

JONATHAS BATISTA GONÇALVES SILVA

**TECNOLOGIA INOVADORA PARA RETIRADA DE
AMOSTRAS DE SOLO COM ESTRUTURA INDEFORMADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

JONATHAS BATISTA GONÇALVES SILVA

**TECNOLOGIA INOVADORA PARA RETIRADA DE
AMOSTRAS DE SOLO COM ESTRUTURA INDEFORMADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 16 de fevereiro de 2009.

Prof. Hugo Alberto Ruiz

Prof. Rubens Alves de Oliveira

Prof. Alisson Carraro Borges

Prof. Antonio Teixeira de Matos

(Coorientador)

Prof. Paulo Afonso Ferreira

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, meu grande amigo, por seu eterno cuidado, concedendo-me a graça de realizar mais este sonho.

Aos meus pais Jeremias e Emília, pelo o amor e o carinho. Melhores pais do mundo.

À Debora e Matheus, meus irmãos e amigos. Amo muito vocês.

À minha esposa Renata, pelo o amor, carinho e respeito.

Ao prof. Paulo Afonso Ferreira, por me encorajar nos momentos em que achei que não daria certo, pela paciência e, sobretudo, pelos valiosos conselhos e ensinamentos.

À Angélica, Gustavo e Marcelo, minha segunda família.

Aos grandes amigos da república dos Garbosos e da IBNV, pelo convívio e amizade.

Aos professores Antonio Teixeira de Matos e Paulo Roberto Cecon, pelo apoio e sugestões no decorrer do trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, responsáveis por minha formação acadêmica e crescimento profissional.

Aos membros da banca examinadora desta dissertação, pela participação e valiosa contribuição.

À Adilson Libânio, Ari Viana, Marcelo Lino, Sebastião de Paula e Aloízio, importantes colaboradores no desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade em realizar a graduação e o mestrado.

BIOGRAFIA

JONATHAS BATISTA GONÇALVES SILVA, filho de Jeremias Soares da Silva e Emília Batista Gonçalves Silva, nasceu em 20 de maio de 1984, na cidade de Inhapim, Minas Gerais.

Em 2002, iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em março de 2007.

Em março de 2007, ingressou no programa de Pós-graduação em nível de mestrado, em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Amostras de solo	4
2.2. Amostradores de solo	5
2.3. Transporte de solutos	6
2.4. Fator de retardamento, coeficiente dispersivo-difusivo e coeficiente de distribuição	9
2.5. Condutividade hidráulica	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Desenvolvimento do amostrador de solo com estrutura indeformada	14
3.1.1. Componentes do amostrador de solo com estrutura indeformada	14
3.1.2. Versões preliminares do amostrador de solo com estrutura indeformada	19
3.2. Transporte de solutos em colunas de solo	21
3.2.1. Caracterização física e química da área	21
3.2.2. Amostragem dos solos com estrutura indeformada	22
3.2.3. Amostras de solo destorroado	23
3.2.3. Procedimento laboratorial	23
3.2.4. Simulações da concentração residente dos solutos	27
3.3. Condutividade hidráulica	27
3.4. Análise estatística dos dados	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Amostrador de solo com estrutura indeformada	31
4.2. Parâmetros de transporte de solutos no solo	34
4.2.1. Fluxo e velocidade de escoamento	34
4.2.2. Fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo-difusivo (D) e coeficiente de distribuição (K_d)	35
4.3. Concentrações residentes, simuladas, em perfis de 1,0 m de profundidade	47
4.4. Condutividade hidráulica	49
5. CONCLUSÕES	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	- Área normal à direção do escoamento	L^2
A_t	- Área da seção transversal da coluna	L^2
C	- Concentração do soluto na solução do solo	$M L^{-3}$
C_e	- Concentração do soluto nos efluentes	$M L^{-3}$
C_r	- Concentração residente do soluto no solo	$M L^{-3}$
C_0	- Concentração dos íons na solução de trabalho	$M L^{-3}$
D	- Coeficiente dispersivo-difusivo	$L^2 T^{-1}$
D'	- Logaritmo na base 10 do coeficiente dispersivo-difusivo	
D_h	- Coeficiente de dispersão mecânica	$L^2 T^{-1}$
D_s	- Coeficiente de difusão no solo	$L^2 T^{-1}$
D_0	- Coeficiente de difusão do soluto na solução pura	$L^2 T^{-1}$
dC/dx	- Gradiente de concentração.	$M L^{-4}$
erfc	- Função erro complementar	
g	- Aceleração da gravidade	$L T^{-2}$
h	- Carga hidráulica	L
\dot{j}_d	- Quantidade de massa do soluto transferida, por difusão, por unidade de tempo	$M T^{-1}$
\dot{j}_D	- Quantidade de massa do soluto transferida, por difusão, por unidade de tempo (em um volume de solo)	$M T^{-1}$
\dot{j}_h	- Quantidade de massa do soluto transferida, por dispersão, por unidade de tempo	$M L^{-2} T^{-1}$
\dot{j}_M	- Quantidade de massa do soluto transferida, por convecção, por unidade de área e tempo	$M L^{-2} T^{-1}$
K	- Condutividade hidráulica do solo em meio saturado na condição atual	$L^3 L^{-2} T^{-1}$
K_d	- Constante de distribuição	$L^3 M^{-1}$
k	- Permeabilidade intrínseca do solo	L^2
K_0	- Condutividade hidráulica do solo em meio saturado	$L^3 L^{-2} T^{-1}$
L	- Comprimento da coluna de solo	L
n	- Constante empírica com valor próximo a	

N	- Número de alíquotas	
n_p	Número de volume de poros	
P	Número de Peclet	
q	- Fluxo de água	$L^3 L^{-2} T^{-1}$,
R	- Fator de retardamento	
S	- Declividade da curva de efluentes no ponto de inflexão	
t	- Intervalo de tempo para coletar o volume V_e	T
U	- Concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de solo)	$M M^{-1}$,
v	- Velocidade média de escoamento no meio poroso	$L T^{-1}$
V_a	- Volume de cada amostra do efluente	L^3
V_e	- Volume de efluente	L^3
v_α	- Volume de poros na coluna	L^3
θ	- Teor de água no solo	$L^3 L^{-3}$
Φ	- Porosidade total	$L^3 L^{-3}$
ρ	- Massa específica do solo do	$M L^{-3}$
ρ_a	- Massa específica da água	$M L^{-3}$
η	- Viscosidade dinâmica do fluido	$L^{-1} T^{-1}$
η_{20}	- Viscosidade dinâmica da água à 20° C	$L^{-1} T^{-1}$
λ_m	- Comprimento de micro-capilares	L
λ_c	- Comprimento de macro-capilares	L
λ	- Dispersividade	L

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descrição	Página
Figura 1	- Mecanismos que contribuem para a dispersão mecânica dos solutos no solo: (a) a velocidade de escoamento dentro de um poro ser maior no centro deste; (b) a diferentes velocidades de escoamento devido à diferença no tamanho dos poros; (c) as linhas de corrente podem possuir direções diferentes da direção predominante do escoamento no meio poroso; e (d) a solução, juntamente com o soluto, convergir ou divergir para algum poro.....	8
Figura 2	- Modelos de adsorção isotérmica linear, de Freundlich e de Langmuir.....	12
Figura 3	- Suporte de fixação - dimensões e materiais utilizados na confecção do suporte de fixação no solo.....	15
Figura 4	- Braçadeira - dimensões e materiais utilizados na confecção da braçadeira.....	16
Figura 5	- Suporte e tubo guia.....	17
Figura 6	- Parte móvel do amostrador, em detalhes: 1 – tubo de acionamento em aço inox de 32 mm de diâmetro e 0,20 m de comprimento; 2 – segmento de tubo de aço inox de 120 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento; e 3 – segmento de anel de PVC revestido de flanela objetivando melhor ajuste e deslizamento no tubo guia.....	18
Figura 7	- Detalhe da extremidade denteada do tubo.....	18
Figura 8	- Primeira versão desenvolvida do amostrador de solo com estrutura.....	19
Figura 9	- Segunda versão do amostrador de solo com estrutura indeformada.....	20
Figura 10	- Coluna de solo com a espuma de poliuretano após 24 horas de aplicação.....	24
Figura 11	- Permeâmetros montados a partir de amostras destorroadas (a) e amostras com estrutura indeformada (b).....	25

Figura 12	- Permeâmetros montados para determinação da condutividade hidráulica.....	28
Figura 13	- Versão final do amostrador de solo com estrutura indeformada...	31
Figura 14	- Amostrador em operação durante a retirada de uma amostra.....	31
Figura 15	- a) Escavação realizada com o monólito ao centro; b) coluna de solo após uma preparação prévia, com um diâmetro ligeiramente superior ao do elemento cortante do amostrador.....	32
Figura 16	- Instalação do amostrador em campo: a) cravamento do suporte de fixação e dos tubos de aço galvanizado no solo; b) fixação braçadeira nos tubos de aço galvanizado.....	32
Figura 17	- Parte móvel encaixada tubo guia do amostrador, em operação, durante a retirada da amostra.....	33
Figura 18	- Ilustração do espaço deixado entre a amostra e parede interna do tubo de inox.....	33
Figura 19	- Preparação da amostra para o transporte ao laboratório: a) amostra ao centro da escavação após a retirada da parte móvel do amostrador; b, c, d) amostra sendo envolta em filme de plástico, seccionada na base e acondicionada para ser levada ao laboratório.....	34
Figura 20	- Curvas de efluente dos íons de potássio e magnésio (PVAe) obtidas a partir dos valores médios dos parâmetros de transporte obtidos. - Amostras com estrutura indeformada: (a) efluente de potássio; (b) efluentes de magnésio. - Amostras destorroadas: (c) efluente de potássio; (d) de efluentes de magnésio.....	36
Figura 21	- Curvas de efluente dos íons potássio e magnésio (LVAd) obtidas a partir dos valores médios dos parâmetros de transporte obtidos. - Amostras com estrutura indeformada: (a) efluente de potássio; (b) efluentes de magnésio. - Amostras destorroadas: (c) efluente de potássio; (d) de efluentes de magnésio.....	40
Figura 22	- Concentrações residentes dos íons em perfil de 1,00 m de profundidade de um Argissolo, após 1:00 e 5:00 horas de aplicação da solução de trabalho: (a) potássio; e (b) magnésio....	47
Figura 23	- Concentrações residentes dos íons em perfil de 100 cm de	

profundidade de um Latossolo após 1:00 e 5:00 horas de
aplicação da solução de trabalho: (a) potássio; e (b) magnésio.... 48

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Página
Tabela 1	- Classes de amostras de solo e descrição.....	7
Tabela 2	- Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe).....	22
Tabela 3	- Valores médios do fluxo e da velocidade de escoamento da solução de trabalho obtidos para o Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	35
Tabela 4	- Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon potássio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe).....	37
Tabela 5	- Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon magnésio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe).....	38
Tabela 6	- Valores médios obtidos de dispersividade dos íons potássio e magnésio, em amostras com estrutura indeformada e destorroadas no Argissolo (PVAe).....	39
Tabela 7	- Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon potássio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo (LVAd)	41
Tabela 8	- Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon magnésio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo (LVAd)	42
Tabela 9	- Valores médios obtidos de dispersividade (λ), para os íons	

	potássio e magnésio, em amostras com estrutura indeformada e destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	43
Tabela 10	- Análise de variância do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon potássio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	45
Tabela 11	- Teste de Tukey a 5 % de significância das médias do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon potássio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	45
Tabela 12	- Análise de variância do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon magnésio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	46
Tabela 13	- Teste de Tukey a 5 % do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon magnésio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	46
Tabela 14	- Valores de condutividade hidráulica em meio saturado obtidos a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe).....	49

Tabela 15	- Valores de condutividade hidráulica em meio saturado obtidos a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	50
Tabela 16	- Análise de variância da condutividade hidráulica obtidas a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).....	51
Tabela 17	- Teste Tukey a 5 % de significância das médias de condutividade hidráulica obtidas a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3).....	51

RESUMO

SILVA, Jonathas Batista Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2009. **Tecnologia inovadora para retirada de amostras de solo com estrutura indeformada.** Orientador: Paulo Afonso Ferreira. Coorientadores: Antonio Teixeira de Matos e Paulo Roberto Cecon.

Deformações na estrutura natural nas amostras de solo afetam grandemente os valores determinados dos parâmetros de transporte de solutos e da condutividade hidráulica da água no solo. Diante disso, objetivou-se neste trabalho desenvolver um método eficaz e prático de amostragem de solo, mantendo-se a estrutura natural da amostra; comparar os valores dos parâmetros de transporte dos íons potássio e magnésio e da condutividade hidráulica da água no solo, obtidos de amostras retiradas com o método desenvolvido, com amostras retiradas com o amostrador de Uhland e destorroadas; e simular a distribuição de concentrações residentes dos íons potássio e magnésio em dois perfis de solo, empregando o programa computacional Disp. O amostrador desenvolvido constituiu-se de partes fixa e móvel. As amostras de solo foram coletadas em um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), no município de Viçosa, MG. Os valores dos fatores de retardamento (R), coeficientes dispersivo-difusivo (D) e dos coeficientes de distribuição (Kd) foram calculados utilizando-se o programa computacional Disp. Os parâmetros de mobilidade dos íons e de condutividade hidráulica foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas utilizando-se o teste de Tukey, a 5 % de significância. Utilizando-se da ferramenta do programa computacional Disp, foram realizadas simulações da concentração residente dos íons potássio e magnésio em função da profundidade no perfil dos solos e do tempo de aplicação da solução de potássio e magnésio. Testes em campo comprovaram ser o equipamento eficaz ao permitir retirar amostras com diâmetro de 0,11 m e comprimento de até 1,0 m, dependendo da especificação do amostrador e do tipo de solo. Além disto, é um aparelho de fácil operacionalidade. As médias dos valores da condutividade hidráulica e dos parâmetros de transporte de solutos no solo, obtidas a partir de amostras com estrutura, retiradas com o amostrador desenvolvido, diferiram significativamente das outras modalidades de amostras. A análise dos resultados e as simulações comprovaram que a manutenção da estrutura natural do solo é fundamental, quando se deseja empregar esses parâmetros em programas computacionais para simular condições em campo.

