissolo Amarelo e de um Vertissolo coletados nas estações experimentais de Bebedouro, PE, e Mandacaru, BA, ambos pertencentes à Embrapa Semi-Árido, utilizando-se o traçador Br, e comparar o desempenho dos modelos CDE e MIM.

MATERIAL E MÉTODOS

Equação da convecção-dispersão (CDE)

O transporte de solutos em um meio poroso pode ser conceitualizado mediante o modelo convecção-dispersão (CDE). Na sua forma adimensional, esta equação apresenta-se como:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

em que:

C é a concentração de soluto expressa em massa de soluto por volume de solução [ML^{-3}], D é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica [$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$], v é a velocidade média da água nos poros [L T^{-1}], z é a coordenada espacial [L], t é o tempo [T], e R é o fator de retardo, dado por:

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (2)$$

em que:

K_d é o coeficiente de distribuição linear [$\text{L}^3 \text{M}^{-1}$], representando as concentrações distribuídas entre a fase líquida (C) e a fase adsorvida (S), θ é a umidade volumétrica [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$] e ρ_d é a massa específica do solo [ML^{-3}].

Equação da convecção-dispersão a duas regiões de água, móvel e imóvel (MIM)

O modelo a duas regiões de água assume que a fase líquida pode ser particionada em duas regiões, móvel e imóvel, sendo a troca entre as duas regiões modelada por um processo de cinética de primeira ordem (van Genuchten & Wagenet, 1989). Na forma adimensionalizada, esta equação é descrita como:

$$\beta R \frac{\partial C_1}{\partial T} + (1-f)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial Z} \quad (3)$$

$$(1-\beta)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \omega(C_1 - C_2) \quad (4)$$

em que:

C_1 e C_2 são, respectivamente, as concentrações do traçador nas regiões móvel e imóvel; $T = vt/L$ o tempo, $Z = x/L$ a coordenada espacial adimensionalizada, $P = vL/D$ o número de Peclet; f a fração de água móvel; $(1-f)$ a fração de água imóvel; β o coeficiente de partição entre as duas regiões; ω o número de Damköhler, representando o coeficiente de transferência de massa adimensionalizado, para o modelo de duas regiões; β e ω são definidos como:

$$\beta = \frac{\theta_m + \rho_d f K_d}{\theta + \rho_d K_d} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\alpha \ell}{v_m \theta_m} = \frac{\alpha \ell}{q} \quad (6)$$

em que:

α é o coeficiente de transferência de massa entre as fases móvel e imóvel [T^{-1}], ℓ o comprimento da coluna [L], θ_m umidade volumétrica da fase móvel [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$] e v_m a velocidade na fase móvel [L T^{-1}].

As condições de contorno para (1), (3) e (4) são:
Condição inicial:

$$C_1(Z, 0) = C_2(Z, 0) = 0 \quad (7)$$

Condições de fronteira superior e inferior, respectivamente:

$$-\frac{1}{P} \frac{\partial C_1}{\partial Z} + C_1 = \begin{cases} 1 & \text{para } 0 < T \leq T_0 \\ 0 & \text{para } T > T_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial Z}(\infty, T) = \frac{\partial C_2}{\partial Z}(\infty, T) = 0 \quad (9)$$

Os demais parâmetros relacionados com o não-equilíbrio físico (D , R , β e ω) foram determinados pelos ajustes das curvas de eluição.

Solo

Os solos foram coletados de regiões com plantio de manga (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins) irrigada nas estações experimentais de Bebedouro, PE, e Mandacaru, BA, ambas pertencentes à Embrapa Semi-Árido, localizadas no Vale do São Francisco, no Nordeste do Brasil. O clima da região é, de acordo com Köppen, BSw, muito quente e semi-árido, com temperatura média do ar de 26,2°C ($\pm 0,9$) e precipitação pluviométrica anual de 535,8 mm ($\pm 180,3$), concentrada em uma estação chuvosa entre janeiro e abril (Azevedo et al., 2003). Os solos foram classificados como Argissolo Amarelo e Vertissolo. As amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0 - 0,20 m); após a coleta, os solos foram secos ao ar, destorroados e passados em peneira de 2 mm e, em seguida, armazenados a temperatura ambiente. A análise granulométrica foi realizada utilizando-se o método da pipeta, as frações de argila e de silte foram determinadas por sedimentação, após dispersão com hexametáfosfato de sódio, e a fração areia foi obtida por peneiramento (Loveland & Whalley, 1991).