ABSTRACT

SILVA, Jonathas Batista Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2009. **Innovative technology for removal of samples of soil with undisturbed structure.** Adviser: Paulo Afonso Ferreira. Co-advisers: Antonio Teixeira de Matos and Paulo Roberto Cecon.

Deformations in the natural structure of the soil samples greatly affect the values of hydraulic conductivity and transport parameters of the soil solutes. Thus, this work aimed to develop an effective and practical method for sampling of soil, maintaining the natural structure of the sample, compare the values of hydraulic conductivity and parameters of transport of ions potassium and magnesium from samples taken with the developed method, samples taken with the Uhland's sampler and deformed samples, besides simulate the distribution of resident concentrations of ions potassium and magnesium in two soil profiles, using the computer program Disp. The developed sampler consisted of shares fixed and mobile. Soil samples were collected in a Red Yellow Eutrophic Argisol (PVAe) and a Red-Yellow Distrophic Latosol (LVAd), in Viçosa, MG. The values of retardation factors (R), dispersive-diffusive coefficient (D) and distribution coefficients (Kd) were calculated using the computer program Disp. The parameters of mobility of ions and hydraulic conductivity were submitted to analysis of variance and the averages compared using the Tukey test at 5% significance. The computer program Disp was used to simulate the distribution of resident concentrations of ions potassium and magnesium in two soil profiles. In field tests have proved to be effective to allow the equipment to remove sample with diameter of 0.11 m to 1.0 m in length, depending on the specification of the sampler and the soil. Furthermore, it is a device for easy operation. Mean values of hydraulic conductivity and parameters of transport of solutes in soil, obtained from samples with the structure, drawn with the sampler developed, differed significantly from other types of samples. The analysis and simulations showed that maintaining the natural structure of soil is essential, when you wish to use these parameters in computer programs to simulate conditions in the field.

1. INTRODUÇÃO

Modelos físico-matemáticos resultantes das soluções de equação diferencial de transporte de solutos no solo, quando ajustados a dados experimentais oriundos de ensaios de lixiviação ou de eluição em colunas de solo, em laboratório e em campo, constituem ferramenta importante, por possibilitarem a caracterização da mobilidade de solutos no solo com base na dispersão, difusão e retardamento dos íons em relação ao avanço da interface entre o fluido deslocador e o deslocado no perfil do solo (FERREIRA, 2007).

No entanto, o sucesso na aplicação dos modelos físico-matemáticos, que descrevem o movimento e a concentração residente de solutos no solo, depende do grau de confiabilidade dos parâmetros de transporte envolvidos. Parâmetros como o fator de retardamento, o coeficiente dispersivo-difusivo e o coeficiente de distribuição, os quais expressam a capacidade de um soluto em se mover no solo, devem ser determinados com a maior exatidão possível (van GENUTCHEN e WIERENGA, 1986).

Outro importante parâmetro no estudo de transporte de solutos no solo é a condutividade hidráulica em meio saturado. De acordo com RADCLIFFE e RASMUSSEN (2000), a condutividade hidráulica é o parâmetro mais importante ao se descrever o fluxo de água em solo saturado, sendo dependente apenas das características físicas do fluido e do solo.

De acordo com OLIVEIRA et al. (2000), o processo de amostragem do solo constitui-se na maior preocupação na obtenção destes parâmetros em colunas de solo.

Na determinação de características químicas e de algumas propriedades físicas como teor de água, granulometria, massa específica de partículas, entre outras, é possível utilizar amostras deformadas. Todavia, quando o interesse são as propriedades cujo valor é altamente influenciado pela estrutura do solo como a condutividade hidráulica, os parâmetros de transporte de solutos, porosidade total, micro e a macro porosidade é recomendável manter as condições do solo “in situ” inalteradas, principalmente a sua estrutura.

Parâmetros de transporte de solutos no solo não devem ser determinados com dados de entrada oriundos de amostras com estrutura indeformada, quando o

interesse for usá-los em modelos matemáticos para simular o movimento e a concentração residente de solutos no solo, nas simulações para condições de campo. Mesmo assim, a maioria dos trabalhos é realizada com amostras de solo destorroado, o que impede de se fazer inferências, em termos de valores absolutos, nas condições de campo. O arranjo geométrico das partículas que constituem a matriz do solo está diretamente relacionado com o espalhamento ou a dispersão do soluto que é resultante dos desvios entre as velocidades de suas partículas, dentro das linhas de corrente, em relação à velocidade média do escoamento (FERREIRA, 2007).

Solo com estrutura natural pode conter caminhos preferenciais para a água e os sais nela dissolvidos, que influenciam as características do processo de transporte de solutos. Em amostras com estrutura indeformada, a dispersão e a difusão do soluto são mais evidentes ao longo da coluna de solo, comparativamente às amostras destorroadas (JURY et al., 1991).

ROSSI et al. (2007), comparando valores obtidos para os parâmetros de transporte do íon nitrato, determinados utilizando-se amostras de solo com estrutura e destorroadas, afirmaram que os dados obtidos com amostras destorroadas não foram representativos para nenhum dos parâmetros de transporte do íon nitrato, confirmando ser recomendável usar amostras com estrutura inalterada.

No entanto, um dos métodos tradicionais de retirada de amostras com estrutura indeformada, que utiliza amostradores de anel (amostrador de Uhland), ao ser cravado por percussão no solo proporciona deformações na estrutura do cilindro amostrado, principalmente, por compactação, tornando os resultados dos testes questionáveis. Alternativas vêm sendo desenvolvidas na tentativa de contornar os problemas na amostragem de solo. A avaliação de vários procedimentos de amostragem de solo, como a casualização dos pontos a serem amostrados, número de amostras, transporte e armazenamento destas, bem como o desempenho de certos amostradores, tem sido realizada por diversos autores (SQUIRE et. al, 2000; de ZORZI et al., 2008a; de ZORZI et al., 2008b; van der PERK et al., 2008).

OLIVEIRA et al. (2000) desenvolveram um método alternativo para retirar amostras de solo com estrutura indeformada objetivando reduzir as alterações em sua estrutura. Os autores observaram menores incidências de erros experimentais na determinação da condutividade hidráulica e dos parâmetros da equação do transporte de solutos no solo como o fator de retardamento e coeficiente dispersivo-difusivo, em razão da baixa variabilidade dos dados. TEIXEIRA (1998) desenvolveu um

Veículo Amostrador de Solo (VAS) capaz de retirar amostras de solo com estrutura indeformada de diâmetro igual a 75 mm e comprimento igual a 0,60 m. O equipamento desenvolvido mostrou-se adequado para o fim que foi projetado. No entanto, existem limitações no emprego do VAS, principalmente por ser um equipamento oneroso e pela dificuldade de utilização em terrenos de difícil acesso.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho:

- desenvolver um método prático de amostragem de solo mantendo-se a estrutura natural da amostra inalterada;

- comparar os valores dos parâmetros de transporte dos íons potássio e magnésio e da condutividade hidráulica em meio saturado, obtidos em amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico retiradas com o método desenvolvido, o amostrador de Uhland e destorroadas;

- simular a distribuição de concentrações residentes dos íons potássio e magnésio em perfis do Argissolo e Latossolo, empregando o programa computacional Disp, o qual ajusta soluções matemáticas da equação diferencial de transporte de solutos no solo a dados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Amostras de solo

Ao caracterizar um solo é, frequentemente, imprescindível a retirada de amostras. Essas amostras devem ser as mais representativas possível do material original ou da área a ser caracterizada. De acordo com o objetivo em estudo, as amostras de solo podem ser obtidas por diferentes métodos de amostragem. Porém, ao se efetuar a retirada da amostra do solo pode haver deformação, a não ser que precauções sejam tomadas. Desta forma, as amostras podem apresentar-se com diferentes graus de alterações, o que possibilita sua divisão em cinco classes (TEIXEIRA, 1998). As amostras pertencentes à classe 1 são ditas indeformadas relativamente à sua estrutura, ou pouco alterada e as demais classes são consideradas deformadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Classes de amostras de solo e descrição (adaptado de TEIXEIRA, 1998)

Classes	Descrição
1	Sem distorção e alteração do volume, preservando as características de resistência;
2	Com teor de água e compactidade inalteradas, mas com características de resistência alteradas;
3	Com o teor de água e a composição granulométrica inalteradas, mas sem a massa específica do solo original;
4	Com a composição granulométrica inalterada, mas com o teor de água e a massa específica do solo alterada;
5	Com alterações até na composição granulométrica (devido a mistura de horizontes).

2.2. Amostradores de solo

No que se refere às amostras com estrutura indeformada, os métodos mais utilizados para retirada das amostras são os amostradores e a caixa metálica, também conhecida como método do bloco parafinado (TEIXEIRA, 1998).

Os amostradores mais utilizados são os tubulares, isso porque, de acordo com CETESB (1999), são instrumentos versáteis na amostragem de solo, podendo ser utilizados em amostragens realizadas tanto junto à superfície quanto em profundidades maiores. Possibilitam a retirada de amostras relativamente inalterada, mantendo suas características físicas e químicas originais. Podem ser manuais ou mecanizados, utilizando-se de percussão (elétrico, combustível ou manual) ou pressão (hidráulico) para se realizar a amostragem. Dentre os amostradores tubulares destacam-se: amostrador de Uhland; amostrador tipo Shelby; amostrador tipo DER e; amostrador tipo S.P.T. (amostrador Standart Penetration Test).

No uso de amostradores tubulares de paredes finas, para obtenção de amostras por meio da cravação, as causas mais comuns de perturbação das amostras, de acordo com LA ROCHELLE et al. (1981), são:

- alteração no solo a ser amostrado antes do início da amostragem, em razão de problemas de má preparação da área;
- distorção mecânica (principalmente compactação) das amostras durante a cravação do amostrador;
- distorção mecânica, combinada com efeitos de sucção, durante a retirada do amostrador; e
- eliminação do estado de tensão em que as amostras se encontravam no solo.

Os diâmetros dessa classe de amostradores podem variar de 57 mm a 200 mm. Os amostradores de diâmetros maiores são reservados para casos especiais, sendo 75 mm tido como o mínimo aceitável para testes de rotina (LA ROCHELLE et al., 1981).

Com o objetivo de facilitar a retenção da amostra no interior do amostrador, após a amostragem, e diminuir o atrito entre esta e as paredes internas do mesmo, é recomendado uma folga de, no máximo, 1,5 % do diâmetro interno em relação ao diâmetro do corte (TEIXEIRAS, 1998). Quanto ao material, os anéis amostradores

devem ser fabricados em aço inoxidável ou latão, a fim de minimizar a oxidação do material do amostrador, impedir a adesão do solo às paredes do amostrador e facilitar a remoção da amostra, sem causar distúrbios (TEIXEIRA, 1998).

2.3. Transporte de solutos

A água, ao movimentar-se no solo, leva consigo os solutos, sendo que uma parte destes poderá ser adsorvida ao complexo coloidal, parte poderá ser absorvida pelas plantas e parte poderá ser precipitada. Entretanto, o movimento dos solutos no solo não acontece apenas em decorrência do deslocamento da água; eles podem, também, se difundir na água, em resposta a gradientes de concentração (WOLSCHICK, 2004). Essas interações envolvem características químicas, mineralógicas e físicas do solo e podem ser influenciadas por uma série de fatores, como a acidez, temperatura, potencial de oxi-redução e composição da solução do solo (PREVEDELLO, 1996).

O deslocamento de solutos no solo se dá em decorrência de três processos: convecção ou fluxo de massa, difusão e dispersão (FERREIRA, 2007).

O transporte convectivo, também denominado de fluxo de massa, refere-se ao escoamento passivo de um soluto juntamente com a água do solo, ou seja, a água e o soluto nela dissolvido movem à mesma velocidade (FERREIRA, 2007). Esse movimento é expresso pela equação:

$$j_M = q C \quad (1)$$

em que,

- j_M - quantidade de massa do soluto transferida, por convecção, por unidade de área e tempo, $M L^{-2} T^{-1}$;
- q - fluxo de água, $L^3 L^{-2} T^{-1}$;
- C - concentração do soluto na solução do solo, $M L^{-3}$.

De acordo com AZEVEDO et al. (2005), o transporte convectivo é o principal mecanismo de movimentação dos contaminantes no solo e pode variar em função da condutividade hidráulica nesse meio.

O transporte difusivo é um processo espontâneo, que resulta do movimento térmico aleatório e de repetidas colisões e deflexões dos íons e moléculas na fase líquida do solo (HILLEL, 1980). Decorre da diferença de concentração entre pontos na solução do solo, ou seja, o movimento se dá de pontos de concentrações maiores para aqueles de concentrações menores (FERREIRA, 2007).

Macroscopicamente, a taxa média de escoamento das partículas de um soluto em um meio aquoso uniforme é proporcional ao gradiente de concentração e à área normal à direção do escoamento e, conforme a primeira lei de Fick,

$$j_d = -D_0 A \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

em que,

- j_d - quantidade de massa do soluto transferida, por difusão, por unidade de tempo, $M T^{-1}$;
- D_0 - coeficiente de difusão do soluto na solução pura, $L^2 T^{-1}$;
- A - área normal à direção do escoamento, L^2 ;
- dC/dx - gradiente de concentração, $M L^{-4}$.

Escrevendo a Equação 3 para um determinado volume de solo, por unidade de área, e tendo em vista que a concentração (C) refere-se à fase líquida, apenas, obtém-se,

$$j_D = -D_s \theta \frac{dC}{dx} \quad (3)$$

em que j_D é a quantidade de massa do soluto transferida, por difusão, por unidade de área e de tempo, $M L^{-2} T^{-1}$. O coeficiente de difusão no solo (D_s) é menor que seu equivalente na solução pura (D_0) e θ é o teor de água no solo, $L^3 L^{-3}$, base volumétrica.

O transporte dispersivo é um processo passivo que, diferentemente da difusão, só ocorre quando a solução do solo se movimenta, razão pela qual o termo dispersão mecânica é freqüentemente empregado para descrever a mistura proporcionada pelo fluxo de massa (FERREIRA, 2007).

A dispersão resulta do fato de as velocidades de escoamento dentro de poros individuais, decorrentes da viscosidade da água, e entre poros de diferentes tamanhos e formas, desviarem-se da velocidade média do escoamento no meio poroso (Figura 1).

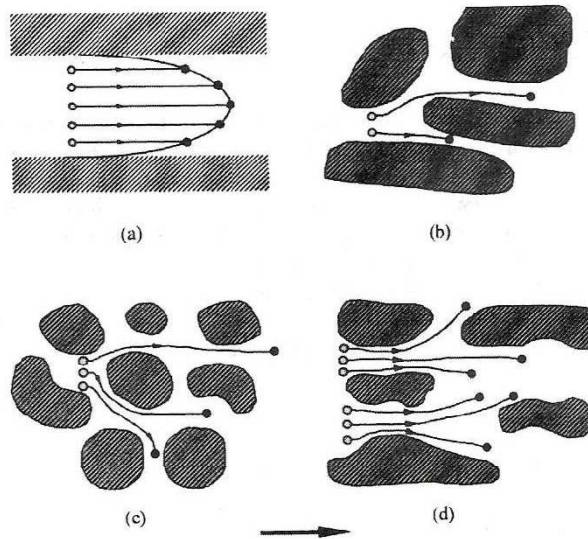


Figura 1 - Mecanismos que contribuem para a dispersão mecânica dos solutos no solo: (a) a velocidade de escoamento dentro de um poro ser maior no centro deste; (b) as diferentes velocidades de escoamento devido à diferença no tamanho dos poros; (c) as linhas de corrente podem possuir direções diferentes da direção predominante do escoamento no meio poroso; e (d) a solução, juntamente com o soluto, convergir ou divergir para algum poro (LEIJ e van GENUCHTEN, 2000).

A não uniformidade da velocidade entre os poros condutores é, ainda mais, acentuada, quando os poros presentes no solo são muito distintos entre si, chegando a apresentar diferenças nos diâmetros de várias ordens de magnitude, isto é, desde 1 μm a 1 mm (WOLSCHICK, 2004). Essa variação de velocidade do escoamento dentro de poros individuais em relação à velocidade média de escoamento da solução percolante faz com que o soluto seja transportado em diferentes velocidades, resultando num processo de mistura, macroscopicamente semelhante àquela decorrente da difusão (FERREIRA, 2007).

O transporte dispersivo pode ser descrito pela seguinte equação,

$$j_h = -D_h \theta \frac{dC}{dx} \quad (4)$$

em que,

- j_h - quantidade de massa do soluto transferida, por dispersão, por unidade de tempo, $M L^{-2} T^{-1}$;
- D_h - coeficiente de dispersão mecânica, $L^2 T^{-1}$;
- θ - teor de água no solo, $L^3 L^{-3}$;
- dC/dx - gradiente de concentração, $M L^{-4}$.

O coeficiente de dispersão mecânica (D_h) depende apenas da velocidade do escoamento da solução no solo e da dispersividade do meio poroso.

$$D_h = \lambda v^n \quad (5)$$

em que,

- λ - dispersividade do solo, L;
- v - velocidade média de escoamento no meio poroso, $L T^{-1}$;
- n - constante empírica com valor próximo a 1.

Em coluna de solo destorreado, em laboratório, o valor de λ situa-se entre 0,5 e 2 cm e, em condições de campo, entre 5 e 20 cm. De acordo com FERREIRA (2007), o motivo para os maiores valores de λ , nos solos com estrutura natural, está associado às características do processo de escoamento, tais como a formação de canais preferenciais para o escoamento da água e dos solutos nela dissolvidos e, também, por obstrução de poros por partículas grosseiras.

2.4. Fator de retardamento, coeficiente dispersivo-difusivo e coeficiente de distribuição

O fator de retardamento pode ser definido como a capacidade do solo em reter ou adsorver determinado soluto proveniente de uma solução contaminante (MATOS et al., 1998). Ele representa a defasagem existente entre a velocidade de deslocamento do soluto e a velocidade de escoamento da solução percolante.

Para solutos não reativos, o valor do fator de retardamento é igual à unidade e, portanto, o soluto é transportado com a mesma velocidade de percolação do solvente. Para solutos reativos, o valor do fator de retardamento é superior a um e estes solutos são transportados a uma velocidade menor do que a do solvente (AZEVEDO et al., 2005).

O coeficiente dispersivo-difusivo, também chamado de coeficiente de difusão aparente ou coeficiente de dispersão hidrodinâmica, representa o efeito combinado da dispersão e da difusão. A dispersão é um processo que ocorre entre os agregados do solo, ou seja, na região onde ocorre o fluxo de massa, enquanto a difusão é um processo que ocorre na região intra-agregado, ou seja, na ausência do fluxo de massa. Em razão de serem macroscopicamente semelhantes, os coeficientes de difusão e dispersão são freqüentemente aditivos, ou seja,

$$D = D_h + D_s \quad (6)$$

em que,

- D - coeficiente dispersivo-difusivo, $L^2 T^{-1}$;
- D_h - coeficiente de dispersão mecânica, $L^2 T^{-1}$;
- D_s - coeficiente de difusão, $L^2 T^{-1}$.

van GENUCHTEN e WIERENGA (1986) descrevem diferentes métodos para determinação do fator de retardamento e do coeficiente dispersivo-difusivo a partir de ensaios em colunas de lixiviação. Os mais utilizados em estudos de mobilidade de solutos são os baseados na declividade da curva de efluentes e no ajuste de funções matemáticas aos pontos experimentais da curva de efluentes, empregando técnicas baseadas nos mínimos quadrados.

Segundo DREVER (1997), para se entender o movimento dos solutos nos solos e em aquíferos subterrâneos, é preciso ser capaz de modelar quantitativamente os processos de adsorção. A equação (ou representação gráfica) que relaciona a concentração de espécies adsorvidas nos sólidos com a concentração na solução é geralmente referida como isoterma. A maneira mais comum de quantificar esse processo é dada pela relação linear, da qual se obtém o coeficiente de distribuição K_d (DEMUELENAERE, 2004). A isoterma de adsorção linear está apresentada na

Equação 7.

$$U = K_d C \quad (7)$$

em que,

- K_d - coeficiente de distribuição, L^3M^{-1} ;
- U - concentração adsorvida (massa de soluto por massa de solo), $M M^{-1}$;
- C - concentração do soluto na solução do solo, ML^{-3} .

O uso do coeficiente de distribuição é conveniente porque além de ser facilmente medido, conceitualmente direto e matematicamente simples, fornece uma avaliação das propriedades de adsorção que permite comparar diferentes solos e ou elementos, o que o torna imprescindível em modelos de previsão de risco ambiental (STAUNTON, 2001). Baixos valores do coeficiente de distribuição indicam que a maior parte do soluto presente no sistema permanece em solução e, portanto, disponível para o transporte ou para outros processos químicos ou para absorção pelas raízes das plantas. Por outro lado, altos valores refletem grande afinidade dos componentes sólidos do solo pelo elemento (SOARES, 2004).

O valor do coeficiente de distribuição é função das propriedades do substrato do solo e da composição da solução; logo, cada soluto tem seu coeficiente de distribuição característico para um solo específico (DEMUELENAERE, 2004).

Quando a relação entre a concentração adsorvida e a concentração do soluto na solução não for linear, o coeficiente de distribuição é obtido de forma diferente. Equações teóricas são usualmente empregadas para ajuste de isotermas obtidas experimentalmente, como as isotermas de Freundlich e Langmuir.

Na Figura 2 estão apresentadas as isotermas Linear, de Freundlich e de Langmuir.

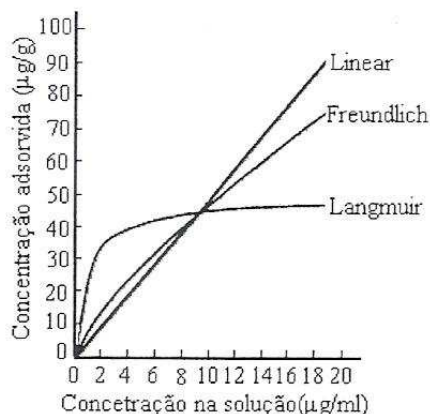


Figura 2 - Modelos de adsorção isotérmica linear, de Freundlich e de Langmuir (JURY et al., 1991).

O fator de retardamento pode ser calculado utilizando-se a Equação 8, quando a isoterma for linear:

$$R = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta} \quad (8)$$

em que,

- R - fator de retardamento, adimensional;
- ρ - massa específica do solo, ML^{-3} ;
- K_d - coeficientes de distribuição, $L^3 M^{-1}$;
- θ - teor de água no solo, $L^3 L^{-3}$.

2.5. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo, sob determinado conteúdo de água, é o quociente entre o fluxo de água através do solo e o gradiente hidráulico. Qualitativamente, a condutividade hidráulica é importante para caracterizar os meios porosos em permeáveis ou condutivos (baixa resistência à passagem de água), semipermeáveis (média resistência) e pouco permeáveis (alta resistência hidráulica), quando seus valores resultam altos, médios e baixos, respectivamente. De acordo com RADLIFE e RASMUSSEN (2000), a condutividade hidráulica é o parâmetro mais importante para descrever o fluxo de água no solo, sendo dependente apenas das características físicas do solo e do fluido. A condutividade hidráulica do solo em

meio saturado pode determinada utilizando-se a Equação 9:

$$K_0 = k \frac{\rho_a g}{\eta} \quad (9)$$

em que,

- K_0 - condutividade hidráulica do solo em meio saturado, $L T^{-1}$;
- k - permeabilidade intrínseca do solo, L^2 ;
- ρ_a - massa específica da água, $M L^{-3}$;
- g - aceleração da gravidade, $L T^{-2}$;
- η - viscosidade dinâmica da água, $L^{-1} T^{-1}$.

Na equação 9, o primeiro termo do segundo membro agrupa os fatores que dependem da geometria do meio poroso, enquanto o segundo, denominado fator de fluidez, agrupa as propriedades físicas da água. Verifica-se, ainda por meio da Equação 9, que a condutividade hidráulica em meio saturado é diretamente proporcional à massa específica da água e inversamente proporcional à viscosidade dinâmica da água. Como estas características físicas da água dependem da temperatura, os valores de condutividade hidráulica devem ser corrigidos para uma temperatura padrão de 20°C. Portanto, é evidente que a condutividade hidráulica depende das propriedades geométricas do solo e propriedades físicas da água.

Como características do solo relacionadas à condutividade hidráulica em meio saturado podem ser citadas a porosidade total, distribuição do tamanho dos poros, tortuosidade e a superfície específica das partículas (VIEIRA, 2003). Estas características estão relacionadas com a geometria dos poros do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenvolvimento do amostrador de solo com estrutura indeformada

3.1.1. Componentes do amostrador de solo com estrutura indeformada

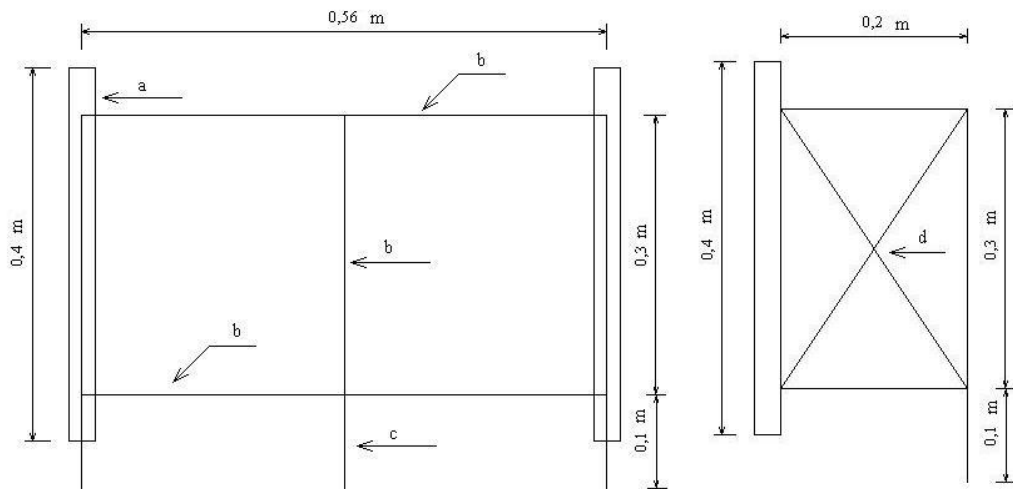
O amostrador desenvolvido é constituído de partes fixa e móvel. A parte fixa é composta por um suporte de fixação no solo, dois segmentos de tubo de aço galvanizado providos de ponteiros, braçadeira com braços de sustentação e um tubo guia. A parte móvel constitui-se de um segmento de tubo de aço inox tendo uma de suas extremidades alavancas de acionamento e a outra denteada em forma de serrote.