A análise mineralógica para identificação das fases cristalinas presentes no Argissolo Amarelo e no Vertissolo, foi realizada por difratometria de raios X (DRX) pelo método do pó, usando-se um difratômetro Bruker D5000 equipado com detector de estado sólido Si(Li) Kevex. A análise dos difratogramas permitiu a identificação dos principais minerais cristalizados; para o Argissolo Amarelo foram quartzo, caulinita, calcita, goethita e feldspato potássico e, para o Vertissolo foram quartzo, caulinita e feldspato potássico.

As análises químicas dos solos foram realizadas de acordo com a metodologia da EMBRAPA (1997). A capacidade de troca de cátions (CTC) foi determinada utilizando-se o método do acetato de sódio/acetato de amônio com dosagem por fotometria de chama (Chapman, 1965).

Os solos apresentaram a seguinte classificação textural, segundo a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: o Argissolo Amarelo foi classificado como areia franca e o Vertissolo como franco-argiloso. As principais características físicas e químicas desses solos são apresentadas na Tabela 1 e as curvas granulométricas na Figura 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do Argissolo Amarelo e do Vertissolo (profundidade de 0 a 20 cm)

Table 1. Physical and chemical properties of the Yellow Ultisol and the Vertisol (0 to 20cm layer)

| Solo | Argila | Silte | Areia | Carbono | Nitrogênio | CTC | pH (H ₂ O) |
|-------------------|--------|-------|-------|-----------|-----------------------|-------|---------------------------------------|
| | | | | Orgânico | (g kg ⁻¹) | | (cmol _c kg ⁻¹) |
| Argissolo Amarelo | 70 | 94 | 836 | 6,9 ± 0,1 | 0,6 | 3,38 | 6,75 (6,85) |
| Vertissolo | 481 | 223 | 296 | 6,4 ± 0,1 | 0,8 | 19,86 | 7,30 (6,85) |

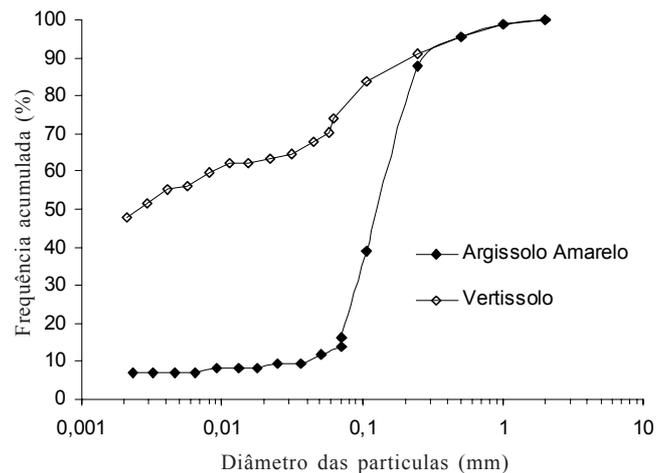


Figura 1. Curva granulométrica do Argissolo Amarelo e do Vertissolo

Figure 1. Particle size distribution curves of the Yellow Ultisol and the Vertisol

Experimento

Os dispositivos experimentais e as realizações dos ensaios adotados neste estudo foram amplamente utilizados em trabalhos anteriores (Gaudet et al., 1977; Martins and Mer-moud, 1999; Gaber et al., 1995; Costa et al., 2006). Essas técnicas tornam possível caracterizar os processos de transferência de água e de solutos pela análise detalhada das curvas de eluição experimentais.

O dispositivo experimental utilizado para o estudo de transferência de solutos sob condição de saturação, foi composto de colunas de solo em acrílico com 20 cm de comprimento e 5,05 cm de diâmetro interno; uma bomba peristáltica com doze canais de marca Ismaltec; um barrilete de 20 L de solução iônica; recipiente contendo o traçador KBr a 0,1 M; três válvulas de três vias; um coletor de frações de marca Isco Retriever com capacidade para 116 tubos, para trabalhar com quatro colunas de solo, simultaneamente; um condutivímetro digital de marca Digimed DM-31; capilares de borracha flexíveis com 2,38 mm de diâmetro interno e balanças digitais para determinar a massa de solução deslocadora aplicada nas colunas de solo.

O acondicionamento do solo na coluna foi realizado em camadas de aproximadamente 2 cm, levemente compactadas. As colunas com o Argissolo Amarelo foram montadas com uma massa específica aparente próxima a do campo (1,63 g.cm⁻³) e as colunas contendo o Vertissolo (1,30 g.cm⁻³), de acordo com

dados fornecidos pela Embrapa Semi-Árido; após a montagem, as colunas foram saturadas com solução iônica de 3 mM de CaCl_2 , próxima à da solução do solo, para que os colóides do solo não sofressem desestabilização comprometendo a permeabilidade devido à diminuição da força iônica (Johnson et al., 1996). A alimentação da coluna de solo com a solução deslocadora foi realizada utilizando-se a bomba peristáltica conectada à parte superior da coluna, sendo os efluentes da solução coletados na base da coluna, através de um coletor de frações. A solução deslocadora consistiu em aplicar um pulso de um volume de poro de solução traçadora composta de 0,1M de KBr misturados à solução iônica de 3mM de CaCl_2 . Efetuou-se a medida da condutividade elétrica da solução traçadora efluente (KBr) com um condutivímetro.

A alimentação das colunas de solo com a solução traçadora foi efetuada em regime estacionário e de fluxo descendente. Os ensaios consistiram, basicamente, em se deslocar certo volume de líquido V_0 em uma coluna de solo, por meio de uma solução contendo o traçador de concentração C_0 , a uma velocidade média da solução v . O soluto se difunde ao mesmo tempo em que se infiltra a velocidades variáveis através dos poros do solo. Segue-se a progressão do avanço do soluto medindo-se a concentração C do efluente ao longo do tempo. A evolução da razão C/C_0 em função do número de volumes de poros do efluente coletado fornece a curva de eluição.

Os ajustes das curvas de eluição do traçador com ambos os modelos (CDE e MIM) permite a caracterização dos parâmetros hidrodispersivos dos solos.

Estimativa dos parâmetros

Obteve-se a determinação dos parâmetros hidrodispersivos com o programa CXTFIT 2.0 desenvolvido por Toride et al. (1995).

Os valores do tempo de aplicação do pulso (t_0) e da densidade de fluxo de Darcy (q) foram medidos durante a realização dos ensaios. A velocidade média da água nos poros (v) foi calculada usando-se a relação $v = q/\theta_s$; os demais parâmetros R e D (modelo CDE) e R , D , β e ω (modelo água móvel e imóvel) foram determinados pelos ajustes das curvas de eluição.

O valor do fator de retardo, R , foi determinado, inicialmente utilizando o método dos momentos.

O momento de ordem zero, $m_0 = \int_0^\infty f(t)dt$, corresponde à área sob a curva experimental, representando a massa de

soluto recuperada quando da eluição na coluna de solo. É possível calcular o balanço de massa fazendo-se a relação entre o momento de ordem zero e o tempo de aplicação do pulso. O momento de ordem 1, $m_1 = \int_0^\infty t.f(t)dt$, corresponde

à posição do centro de gravidade da curva de eluição. A relação entre o momento de ordem 1, m_1 , e o momento de ordem zero, m_0 , permite calcular o tempo de permanência do soluto (t_p). O fator de retardo, R , é calculado a partir da seguinte expressão: $R = m_1 - 1/2t_0$, onde t_0 representa o tempo de aplicação do pulso.