Na Figura 3 estão apresentadas as dimensões e os materiais utilizados na confecção do suporte de fixação no solo.



Vista Frontal

Vista Lateral



Vista Superior

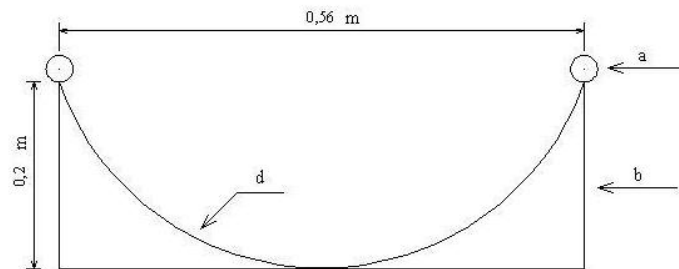


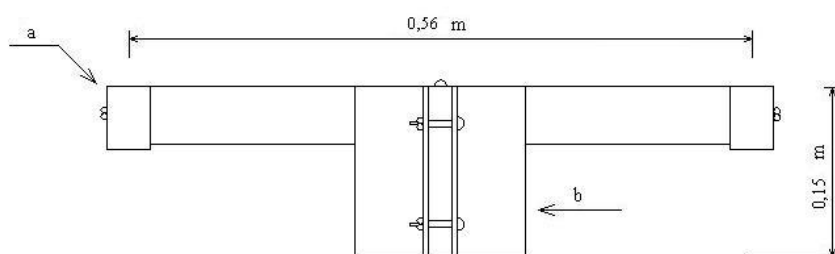
Figura 3 – Suporte de fixação - dimensões e materiais utilizados na confecção do suporte de fixação no solo.

- a - segmentos de tubo de chapa preta de 25 mm de diâmetro, que servem de guia para os tubos de aço galvanizados que são cravados no solo e sustentam a braçadeira;
- b - ferro liso de 8 mm de diâmetro;
- c - vergalhão de 8 mm de diâmetro;
- d - vergalhão de 6,3 mm de diâmetro, que confere estabilidade ao suporte.

Na Figura 4 estão apresentadas as dimensões e materiais utilizados na confecção da braçadeira.



Vista Frontal



Vista Superior

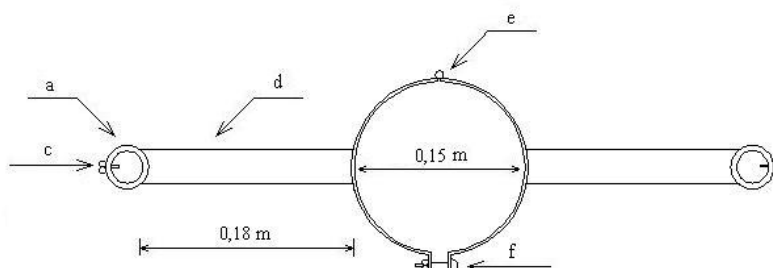


Figura 4 – Braçadeira - dimensões e materiais utilizados na confecção da braçadeira.
 a - luva de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro;
 b - segmento de anel de tubo de ferro de 150 mm de diâmetro;
 c - parafuso de 6,3 mm de diâmetro com uma porca borboleta soldada em uma de suas extremidades;
 d - *metalón* com bitola de 30x50 mm;
 e - dobradiça de 89x114 mm;
 f - parafusos e porcas borboletas de 6,3 mm de diâmetro, que permite regular ajustar o diâmetro da braçadeira.

O suporte de fixação no solo tem como finalidade sustentar a braçadeira, o tubo guia e os tubos de aço galvanizado. Deve-se ter o cuidado de manter os segmentos de tubos de chapa preta em nível ao cravar o suporte no solo.

O tubo guia constitui-se de um segmento de tubo de PVC de 150 mm de diâmetro e 0,40 m de comprimento.

A braçadeira sustenta o tubo guia, não deixando desta forma que conjunto de tubos (tubo guia e segmentos de tubos de aço inox – parte móvel) vibre, nem desalinhe, no momento em que a amostra de solo estiver sendo retirada, evitando assim uma possível ruptura da mesma. A braçadeira é sustentada por dois tubos de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento, que possuem ponteiros de madeira em uma das extremidades. As ponteiros de madeira auxiliam no cravamento dos tubos de aço galvanizado no solo. Estes tubos são encaixados nas luvas de aço galvanizadas que estão soldadas nas extremidades da braçadeira. Os tubos de aço galvanizado são encaixados nos segmentos de tubo de chapa preta no suporte de fixação e posteriormente cravados no solo.

Na Figura 5 estão apresentados o suporte e o tubo guia do amostrador.



Figura 5 – Suporte e tubo guia.

Na Figura 6 está apresentada a parte móvel do amostrador, que é o componente responsável pelo cisalhamento do solo quando em movimento rotacional.



Figura 6 - Parte móvel do amostrador, em detalhes: 1 – tubo de acionamento em aço inox de 32 mm de diâmetro e 0,20 m de comprimento; 2 – segmento de tubo de aço inox de 120 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento; e 3 – segmento de anel de PVC revestido de flanela objetivando melhor ajuste e deslizamento no tubo guia.

Na parede externa do segmento de tubo de aço inox de 120 mm de diâmetro foram colados pequenos segmentos de anéis de PVC e flanela, a fim de que o tubo de aço inox se ajuste internamente ao tubo guia.

Na extremidade superior do tubo de aço inox de 120 mm de diâmetro foram soldados dois segmentos de tubos de aço inox com diâmetro de 32 mm, para auxiliar na rotação do tubo no momento da retirada da amostra. Na extremidade inferior do tubo de aço inox de 120 mm de diâmetro foram feitos dentes com dimensões de 2 x 2 cm, com inclinação de 45°, nestes foi realizado uma trava de 6 mm. Na Figura 7 apresenta-se, em detalhe, a extremidade denteada e com trava semelhante ao serrote. O objetivo da realização da trava nos dentes é permitir que à medida que a amostra de solo for sendo cortada, fique uma folga entre a amostra e a parede interna do tubo, evitando, assim, o atrito entre a coluna de solo e a parede interna do tubo.



Figura 7 – Detalhe da extremidade denteada do tubo.

3.1.2 Versões preliminares do amostrador de solo com estrutura indeformada

O primeiro amostrador desenvolvido constituía-se de parte fixa e móvel. A parte fixa era composta de uma braçadeira e um tubo guia. A braçadeira foi confeccionada utilizando-se *metalon* e um segmento de tubo de ferro de 100 mm de diâmetro, esta era sustentada por duas estacas de madeira, que eram cravadas no solo. O tubo guia constituía-se de um segmento de tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e 0,40 m de comprimento. A parte móvel desta primeira versão do amostrador era constituída de um tubo de PVC de parede espessa, de 75 mm de diâmetro e 0,50 m de comprimento. Na Figura 8 está apresentada a primeira versão do amostrador desenvolvido.

O método de amostragem utilizando-se este equipamento consistia no talhamento da coluna de solo deixada ao centro da escavação a cada 0,02 m até a profundidade desejada. À medida que era realizado o talhamento, a amostra de solo era envolvida pelos tubos de PVC.

A primeira versão do amostrador foi reprovada porque o método utilizado por meio deste equipamento não se mostrou prático, ou seja, muito laborioso.

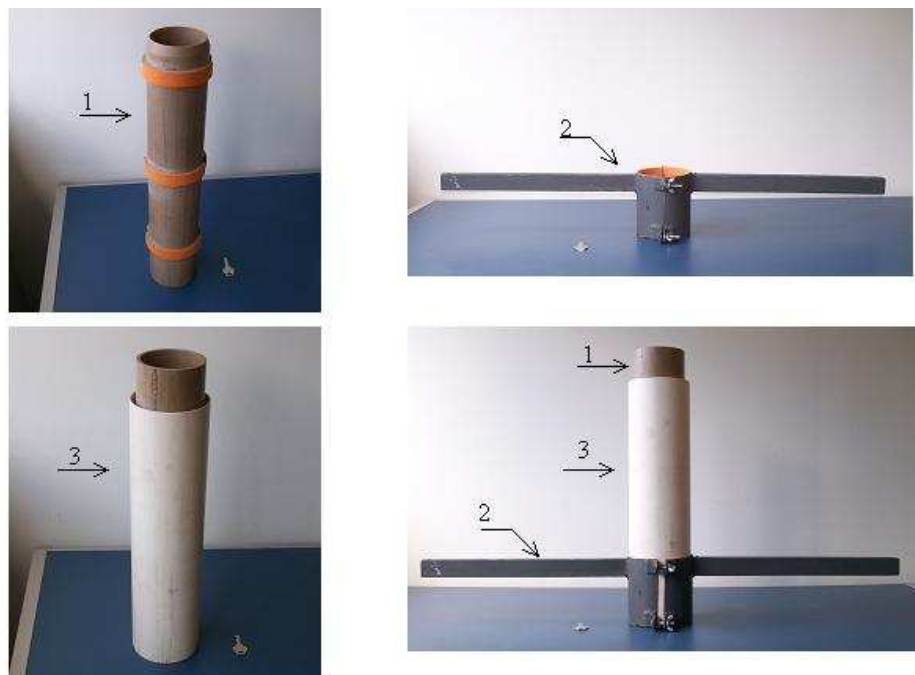


Figura 8 - Primeira versão desenvolvida do amostrador de solo com estrutura.

1 - tubo de PVC de parede espessa, de 75 mm de diâmetro e 0,50 m de comprimento, constitui a parte móvel do amostrador;

- 2 - braçadeira, feita com *metalon* e segmento de tubo de ferro de 100 mm;
- 3 - tubo guia.

A segunda versão do amostrador de solo com estrutura indeformada também era constituída de uma parte fixa e móvel. A parte fixa era composta por uma braçadeira, dois tubos de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento, e um tubo guia. A braçadeira era composta de segmentos de *metalon*, luvas de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro e de um segmento de tubo de aço de 100 mm. A braçadeira era sustentada pelos tubos de aço galvanizado que eram cravados no solo. Com o objetivo de auxiliar na cravação dos tubos de aço galvanizado foi desenvolvida uma galga feita com segmentos de tubo de chapa preta, segmentos de ferro liso e de vergalhão. Os tubos de aço galvanizado eram encaixados nos segmentos de tubo de chapa preta da galga no momento da cravação, após a cravação a galga era retirada e os tubos de aço galvanizado permaneciam no solo. Desta maneira garantia-se que a distância entre os tubos cravados no solo era a mesma distância existente entre as luvas soldadas nas extremidades da braçadeira.

A parte móvel do amostrador era composta por um segmento de tubo de aço zincado de 75 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento. Em uma das extremidades deste tubo foram feitos dentes e na outra extremidade foi soldado um segmento de *metalon*, que auxiliava na rotação do tubo. Na Figura 9 está apresentado o amostrador desenvolvido.



Figura 9 - Segunda versão do amostrador de solo com estrutura indeformada.

- 1 - tubos de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro;
- 2 - galga;
- 3 - braçadeira;
- 4 - tubo de aço zincado de 75 mm de diâmetro;

5 - tubo guia.

O amostrador desenvolvido não apresentou resultados satisfatórios. As amostras de solos eram cortadas com um diâmetro pequeno (< 75 mm), o que acarretava na ruptura das amostras durante a amostragem.

Posteriormente foi feita uma nova tentativa com este amostrador, o tubo de aço zincado de 75 mm foi trocado por outro de 90 mm. No entanto as amostras também quebravam no momento da amostragem.

Na versão final do amostrador foi feita uma alteração na galga e esta passou a fazer parte dos componentes fixos do amostrador, tornando-se o suporte de fixação no solo. A alteração feita na galga consistiu em soldar segmentos de vergalhão de 8 mm de diâmetro em sua base para que assim fosse cravado ao solo.

Os testes com os amostradores foram realizados em um Cambissolo Hálico tb Distrófico Podzólico, na Universidade Federal de Viçosa, localizado próximo a Área de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola.

3.2. Transporte de solutos em colunas de solo

3.2.1. Caracterização física e química da área

Utilizou-se neste trabalho dois tipos de solo, um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) típico caulínico fase terraço, e um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), ambos encontrados no município de Viçosa – MG, coletados da camada de 0,20-0,60 m. A caracterização física incluiu: análise granulométrica; massa específica do solo pelo método da proveta; massa específica das partículas pelo método do balão volumétrico; porosidade total; macro e microporosidade. As análises químicas incluíram as determinações de: pH em água; potássio e sódio trocáveis por fotometria de emissão de chama após extração com extrator Mehlich-1; cálcio e magnésio trocáveis por espectrofotometria de absorção atômica após extração com solução de cloreto de potássio 1 mol L^{-1} ; alumínio trocável por titulação após extração com solução de cloreto de potássio 1 mol L^{-1} ; H^+ + Al por titulação após extração com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$; fósforo disponível por colorimetria após extração com extrator Mehlich-1 e carbono

orgânico pelo método de Walkley-Black modificado (EMBRAPA, 1997 e 1999). Na Tabela 3 apresenta-se a caracterização física e química dos solos.

As análises de caracterização física e química das amostras de Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico foram realizadas nos Laboratórios de Rotina e de Física do Solo no Departamento de Solos na Universidade Federal de Viçosa.