O valor do fator de retardo, R , determinado pelo método dos momentos, serviu como estimativa inicial para a entrada no CXTFIT 2.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores das propriedades físico-hídricas, determinadas experimentalmente nas colunas de solo, e o tempo de aplicação da solução traçadora de KBr para os ensaios de deslocamento miscível do traçador. Os ensaios foram realizados considerando duas vazões, 0,4 e 1,6 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$, com quatro repetições, para o Argissolo Amarelo e o Vertissolo.

As curvas de eluição do KBr obtidas experimentalmente e ajustadas com os modelos CDE e MIM para o Vertissolo e o Argissolo Amarelo nas vazões de 0,4 e 1,6 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$, são apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Observa-se, para ambos os solos, que para os ensaios as curvas apresentaram simetria (forma de sino), tanto na parte ascendente como na parte descendente da curva, demonstrando a alta eficiência do íon Br^- como traçador químico pela baixa interação com os sítios de adsorção do solo.

O valor do fator de retardo calculado para o íon brometo no Argissolo Amarelo foi de 1,02 a 1,08 (Figura 3A e 3B), ligeiramente superior à unidade, indicando que os íons do brometo estão sujeitos a uma ligeira adsorção nos minerais do solo, fenômeno este já descrito para outros ânions, especialmente para o nitrato, o cloreto ou o fluoreto em Andossolos ou em Latossolos temperados, isto é, solos ricos em óxidos de ferro (Katou et al., 1996, Duwig et al. 1999, Bégin et al., 2003), cujos valores de R variando entre 1,1 a 1,3 foram observados para o nitrato. Contrariamente ao Vertissolo, o Argissolo Amarelo, utilizado no presente trabalho, é rico em

Tabela 2. Características das colunas de solos e condições experimentais utilizados nos ensaios de deslocamento miscível do KBr

Table 2. Characteristics of the soil columns and experimental conditions used in the KBr tracing assays

| Solo | ρ_d (g cm^{-3}) | V_p (cm^3) | θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | q (cm h^{-1}) | v (cm h^{-1}) | T_{pulso} (h) |
|---|------------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Q = 0,4 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ | | | | | | |
| Argissolo Amarelo | 1,62 ± 0,005 | 154,48 ± 1,003 | 0,38 ± 0,003 | 1,21 ± 0,022 | 3,15 ± 0,073 | 6,41 ± 0,143 |
| Vertissolo | 1,27 ± 0,044 | 205,04 ± 1,525 | 0,51 ± 0,004 | 1,19 ± 0,032 | 2,33 ± 0,076 | 8,67 ± 0,282 |
| Q = 1,6 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ | | | | | | |
| Argissolo Amarelo | 1,63 ± 0,026 | 153,64 ± 4,076 | 0,38 ± 0,011 | 4,85 ± 0,059 | 12,80 ± 0,203 | 1,58 ± 0,025 |
| Vertissolo | 1,28 ± 0,005 | 205,75 ± 0,709 | 0,51 ± 0,002 | 4,76 ± 0,078 | 9,33 ± 0,169 | 2,17 ± 0,039 |

(x ± s): média ± desvio padrão da média, para 4 repetições

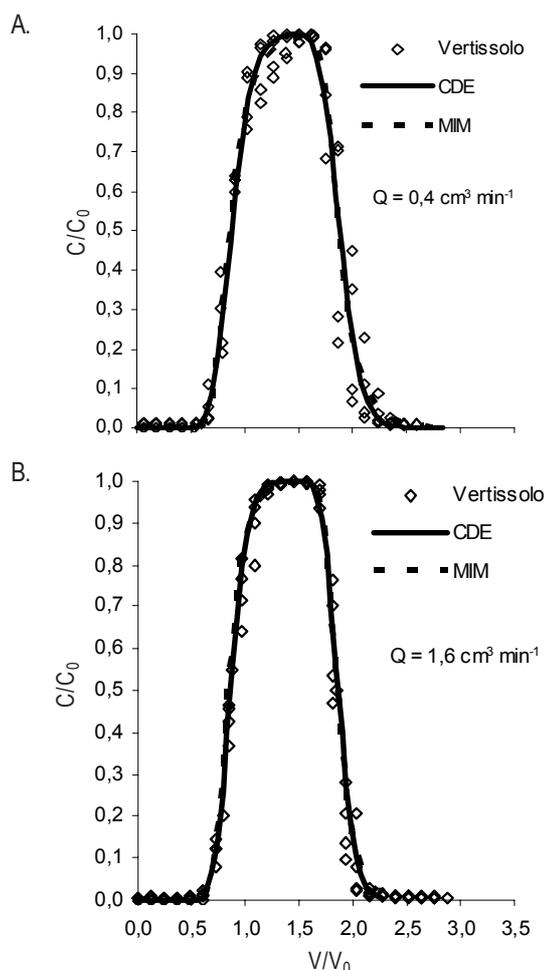


Figura 2. Curvas de eluição do KBr em colunas com o Vertissolo saturadas, em vazões de 0,4 cm³ min⁻¹ (A) e de 1,6 cm³ min⁻¹ (B)

Figure 2. Breakthrough curves of KBr-tracer in saturated columns of the Vertisol for water flows of 0.4 (A) and 1.6 (B) cm³ min⁻¹

óxidos de ferro explicando, assim, a ligeira retenção do brometo.

Tanto o modelo CDE (dois parâmetros a ajustar: D e R) como o MIM (quatro parâmetros a ajustar: D, R, β e ω) descreveram adequadamente as curvas de eluição do KBr, com coeficientes de determinação que variaram de 96,4 a 98,5% e 96,7 a 98,6%, respectivamente (Tabelas 3 e 4). Os parâmetros estimados com o modelo CDE foram mais precisos que com o MIM, como mostram os desvios padrão dessas estimativas.

Tabela 3. Parâmetros hidrodispersivos obtidos pelo ajuste CDE a partir dos ensaios de deslocamento miscível da solução de KBr

Table 3. Soil hydrodynamic parameters obtained by fitting the KBr breakthrough curves with the CDE model

| Solo | D (cm² h⁻¹) | R | r² | Pe |
|--------------------------|---------------|---------------|------|-----|
| Q = 0,4 cm³ min⁻¹ | | | | |
| Argissolo Amarelo | 0,513 ± 0,049 | 1,019 ± 0,004 | 0,98 | 123 |
| Vertissolo | 0,696 ± 0,092 | 0,892 ± 0,007 | 0,97 | 67 |
| Q = 1,6 cm³ min⁻¹ | | | | |
| Argissolo Amarelo | 2,143 ± 0,298 | 1,084 ± 0,006 | 0,96 | 120 |
| Vertissolo | 1,939 ± 0,183 | 0,870 ± 0,004 | 0,98 | 96 |