Tabela 2 - Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe)

Característica	LVAd*	PVAe
Areia grossa (dag kg ⁻¹)	19	2
Areia fina (dag kg ⁻¹)	7	1
Silte (dag kg ⁻¹)	4	25
Argila (dag kg ⁻¹)	70	72
Massa específica do solo (kg dm ⁻³)	1,03	1,06
Massa específica das partículas (kg dm ⁻³)	2,52	2,67
Porosidade total (dm ³ dm ⁻³)	0,60	0,60
pH em água (1: 2,5)	4,84	6,07
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,07	0,07
Sódio (cmol _c dm ⁻³)	0,09	-
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0,67	2,32
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,24	0,44
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	3,1	0,00
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	11,22	2,5
Fósforo (mg dm ⁻³)	2,50	0,4
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹)	1,31	1,92

* MELO et al. (2006).

3.2.2. Amostragem dos solos com estrutura indeformada

Na coleta de amostras com estrutura indeformada foram utilizados o método desenvolvido neste trabalho e o amostrador de Uhland.

Com a utilização do amostrador desenvolvido, as amostras foram retiradas numa faixa de profundidade de 0,20-0,60 m.

As etapas da amostragem utilizando-se o amostrador desenvolvido estão apresentadas a seguir:

- primeiramente foram feitas escavações de seção quadrada de 0,80 x 0,80 m, com 0,60 m de profundidade, deixando-se um monólito ao centro. Posteriormente, realizou-se um talhamento no monólito a fim de que este possuísse um diâmetro de aproximadamente 0,16 m;

- em seguida, a parte fixa do amostrador era montada tomando-se o cuidado desta ficar em nível;

- a parte móvel do amostrador era então encaixada na parte fixa e dava-se início a retirada da amostra;

- alcançada a profundidade de 0,60 m, a parte móvel do amostrador era retirada, permanecendo ao centro da escavação a amostra de solo. A amostra era envolta em filme de PVC e, a seguir, seccionada na base e devidamente embalada para o transporte até o laboratório.

As amostras retiradas com o amostrador de Uhland foram contidas em anéis com diâmetro de 47 mm e altura de 30 mm, junto ao local da escavação realizada para a retirada das colunas de solo amostradas com o método desenvolvido. A profundidade de amostragem foi correspondente ao centro da coluna de solo obtida com o amostrador desenvolvido (0,40 m de profundidade).

3.2.3. Amostras de solo destorreado

A coleta das amostras de solo destorreado foi realizada simultaneamente com a coleta das amostras com estrutura indeformada, utilizando-se parte do material oriundo do talhamento da coluna de solo, na faixa de profundidade de 0,20 a 0,60 m.

3.2.3. Procedimento laboratorial

Os ensaios de transporte de solutos foram realizados no Laboratório de Física do Solo no Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

Ao se montar as colunas de solo com amostras de solo destorreado, as amostras foram secas e posteriormente passadas em uma peneira de malha de dois milímetros. Foram utilizados segmentos de tubos de PVC de 0,20 m de comprimento

e 48 mm de diâmetro interno. Antes de se iniciar o preenchimento da coluna de solo foi colocada uma tela na extremidade inferior do tubo e sobre esta um disco de lã de vidro, a fim de evitar a perda de partículas. Com o objetivo de se ter um perfil homogêneo, o preenchimento dos segmentos de tubo de PVC com o solo destorroado foi feito em camadas de aproximadamente 2 cm, sempre misturando a camada superior à inferior. A acomodação do solo foi feita com toques em torno do tubo. De maneira semelhante à seção inferior, a seção superior do segmento de tubo de PVC recebeu um disco de lã de vidro, para evitar distúrbios na superfície do solo ao interligar a fonte de água.

Na confecção das colunas de solo a partir de amostras com estrutura indeformada, retiradas com o método desenvolvido, foram utilizados segmentos de tubo de PVC de 0,28 m de comprimento e 150 mm de diâmetro interno. No preenchimento do espaço entre a amostra de solo e a parede interna do tubo de PVC foi utilizado espuma de poliuretano. Foi aplicada a espuma de poliuretano até esta preencher 1/3 da altura do segmento de tubo de PVC. Após 24 horas, a espuma já estava expandida e seca até a extremidade superior do segmento do tubo de PVC (Figura 10). De maneira semelhante às colunas de solo com amostras destorroadas, na confecção das colunas de solo com amostras com estrutura inalteradas, foi utilizado uma tela e discos de lã de vidro nas seções inferior e superior das colunas de percolação.



Figura 10 - Coluna de solo com a espuma de poliuretano após 24 horas de aplicação.

As etapas seguintes na determinação dos parâmetros de movimento de solutos no solo são as mesmas para os permeâmetros montados a partir de amostras de solo destorroado e amostras com estrutura indeformada.

As colunas com solo foram saturadas de forma ascendente com uma solução diluída ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) de cálcio. A solução de saturação foi preparada utilizando-se cloreto de cálcio. As colunas foram imersas até dois terços de seu comprimento, por 24 horas.

Utilizou-se uma solução de trabalho (solução contaminante), multi-espécie de potássio e magnésio. A solução de trabalho foi preparada com sais de cloreto e água destilada, sendo as concentrações de 20 mg L^{-1} para o magnésio e 400 mg L^{-1} para o potássio.

Frascos de Mariotte foram preenchidos com a solução diluída de cálcio (mesma solução utilizada na saturação das colunas de solo) e a solução de trabalho. Inicialmente, interligaram-se às colunas de solo os frascos com a solução diluída de cálcio até passar, aproximadamente, um volume de poros, mantendo-se uma lâmina de 6 cm acima da superfície da amostra de solo. A seguir, desconectaram-se os frascos contendo a solução diluída de cálcio e, após a completa infiltração da lâmina de água, interligaram-se os frascos de Mariotte contendo a solução de trabalho mantendo-se a lâmina de 6 cm sobre a superfície da amostra de solo. Na Figura 11 estão apresentados os permeâmetros montados a partir de amostras de solo destorreado e amostras com estrutura indeformada.

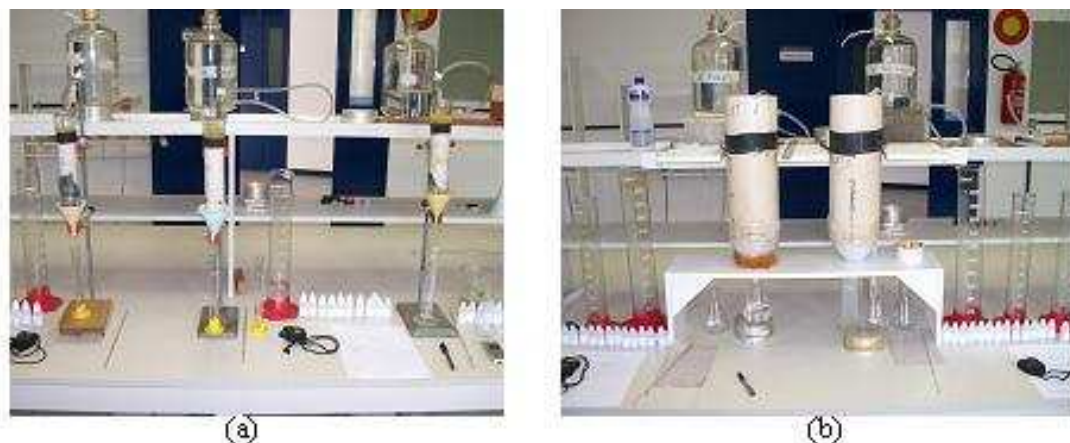


Figura 11 - Permeâmetros montados a partir de amostras destorreadas (a) e amostras com estrutura indeformada (b).

O volume de cada amostra do efluente foi determinado utilizando-se a Equação 10. Foram aplicados 2,22 volumes de poros da solução de trabalho, recolhendo-se continuamente 16 alíquotas de 0,14 volume de poros do efluente da coluna de solo montada com amostras com estrutura inalterada. Para os

permeâmetros montados com amostras de solo destorreado, foram aplicados 2 volumes de poros da solução de trabalho, recolhendo-se 12 alíquotas de 0,16 volume de poros do efluente.

$$V_a = \frac{n_p v_\alpha}{N} \quad (10)$$

em que,

- V_a - volume de cada amostra do efluente, L^3 ;
- n_p - número de volume de poros;
- v_α - volume de poros na coluna, L^3 ;
- N - número de alíquotas.

As amostras dos efluentes coletadas foram acondicionadas em recipientes plásticos com tampa. As concentrações de potássio e magnésio dos efluentes coletados das colunas de solo foram determinadas no Laboratório de Espectrometria Atômica, utilizando-se um Espectrofotômetro de Plasma, no Departamento de Solos na Universidade Federal de Viçosa.

Não foram montados os permeâmetros com as amostras retiradas com o amostrador de Uhland, em razão do pequeno volume de solo que este amostrador permite tirar.

Conhecendo as concentrações do magnésio e potássio nos efluentes (C_e), calcularam-se as concentrações relativas (C_e/C_0) para cada íon, sendo C_0 a concentração dos íons na solução de trabalho.

Os valores dos fatores de retardamento, coeficientes dispersivos-difusivos e dos coeficientes de distribuição foram calculados utilizando-se o programa computacional Disp. O Disp foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV (BORGES JÚNIOR & FERREIRA, 2006), o qual ajusta soluções matemáticas da equação diferencial de transporte de solutos no solo (Equação 11) aos dados experimentais.

$$R \frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} - v \frac{dC}{dx} \quad (11)$$

Os modelos de transporte de solutos no solo disponibilizados no programa Disp são: - modelo 1, trabalha com a concentração residente do soluto na fase líquida do solo; - modelo 2, trabalha com a concentração do soluto no efluente; - modelo 3, simplificação dos modelos 1 e 2, não considerando o efeito da difusão e modelo 4, não considera o efeito da difusão e trabalha com um fator de retardamento unitário. Na determinação das curvas de efluente para o íon potássio e magnésio adotou-se o modelo 2 (A-1), que considera concentração determinadas no efluente,

$$C_e/C_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\left(\frac{P}{4Rn_p} \right)^{1/2} (R - n_p) \right] + \frac{1}{2} e^P \operatorname{erf} \left[\left(\frac{P}{4Rn_p} \right)^{1/2} (R + n_p) \right] \quad (12)$$

A metodologia empregada para obtenção das curvas de efluentes é descrita por FERREIRA (2007).

3.2.4. Simulações da concentração residente dos solutos

Foram realizadas simulações da concentração residente dos íons potássio e magnésio em função da profundidade no perfil do solo utilizando-se os resultados obtidos a partir das curvas de efluentes. Utilizou-se o modelo 1 (A-2) do programa computacional Disp que trabalha com a concentração residente do soluto na fase líquida do solo para obter as simulações (Equação 13).

$$C_r = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\left(\frac{P}{4Rn_p} \right)^{1/2} (R - n_p) \right] + \left(\frac{Pn_p}{\pi R} \right)^{1/2} e^{\left[\frac{P}{4Rn_p} (R - n_p)^2 \right]} - \frac{1}{2} \left(1 + P + \frac{Pn_p}{R} \right) e^P \operatorname{erf} \left[\left(\frac{P}{4Rn_p} \right)^{1/2} (R + n_p) \right] \quad (13)$$

3.3. Condutividade hidráulica

Adotou-se a metodologia empregada pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa na determinação da condutividade hidráulica a partir de amostras obtidas com o

amostrador de Uhland (EMBRAPA, 1997). A seguir, estão apresentadas as etapas adotadas:

- primeiramente cada anel volumétrico recebeu um pedaço de lã de vidro na extremidade inferior e um segmento de tubo de vidro de igual diâmetro, de aproximadamente 50 mm de altura, na parte superior, que foram fixados por meio de anel de borracha;

- a amostra contida no anel foi saturada, de baixo para cima, para eliminar as bolhas de ar presas nos poros do solo. A saturação foi alcançada colocando-se a coluna dentro de um recipiente com água até aproximadamente 2/3 da altura do cilindro, por um período de 48 horas. No processo de saturação foi utilizada uma solução de diluída de cloreto de cálcio ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de cálcio). Após a saturação, a superfície do solo no anel foi coberta por uma fina camada de lã de vidro, que protegeu o solo do impacto da solução utilizada no ensaio;

- em seguida foram montados os permeômetros. Uma lâmina de água de espessura igual a 4 cm foi aplicada, utilizando-se o sistema de frasco de Mariotte para manutenção de carga constante;

- tão logo o escoamento permanente foi estabelecido, cronometrou-se o tempo (t) para o recolhimento de um volume (V) de água na proveta. Mediu-se o volume percolado em um intervalo de tempo de 20 minutos. Realizaram-se cinco medições de volume percolado.

Na Figura 12 estão apresentados os permeômetros utilizados na determinação da condutividade hidráulica a partir de amostras retiradas com o amostrador de Uhland.



Figura 12 - Permeômetros montados para determinação da condutividade hidráulica.

A determinação da condutividade hidráulica em meio saturado, utilizando amostras retiradas com o método desenvolvido e amostras destorroadas, foi realizada simultaneamente com a determinação dos parâmetros de transporte de solutos no solo.

A condutividade hidráulica do solo em meio saturado para as condições ambientais, na qual foi determinada, foi obtida empregando-se a Equação 14:

$$K = \left(\frac{V_e}{A_t t} \right) \left(\frac{L}{L + h} \right) \quad (14)$$

em que,

- K - condutividade hidráulica do solo em meio saturado na condição atual ($L^3 L^{-2} T^{-1}$);
- A_t - área da seção transversal da coluna (L^2);
- V_e - volume de efluente (L^3);
- t - intervalo de tempo para coletar o volume V_e (T);
- L - comprimento da coluna de solo (L);
- h - carga hidráulica (L).