(x + s): média desvio padrão da média, para 4 repetições

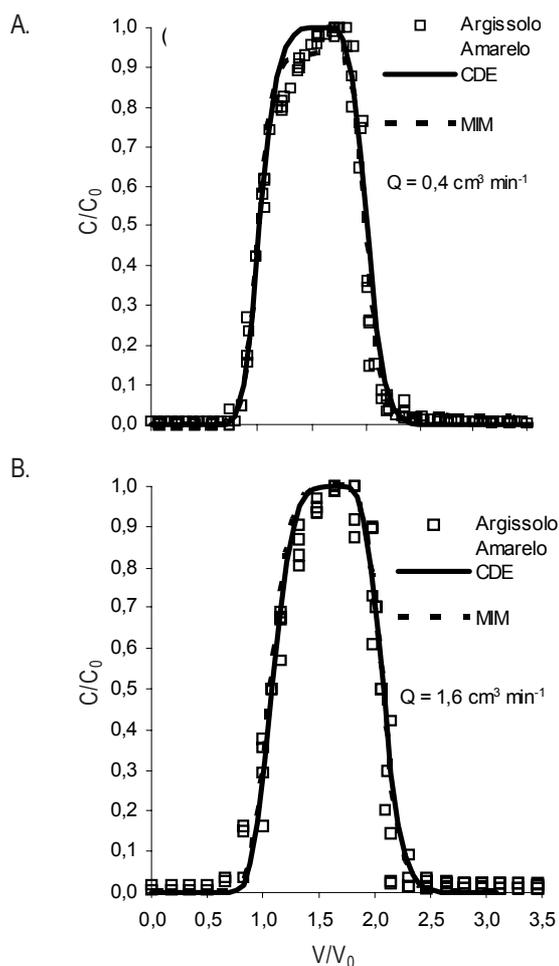


Figura 3. Curvas de eluição do KBr em colunas com o Argissolo Amarelo saturadas, em vazões de 0,4 cm³ min⁻¹ (A) e de 1,6 cm³ min⁻¹ (B)

Figure 3. Breakthrough curves of KBr-tracer in saturated columns of the Yellow Ultisol for water flows of 0.4 (A) and 1.6 (B) cm³ min⁻¹

Tabela 4. Parâmetros hidrodispersivos obtidos pelo ajuste MIM a partir dos ensaios de deslocamento miscível da solução de KBr

Table 4. Soil hydrodynamic parameters obtained by fitting the KBr breakthrough curves with the MIM model

| Solo | D (cm² h⁻¹) | R | β | ω | r² | Pe |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------|-----|
| Q = 0,4 cm³ min⁻¹ | | | | | | |
| Argissolo Amarelo | 0,341±0,037 | 1,235±0,099 | 0,819±0,064 | 0,087±0,013 | 0,99 | 185 |
| Vertissolo | 0,282±0,192 | 0,905±0,010 | 0,903±0,064 | 0,767±0,945 | 0,97 | 165 |
| Q = 1,6 cm³ min⁻¹ | | | | | | |
| Argissolo Amarelo | 2,055±0,317 | 1,084±0,902 | 0,999±0,978 | 10⁻⁵ ± 33,68 | 0,97 | 125 |
| Vertissolo | 1,135±0,688 | 0,878±0,006 | 0,941±0,067 | 0,545±1,111 | 0,99 | 164 |

(x + s): média desvio padrão da média, para 4 repetições

Para o modelo MIM, na maior parte das estimativas o valor do desvio padrão é da mesma ordem de grandeza ou maior que o valor da estimativa; portanto, quando vários parâmetros são otimizados simultaneamente, o problema de não-singularidade surge devido à correlação entre parâmetros e, neste caso, deduzir significados físicos a partir de parâmetros incertos obtidos com o modelo MIM pode ser extremamente arriscado.

Em estudos de deslocamento miscível utilizando-se amostras deformadas, não se tem verificado o não-equilíbrio físico em virtude da destruição da estrutura do solo pelo destorroamento e peneiramento do solo (Nkedi-Kizza et al., 1989); portanto, face à constatação da boa qualidade nos ajustes das curvas de eluição de KBr e homogeneidade dos valores dos parâmetros estimados utilizando-se o modelo CDE, pode-se inferir na ausência de duas regiões de água móvel e imóvel (não-equilíbrio físico) para ambos os solos estudados, caso em que, para as condições experimentais, o modelo CDE demonstrou ser mais eficiente em descrever o comportamento do íon Br⁻.

Observa-se, na Tabela 3, que os valores do coeficiente de dispersão hidrodinâmica, D, como previsto, foram maiores para os ensaios com a maior vazão em ambos os solos. O número de Péclet mostra que o processo predominante em todos os ensaios foi a convecção ($Pe > 10$, Novy Quadri, 1993). Segundo Renard et al. (1977), o coeficiente de dispersão hidrodinâmica é um dos parâmetros mais sensíveis aos erros de medidas das frações de concentrações coletadas, bem como a variação na distribuição das velocidades da água nos poros.

A dispersividade, relação entre a contribuição da convecção e da dispersão no transporte de soluto, calculada a partir da expressão $\lambda = D/v$, foi de $0,17 + 0,03$ cm e de $0,25 + 0,02$ cm, respectivamente para Argissolo Amarelo e o Vertissolo. Embora os fluxos empregados para ambos os solos sejam aproximadamente os mesmos, o que torna os valores da dispersividade diferentes são a textura e a estrutura de ambos os solos (Tabela 1 e Figura 1), ou seja, maior teor de argila e de volume de poros no Vertissolo.

CONCLUSÕES

A dispersividade do Vertissolo é maior que a do Argissolo Amarelo.

O fator de retardo, R, traduz a interação do traçador com os solos; existência de exclusão aniônica no Vertissolo e retenção no Argissolo pela presença de óxido de ferro (goethita).

O modelo CDE apresenta melhor desempenho que o MIM na descrição do transporte do traçador nas colunas com ambos os solos, indicando a ausência de duas regiões água móvel e imóvel, ou seja, do não-equilíbrio físico.

LITERATURA CITADA

- Azevedo, P.V.; Bernardo, S.B.S.; Silva, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, p.241-254, 2003.
- Bastos, C.J.; Rigitano, R.L.O.; Lima, J.M.; Castro, N.R.A. Lixiviação do fungicida triadimenol em macrolisímetros de latossolos da região de Lavras - MG. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.29, n.4, p.767-774, 2005.
- Bégin, L.; Fortin, J.; Caron, J. Evaluation of the fluoride retardation factor in unsaturated and undisturbed soil columns. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.67, p.1635-1646, 2003.
- Bower, C.A.; Hatcher, J.T. Simultaneous determination of surface area and cation-exchange capacity. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v.30, p.525-527, 1966.
- Castro, N.R.A.; Rigitano, R.L.O.; Lima, J.M.; Bastos, C.J. Lixiviação de aldicarbe em macrolisímetros de dois Latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Lavras., v.40, n.8, p.803-810, 2005.
- Chapman, H.D. Cation exchange capacity. In: Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E.; (ed.) *Clark, F.E. Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.891-901.
- Choudhury, E.N.; Millar, A.A. Retenção e movimento de água em Latossolo Vermelho-Amarelo irrigado de Petrolina, PE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.7, n.1, p.21-26, 1983.
- Coats, K.H.; Smith, B.D. Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Society of Petroleum Engineering Journal*, Richardson, v.3, p.49-52, 1964.
- Costa, C.T.; Antonino, A.C.D.; Netto, A.M. Ensaios de deslocamento de líquido miscível na determinação dos parâmetros hidrodispersivos de um solo aluvial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.11, n.2, p.111-122, 2006.
- Cunha, R.C.A.; Camargo, O.A.; Kinjo, T. Eluição de duas fontes de zinco aplicadas em horizontes superficiais de um podzólico e de um latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, p.371-378, 1996.
- Duwig, C.; Becquer, T.; Clothier, B.E.; Vauclin, M. A simple dynamic method to estimate anion retention in an unsaturated soil. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, Paris, v.328, p.759-764, 1999.
- Dynia, J.F.; Souza, M.D.; Boeira, R.C. Lixiviação de nitrato em Latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.41, n.5, p.855-862, 2006.
- El-Swaify, S.; Coleman, N.T.; Bredell, G.; Arca, M. Negative adsorption by vermiculite: salt exclusion from interlayer volumes. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v.31, p.464-466, 1967.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Gaber, H.M.; Inskeep, W.P.; Comfort, S.D.; Wraith, J.M. Nonequilibrium transport of atrazine through intact soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.59, p.60-67, 1995.
- Gaudet, J.P.; Jegat, h.; Vachaud, G.; Wierenga, P.J. Solute transfer with exchange between mobile and stagnant water, through unsaturated sand. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.41, p.665-671, 1977.