O valor de K, obtido nas condições ambientais na qual foi determinado, foi recalculado para a temperatura de referência de 20° C (K_0) por meio da expressão

$$K_0 = K \cdot \frac{\eta}{\eta_{20}} \quad (15)$$

em que,

- K_0 - condutividade hidráulica do solo em meio saturado, $L^3 L^{-2} T^{-1}$;
- K - condutividade hidráulica do solo na condição atual, $L^3 L^{-2} T^{-1}$;
- η - viscosidade dinâmica da água à temperatura ambiente, LT^{-2} ;
- η_{20} - viscosidade dinâmica da água à 20° C, LT^{-2} .

3.4. Análise estatística dos dados

O delineamento foi inteiramente casualizado, considerando um esquema fatorial 2 x 2 (duas modalidades de amostras, dois tipos de solo e quatro repetições) na determinação dos parâmetros de transporte de solutos no solo em colunas de solo e um esquema fatorial 3x2 (três modalidades de amostragem, dois tipos de solo e quatro repetições) na determinação da condutividade hidráulica.

Os dados obtidos nos ensaios de mobilidade e condutividade hidráulica foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas utilizando-se o Teste de Tukey a 5 % de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional SAEG, versão 9.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Amostrador de solo com estrutura indeformada

Na Figura 13 apresenta-se a versão final do amostrador de solo com estrutura indeformada. Na Figura 14 está apresentado o amostrador em operação, durante a retirada de uma amostra.



Figura 13 - Versão final do amostrador de solo com estrutura indeformada.



Figura 14 - Amostrador em operação durante a retirada de uma amostra.

A coleta das amostras com estrutura indeformada utilizando-se o método desenvolvido se dá de acordo com as seguintes etapas:

- no local onde será retirada a amostra deve ser feita uma escavação de profundidade ligeiramente superior à altura da coluna de solo a ser amostrada,

deixando-se um monólito ao centro da perfuração (Figura 15a). Atingida a profundidade desejada, deve ser realizada uma preparação prévia da coluna de solo, moldando-a num formato cilíndrico, com diâmetro de aproximadamente 0,16 m (Figura 15b);



Figura 15 - a) Escavação realizada com o monólito ao centro; b) coluna de solo após uma preparação prévia, com um diâmetro ligeiramente superior ao do elemento cortante do amostrador.

- instalação do amostrador: a) cravar o suporte de fixação e os tubos de aço galvanizado; b) afixar a braçadeira nos tubos de aço galvanizado; e adaptar o tubo guia à braçadeira. A parte superior do suporte de fixação no solo deve estar nivelada. Na Figura 16 ilustra-se a seqüência de instalação dos elementos fixos do amostrador.



Figura 16 - Instalação do amostrador em campo: a) cravamento do suporte de fixação e dos tubos de aço galvanizado no solo; b) fixação braçadeira nos tubos de aço galvanizado.

- em seguida, a parte móvel do amostrador é introduzida no tubo guia e inicia-se a retirada da amostra (Figura 17). A parte móvel do amostrador deve ser rotacionada no sentido horário. Os dentes providos de travação deixam, internamente, a coluna de solo com um diâmetro próximo a 0,11 m evitando, assim,

o atrito entre a coluna de solo e a parede interna do tubo (Figura 18). A cada 5 cm de corte deve ser retirado o excesso de solo externo ao elemento cisalhante.



Figura 17 - Parte móvel encaixada tubo guia do amostrador, em operação, durante a retirada da amostra.



Figura 18 - Ilustração do espaço deixado entre a amostra e parede interna do tubo de inox.

- alcançada a profundidade desejada a parte móvel do amostrador é retirada, permanecendo, assim, ao centro da escavação a amostra de solo (Figura 19a). A amostra é, então, envolta em filme de PVC (Figura 19b,c) e, a seguir, seccionada na base e devidamente embalada para o transporte até o laboratório (Figura 19d).

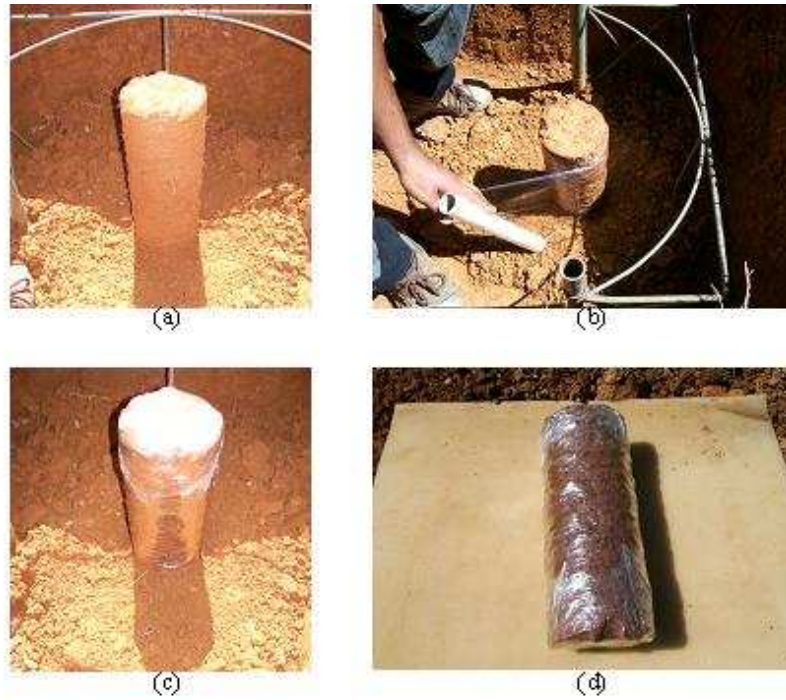


Figura 19 - Preparação da amostra para o transporte ao laboratório: a) amostra ao centro da escavação após a retirada da parte móvel do amostrador; b, c, d) amostra sendo envolta em filme de plástico, seccionada na base e acondicionada para ser levada ao laboratório.

4.2. Parâmetros de transporte de solutos no solo

4.2.1. Fluxo e velocidade de escoamento

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios obtidos do fluxo e da velocidade de escoamento da solução de trabalho nas colunas de solo obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas, para o Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd).

Tabela 3 - Valores médios do fluxo e da velocidade de escoamento da solução de trabalho obtidos para o Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

Amostras	PVAe		LVAd	
	Fluxo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	Velocidade de escoamento (cm h^{-1})	Fluxo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	Velocidade de escoamento (cm h^{-1})
Com estrutura indeformada	32,16	53,60	18,70	31,17
Destorroadas	5,06	9,33	14,02	23,37

Observou-se nas amostras com estrutura indeformada que, tanto o fluxo quanto a velocidade de escoamento da solução foram maiores em relação aos valores obtidos nas amostras destorroadas. Isto se explica porque, nas amostras com estrutura indeformada ocorre uma maior frequência de macroporos que favorecem o fluxo e a velocidade de escoamento. Poros maiores que 30 μm , os que incluem os canais biológicos, rachaduras, dentre outros que juntamente com a continuidade ou conectividade desses, exercem grande influência sobre o movimento de água e solutos no solo (KAY & ANGERS, 2000).

4.2.2. Fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo-difusivo (D) e coeficiente de distribuição (K_d)

As curvas de efluentes dos íons de potássio e magnésio obtidas a partir da média dos valores observados em amostras com estrutura indeformada e destorroadas do Argissolo (PVAe), estão apresentadas na Figura 20.

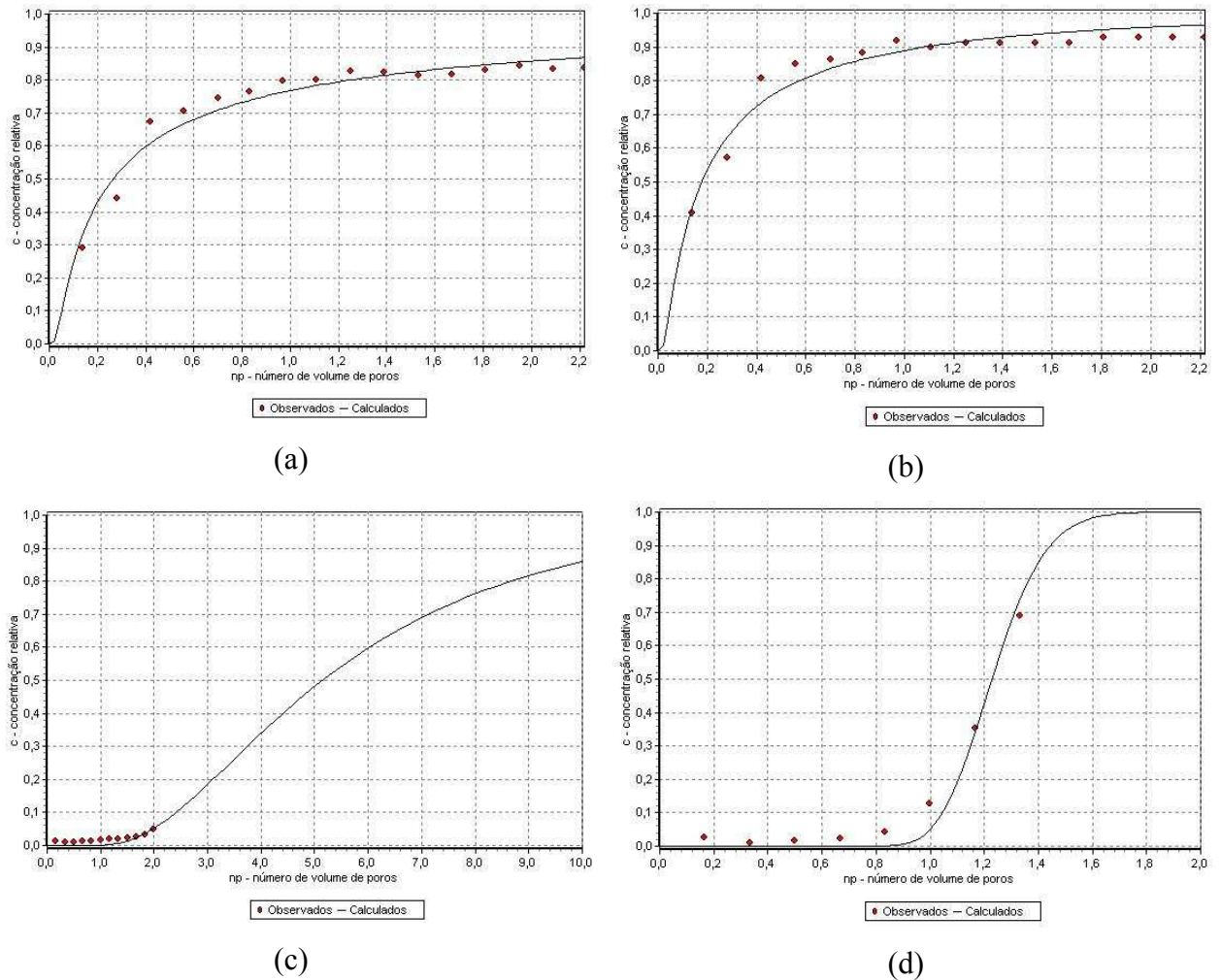


Figura 20 - Curvas de efluente dos íons de potássio e magnésio (PVAe) obtidas a partir do valores médios dos parâmetros de transporte obtidos. - Amostras com estrutura indeformada: (a) efluente de potássio; (b) efluentes de magnésio. - Amostras destorroadas: (c) efluente de potássio; (d) de efluentes de magnésio.

O formato dessas curvas de efluente é muito importante para compreensão do comportamento dos solutos em ensaios de percolação (NIELSEN e BIGGAR, 1962). O deslocamento das curvas para a direita representa a existência de interação solo-soluto, ou seja, o retardamento do soluto em relação ao escoamento da solução devido à existência de processos como a adsorção. Portanto, quanto maior for a defasagem entre a velocidade de escoamento da solução em relação à do soluto, maior será o fator de retardamento.

As curvas de efluentes obtidas a partir de amostras destorroadas estão mais deslocadas para direita em relação às curvas obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada, evidenciando maior valor do fator de retardamento para

ambos os íons em amostras destorroadas. Isto se explica pelo maior contato da solução, em movimento, com as superfícies de adsorção da fase sólida do solo.

De acordo com a Figura 20 (c) observa-se que o número de volume de poros passados através da coluna não foi suficiente para a recuperação da concentração inicial (C_0) do íon potássio, no entanto, o programa Disp foi capaz de gerar a curva teórica de efluentes.

Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do PV Ae, para os íons potássio e magnésio, respectivamente.