- Kamra, S.K.; Lennartz, B.; van Genuchten, M.Th.; Widmoser, P. Evaluating non-equilibrium solute transport in small soil columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, Amsterdam, v.48, p.189-212, 2001.
- Katou, H.; Clothier, B.E.; Green, S.R. Anion transport involving competitive adsorption during transient water flow in an Andisol. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, p.1368-1375, 1996.
- Leite, J.P.; Skogley, E.O. Retention and leaching of copper and zinc in "tabuleiro" soil as influenced by nutrient carrier. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.12, p.27-34, 1977.
- Lennartz, B.; Meyer-Windel, S. The role of immobile water in unsaturated substrates. *Hydrogeology*, Heidelberg, v.4, p.75-83, 1995.
- Loveland, P.J.; Whalley, W.R. Particle size analysis. In: K.A. Smith And Ch.E. Mullis (ed.). *Soil analysis: physical methods*, New York : Marcel Dekker, 1991, p. 271-328.
- Martins, J.M.F.; Mermoud, A. Transport of rimsulfuron and its metabolites in an alluvial soil. *Chemosphere*, New York, v.38, p. 601-616, 1999.
- Melamed, R.; Jurinak, J.J.; Dudley, L.M. Anion exclusion-pore water velocity interaction affecting transport of bromide through an Oxisol. *Science Society of America Journal*, Madison, v.58, p.1405-1410, 1994.
- Nkedi-Kizza, P.; Brusseau, M.L.; Rao, P.S.C.; Hornsby, A.G.A. Nonequilibrium sorption during displacement of hydrophobic organic chemicals and ^{45}Ca through soil column with aqueous and mixed solvents, *Environmental Science Technology*, Columbus, v.23, n.7, p.814-820, 1989.
- Nielsen, D.R.; Biggar, J.W. Miscible displacement in soil: I. Experimental information. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v.25, p.1-5, 1961.
- Novy-Quadri, M.G., Transferts de solutés dans les sol saturés et non saturés. Application au pentachlorophenol. Université Joseph Fourier, Grenoble I, França, 1993, 204p. Tese Doutorado
- Oliveira, L.F.C.; Carvalho, D.F.; Ferreira, P.A. Comparação de metodologias de determinação do coeficiente de dispersão para o cloreto de cálcio em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, p.7-10, 1999.
- Renard, J.L.; Calvet, R.; Tournier, C.; Hubert, A. Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal dans un milieu poreux saturé. *Annales Agronomiques*, Paris, v.28, p.47-64, 1977.
- Seyfried, M.S.; Rao, P.S.C. Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: preferential flow effects. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 51, p.1434-1444, 1987.
- Schindwein, S.L. Parametrização do transporte dispersivo de solutos em solos estruturados: heterogeneidade do meio, percurso de transporte e modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, p.173-179, 1998.
- Schulin, R.; Wierenga, P.J.; Fluhler, H.; Leuenberger, J. Solute transport through a stony soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.51, p.36-42, 1987.
- Toride, N.; Leij, F.J.; van Genuchten, M.Th. The CXTFIT code for estimating transport parameter from laboratory or field tracer experiments. Version 2.0. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, ARS-USDA, CA., 1995. 131p.
- van Genuchten, M.Th., Wagenet, R.J. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.53, p.1303- 1310, 1989.
- van Genuchten, M.Th., Wierenga, P.J. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.40, p.473-480, 1976.
- Veeh, R.H.; Inskeep, W.P.; Roe, F.L.; Ferguson, A.H. Transport of chloresulfuron through soil columns. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.23, p.542-549, 1994.