Tabela 4 - Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon potássio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PV Ae)

PV Ae						
Repetições	Amostra com estrutura indeformada			Amostra destorroadada		
	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)
1	1,174	15125,55	0,098	6,559	49,4904	3,207
2	1,371	29133,42	0,210	6,347	19,3013	3,027
3	0,924	898,0895	-0,043	6,432	28,795	3,095
4	1,156	15052,46	0,088	6,390	17,5943	3,051
Média	1,156	15052,380	0,088	6,432	28,795	3,095

Tabela 5 - Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon magnésio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe)

PVAe						
Repetições	Amostra com estrutura indeformada			Amostra destorroadada		
	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)
1	0,452	9723,568	-0,310	1,222	1,375	0,126
2	0,488	18539,448	-0,290	1,401	0,591	0,227
3	0,369	14,589	-0,357	1,130	3,044	0,074
4	0,516	832,671	-0,274	1,245	0,621	0,139
Média	0,456	7277,569	-0,308	1,250	1,408	0,142

Os valores obtidos do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição, de ambos os íons, são maiores nas amostras destorroadas em relação aos valores obtidos com as amostras com a estrutura indeformada do PVAe. O fator de retardamento, por ser uma característica que retrata a capacidade do solo em adsorver os solutos à medida que o fluxo de massa avança, depende das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação (OLIVEIRA et al., 2004). A velocidade de escoamento da solução de trabalho foi menor em amostras destorroadas, aumentando assim o tempo de interação entre os solutos e os colóides do solo. Além disso, em amostras destorroadas os agregados são menores, aumentando a exposição da superfície específica destes, o que aumenta a área total de contato entre a solução de trabalho e a fase sólida do solo. Portanto, maior tempo de interação e maior área específica de adsorção dos íons potássio e magnésio em amostras destorroadas, resultaram em maiores valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição.

Os valores negativos do coeficiente de distribuição obtidos para o íon magnésio nas amostras de solo com estrutura evidencia uma possível dessorção deste íon. Essa suspeita fundamenta-se no fato de uma competição catiônica, que, embora a valência do íon magnésio seja duas vezes maior que a do íon potássio, a concentração do potássio era 20 vezes maior que a do magnésio, prevalecendo o fator quantidade como definidor da capacidade de deslocamento de íons do complexo de troca do solo.

Em amostras com estrutura indeformada obtiveram-se maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo em relação às amostras destorroadas no PV Ae.

A maior dispersividade dos íons e a velocidade de escoamento da solução de trabalho em amostras com estrutura indeformada são fatores determinantes para os maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo nesta modalidade de amostras. Amostras com estrutura indeformada preservam a existência de um meio heterogêneo, com maior frequência de poros de diferentes tamanhos e formas, contribuindo assim para maiores valores da dispersividade, relativamente às amostras destorroadas, onde se tem um meio mais homogêneo. Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios obtidos da dispersividade para ambos os íons, em amostras com estrutura indeformada e destorroadas.

Tabela 6 - Valores médios obtidos de dispersividade dos íons potássio e magnésio, em amostras com estrutura indeformada e destorroadas no Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PV Ae)

Dispersividade (cm)		
	Amostra com estrutura indeformada	Amostra destorroadada
Potássio	194,16	3,68
Magnésio	107,66	0,15

MATOS et al. (1998) verificaram que a propriedade física que melhor explicou a variação do coeficiente dispersivo-difusivo para o zinco, cádmio, cobre e o chumbo foi a velocidade de escoamento da solução através da seção de escoamento formada por macroporos. Os autores ressaltaram a importância da macroporosidade em 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.

A grande diferença observada entre os valores obtidos a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas evidencia a importância da estrutura do solo em estudos de transporte de solutos no solo. Esse tipo de solo, por possuir estrutura em forma de blocos (RESENDE et al., 2007), a área reativa dos agregados que fica exposta à solução, durante uma passagem rápida, é pequena, resultando numa menor reatividade. Portanto, destorroando este tipo de solo, a atividade aumenta com a exposição das superfícies de contato das argilas, resultando

em um comportamento de mobilidade de solutos diferente em relação às condições naturais.

Na Figura 21 estão apresentadas as curvas de efluente dos íons potássio e magnésio, obtidas empregando a média dos valores observados, do LVAd.

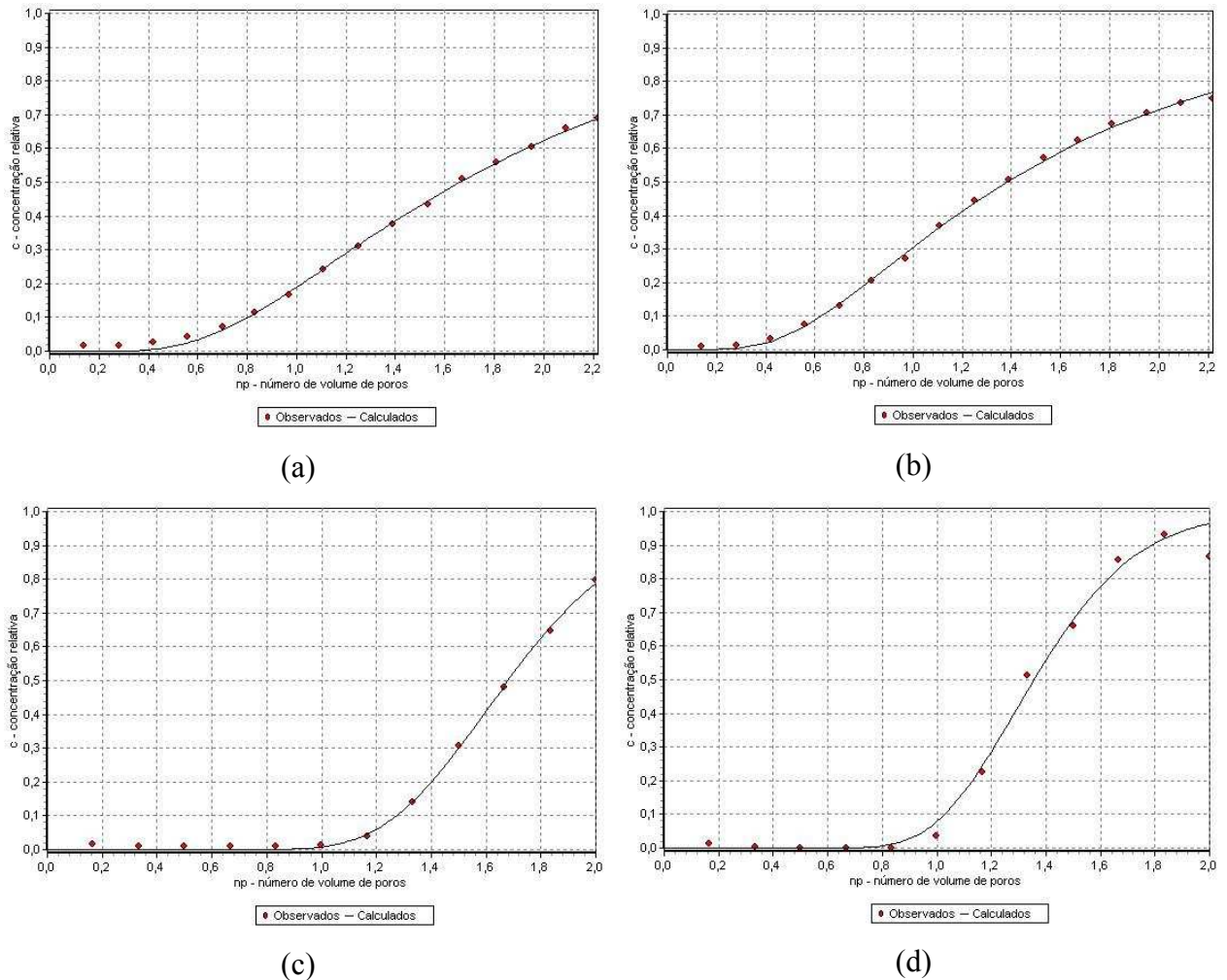


Figura 21 - Curvas de efluente dos íons potássio e magnésio (LVAd) obtidas a partir do valores médios dos parâmetros de transporte obtidos. - Amostras com estrutura indeformada: (a) efluente de potássio; (b) efluentes de magnésio. - Amostras destorroadas: (c) efluente de potássio; (d) de efluentes de magnésio.

As curvas obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada estão mais deslocadas para esquerda em relação às curvas obtidas de amostras destorroadas, no entanto, observou-se menor valor do fator de retardamento nas amostras destorroadas do LVAd.

A Figura 21 comprova que as curvas de efluentes obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada possuem menor declividade em relação às curvas obtidas

a partir de amostras destorroadas, para ambos os íons em estudo, evidenciando assim maior dispersividade dos íons. De acordo com JURY et al. (1991), em amostras com estrutura indeformada a dispersão e difusão dos solutos são mais evidentes ao longo da coluna de solo, comparativamente às amostras destorroadas.

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentados, respectivamente, os valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do LVAd, para os íons potássio e magnésio.

Tabela 7 - Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon potássio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

LVAd						
Repetições	Amostra com estrutura indeformada			Amostra destorroadada		
	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)
1	1,962	49,268	0,560	1,699	11,601	0,407
2	2,061	620,436	0,618	1,720	5,582	0,419
3	1,906	23,310	0,528	1,730	11,215	0,425
4	1,947	277,219	0,552	1,738	20,098	0,430
Média	1,969	242,558	0,565	1,722	12,124	0,420

Tabela 8 - Valores do fator de retardamento (R), do coeficiente dispersivo-difusivo (D) e do coeficiente de distribuição (K_d), obtidos para o íon magnésio a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

LVAd						
Amostra	Amostra com estrutura indeformada			Amostra destorroadada		
	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	R	D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	K_d ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)
1	1,683	59,079	0,398	1,364	10,423	0,212
2	1,777	789,120	0,453	1,336	3,491	0,196
3	1,658	26,222	0,383	1,454	12,888	0,264
4	1,693	372,575	0,404	1,391	19,403	0,228
Média	1,703	311,749	0,410	1,386	11,551	0,225

Os valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição obtidos em amostras do LVAd, com estrutura, foram maiores em relação aos valores destes parâmetros determinados em amostras destorroadas. Embora as amostras destorroadas possuam uma maior área específica em contato com a solução percolante, observou-se que a velocidade de escoamento da solução foi menos determinante na movimentação de solutos nesta modalidade de amostras. Acredita-se que houve uma maior difusão intra-agregados, dos íons, nas amostras com estrutura indeformada, o que resultou em maiores valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição no LVAd.

De maneira semelhante aos resultados obtidos para o PVAe, no LVAd os valores do coeficiente dispersivo-difusivo nas amostras com estrutura indeformada foram superiores aos valores determinados em amostras destorroadas. Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios da dispersividade para ambos os íons em amostras com estrutura indeformada e destorroadas do LVAd.

Tabela 9 - Valores médios obtidos de dispersividade (λ), para os íons potássio e magnésio, em amostras com estrutura indeformada e destorroadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

Dispersividade (cm)		
	Amostra com estrutura indeformada	Amostra destorroadada
Potássio	17,07	7,65
Magnésio	0,50	0,47

Comparando os valores obtidos entre os dois tipos de solo, observou-se que a diferença entre os resultados obtidos a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas não foi tão grande no LVAd, em comparação com o PVAe, o que evidenciou que não houve tanta interferência da estrutura do solo para este caso, principalmente para o fator de retardamento e para o coeficiente de distribuição.

De acordo com RESENDE et al. (2007), em solos com estrutura típica de grânulos, como o LVAd, os agregados têm mais ou menos as mesmas dimensões em todos os eixos e não há direção preferencial nestes solos. A fração argila do LVAd é composta principalmente por argilas 1:1, de área específica menor e, conseqüentemente, possui baixa reatividade. Portanto, quando se destorroa este tipo de solo, alterando sua estrutura, não se cria um meio tão diferente das condições naturais, no que diz respeito às características físicas e químicas.

OLIVEIRA et al. (2004), FERREIRA et. al. (2006) e MÉLO et al. (2006) trabalharam com amostras destorroadas de diferentes argissolos e latossolos, estes autores obtiveram maiores valores para o fator de retardamento e menores valores para o coeficiente dispersivo-difusivo dos íons potássio e magnésio, relativamente aos valores obtidos a partir de amostras com estrutura indeformada do PVAe e LVAd.

OLIVEIRA et al. (2004) e MÉLO et al. (2006) ressaltaram que a redução do tempo de contato entre os solutos e os colóides do solo, em razão de uma menor velocidade de escoamento da solução percolante, podem resultar em menores valores do fator de retardamento. ROSSI et al. (2007) compararam valores do fator de retardamento, da dispersividade e do coeficiente de dispersão para o íon nitrato em dois latossolos, considerando amostras com estrutura indeformada e destorroadas.

Neste trabalho os autores obtiveram valores superiores do fator de retardamento e do coeficiente dispersivo nas amostras destorroadas, enquanto o valor da dispersividade foi maior nas amostras com estrutura indeformada. Os autores afirmam que os parâmetros obtidos a partir de amostras destorroadas não são representativos das condições naturais do solo.

O valor médio do fator de retardamento e do coeficiente dispersivo-difusivo, obtidos para o íon potássio, foram maiores no PVAe relativamente àqueles obtidos no LVAd. As características físico-químicas dos dois solos permitem a interpretação desse comportamento. A capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_t) é maior no LVAd em relação ao PVAe, no entanto a CTC_t do LVAd está associada a alta concentração de alumínio, que é um íon trivalente e, por esta razão, é fortemente adsorvido aos colóides do solo. No PVAe a CTC_t está associada às bases trocáveis, principalmente cálcio e magnésio, que proporcionam maior interação com o potássio presente em concentração mais elevada na solução percolante (solução de trabalho). Considerando-se o íon magnésio, o valor médio do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição foram maiores no LVAd relativamente ao PVAe. Acredita-se que, rapidamente os sítios de adsorção dos colóides seriam saturados pelo íon magnésio presente na solução percolante e, conseqüentemente, a concentração relativa $C_e/C_0 = 0,5$ foi atingida com um menor número de volume de poros, acarretando assim, menores valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição neste solo, em relação ao LVAd. O coeficiente dispersivo-difusivo foi maior, para ambos os íons em estudo, no PVAe. A maior velocidade de escoamento da solução percolante no PVAe foi determinante para os maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo, em relação ao LVAd.

Nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 estão apresentados, respectivamente, a análise de variância e Teste de Tukey, a 5% de significância, das médias do fator de retardamento (R), do coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo (D) dos íons potássio e magnésio, considerando amostras com estrutura indeformada (M1) e amostras destorroadas (M2), para o PVAe e o LVAd.

A fim de que o coeficiente dispersivo-difusivo seguisse uma distribuição normal foi realizada uma transformação deste parâmetro, sendo que $D' = \log(D)$.

Tabela 10 - Análise de variância do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon potássio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

ANOVA				
F.V.	G.L.	Quadrado Médio		
		R	K_d	D'
Modalidade de amostras	1	25,2858*	8,1935*	12,6409*
Solo	1	15,1905*	4,8337*	5,0625*
Modalidade de amostras x Solo	1	30,5035*	9,9283*	2,2192**
Resíduo	12	0,0116	0,0047	0,2451
C.V. (%)		3,821	6,551	23,352

* significativo a 1% pelo teste F; ** - significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 11 - Teste de Tukey a 5 % de significância das médias do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon potássio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

Teste Tukey						
	R		K_d		D'	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
PVAe	1,16bB	6,43aA	0,09bB	3,1aA	3,94aA	1,42bB
LVAd	1,97aA	1,72bB	0,56aA	0,42bB	2,07aA	1,04bA

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna para cada variável não difere entre si em nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Tabela 12 - Análise de variância do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon magnésio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

ANOVA				
F.V.	G.L.	Quadrado Médio		
		R	K_d	D'
Modalidade de amostras	1	0,2273*	0,0701*	17,7534*
Solo	1	1,9134*	0,6412*	0,0005*
Modalidade de amostras x Solo	1	1,2315*	0,4016*	3,4735**
Resíduo	12	0,0659	0,0018	0,6657
C.V. (%)		6,18	35,986	51,918

* significativo a 1% pelo teste F; ** - significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 13 - Teste de Tukey a 5 % do fator de retardamento (R), coeficiente de distribuição (K_d) e do coeficiente dispersivo-difusivo transformado (D') do íon magnésio, obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

Teste Tukey						
	R		K_d		D'	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
PVAe	0,46bB	1,25aA	-0,31bB	0,14aA	3,09aA	0,05bA
LVAd	1,70aB	1,39bA	0,41aB	0,22bA	2,16aA	0,99aA

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna para cada variável não difere entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Para ambos os íons, houve diferença significativa a 1 % entre as duas modalidades de amostras (amostras com estrutura indeformada e amostras destorroadas) e os dois tipos de solo (PVAe e LVAd), como pode ser observado nas Tabelas 10 e 12.

De acordo com os resultados do Teste de Tukey, a 5 % de significância, houve diferença entre as médias obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e destorroadas de todos os parâmetros, para ambos os íons nos dois

tipos solos, com exceção de D' para o íon magnésio no LVAd, que não apresentou diferença significativa entre as médias.

Observando-se os dois tipos de solo, houve diferença, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey, entre as médias dos parâmetros de mobilidade do íon potássio obtidos a partir de amostras do PVAe e LVAd, exceto para o D' em amostras de solo retiradas com o método desenvolvido. Não houve diferença significativa pelo Teste de Tukey a 5%, entre as médias dos parâmetros de mobilidade do íon magnésio obtidos a partir de amostras do PVAe e LVAd.

4.3. Concentrações residentes, simuladas, em perfis de 1,0 m de profundidade

Utilizando os parâmetros de transporte de solutos e o programa computacional Disp, para amostras com estrutura indeformada e destorroadas, realizaram-se simulações das concentrações residentes dos íons potássio e magnésio.

Nas curvas de concentrações residentes apresentadas nas Figuras 22 e 23 verifica-se o deslocamento dos íons potássio e magnésio em perfil de 1,00 m de profundidade de um PVAe e de um LVAd, após 1:00 e 5:00 horas de aplicação contínua da solução de trabalho.

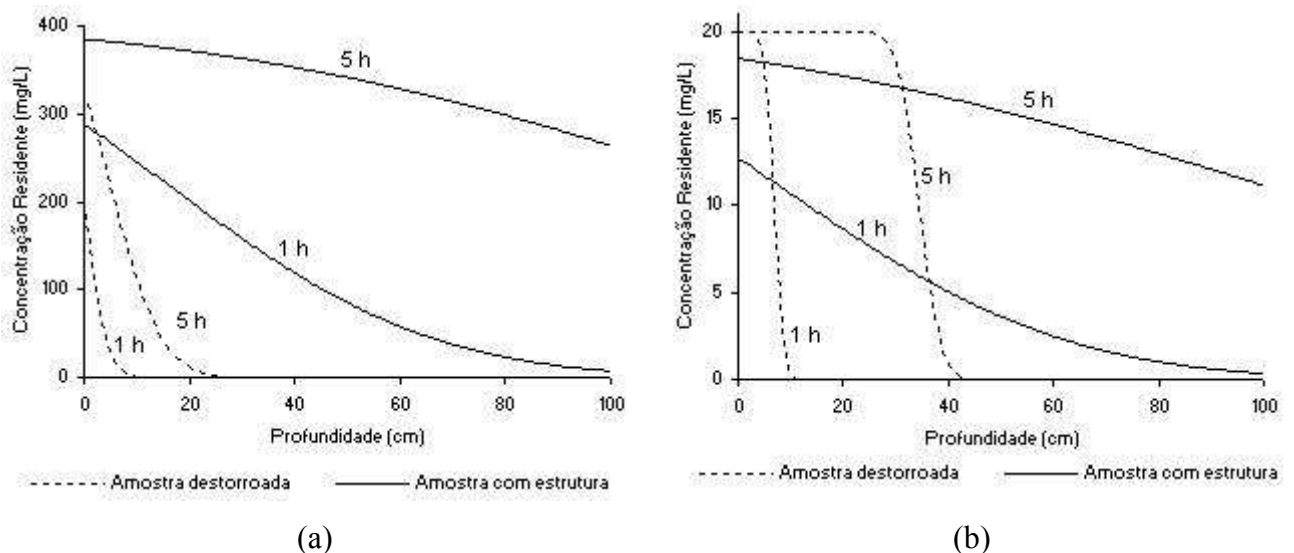


Figura 22 - Concentrações residentes dos íons em perfil de 1,00 m de profundidade de um Argissolo, após 1:00 e 5:00 horas de aplicação da solução de trabalho: (a) potássio; e (b) magnésio.

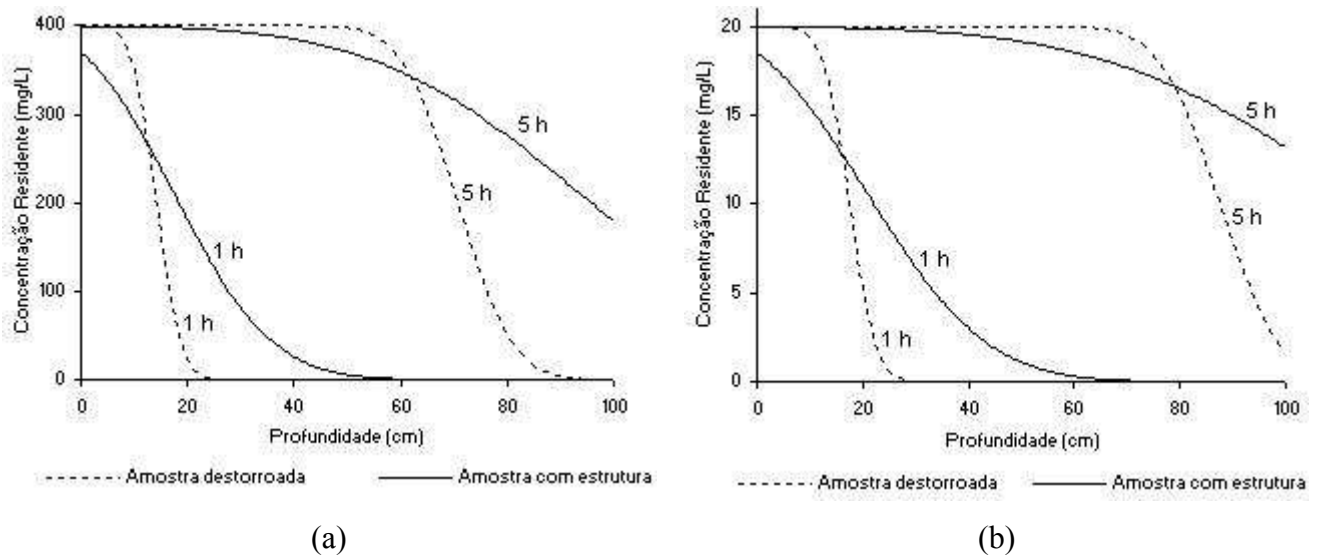


Figura 23 - Concentrações residentes dos íons em perfil de 100 cm de profundidade de um Latossolo após 1:00 e 5:00 horas de aplicação da solução de trabalho: (a) potássio; e (b) magnésio.

Tomando-se como referência a profundidade de 0,40 m e o íon potássio, observa-se que as concentrações residente no perfil do PVAe, após 1:00 e 5:00 horas de aplicação da solução de trabalho, foram nulas em amostras destorroadas, enquanto em amostras com estrutura indeformada as concentrações foram 118,62 e 352,99 mg L⁻¹. Para o LVAd, as concentrações do mesmo íon e profundidade foram 0,00 e 399,96 mg L⁻¹ em amostras destorroadas e 25,52 e 384,84 mg L⁻¹ em amostras com estrutura indeformada, após 1:00 e 5:00 horas de aplicação da solução de trabalho. A concentração do íon magnésio no perfil apresentou comportamento semelhante ao do potássio.

As concentrações residentes em função da profundidade foram maiores quando as simulações eram realizadas a partir dos parâmetros obtidos de amostras com estrutura indeformada. Essas diferenças entre as concentrações residentes obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e destorroadas estão associadas à maior dispersividade dos íons e da velocidade de escoamento da solução de trabalho em perfis com estrutura inalterada. Os menores valores do fator de retardamento associados à existência de caminhos preferências que favorecem o fluxo e a velocidade de escoamento da solução de trabalho em amostras com estrutura indeformada do PVAe, são responsáveis pela ocorrência de maior concentração residente dos íons em maiores profundidades. Por outro lado, o fato de o fator de retardamento ser semelhante tanto nas amostras destorroadas e com

estrutura indeformada do LVAd, o maior avanço dos íons para o caso de amostras com estrutura indeformada está estritamente relacionado aos maiores valores da velocidade de escoamento e à conseqüente dispersividade dos íons nesta modalidade de amostra.

Os resultados obtidos comprovam a necessidade de se utilizar amostras de solo com estrutura na obtenção de parâmetros de entrada nos modelos que simulam a mobilidade de contaminantes no perfil do solo como, no caso de avaliação de contaminações.

4.4. Condutividade hidráulica

Nas Tabelas 14 e 15 estão apresentados, para os solos PV Ae e LVAd, respectivamente, os valores de condutividade hidráulica em meio saturado obtidos a partir de amostras retiradas utilizando o método de amostragem desenvolvido, amostras destorroadas e amostras coletadas com o amostrador de Uhland.

Tabela 14 - Valores de condutividade hidráulica em meio saturado obtidos a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PV Ae)

PV Ae			
Repetições	K_0 (cm ³ cm ⁻² h ⁻¹)		
	M1	M2	M3
1	42,69	4,32	0,00
2	34,29	2,94	0,00
3	14,99	5,19	0,00
4	5,06	2,65	0,63
Média	24,26	3,78	0,16

Tabela 15 - Valores de condutividade hidráulica em meio saturado obtidos a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

LVAd			
Repetições	K ₀ (cm ³ cm ⁻² h ⁻¹)		
	M1	M2	M3
1	4,58	10,49	1,61
2	27,28	7,77	4,11
3	7,58	11,58	0,00
4	17,26	11,79	0,71
Média	14,17	10,41	1,61

Observou-se que para ambos os solos, amostras com estrutura indeformada retiradas utilizando-se o método de amostragem desenvolvido apresentaram valores superiores de condutividade hidráulica em relação aos valores obtidos em amostras destorroadas e amostras retiradas com o amostrador de Uhland. Estes resultados comprovam que a condutividade hidráulica do solo saturado não depende apenas da porosidade total, mas também, do tamanho dos poros e da continuidade deles. De acordo com HILLEL (1980), a porosidade total, a distribuição dos tamanhos dos poros e a tortuosidade do meio poroso são as características do solo que mais afetam a condutividade hidráulica. As amostras destorroadas não preservam a estrutura do solo, elimina os canais preferenciais ao escoamento de água, altera a geometria dos poros, o que por sua vez altera o formato natural de escoamento da água e solutos no solo.

As amostras coletadas utilizando-se o amostrador de Uhland foram as que apresentaram menores valores de condutividade hidráulica. Na retirada de amostras, empregando-se métodos de cravação do cilindro de amostragem, tal como o do amostrador de Uhland, pode haver quebra e deformação da estrutura original do solo. A compactação das amostras em virtude do atrito com as paredes dos anéis é a principal causa de insucesso no uso desses métodos.

Nas Tabelas 16 e 17 estão apresentados, respectivamente, a análise de variância e o Teste Tukey a 5 % de significância das médias, realizados a partir dos valores de condutividade hidráulica determinados a partir de amostras dos solos PVAc e LVAc, considerando-se os três métodos de amostragem.

Tabela 16 - Análise de variância da condutividade hidráulica obtidas a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3) do Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

ANOVA		
F.V.	G.L.	Quadrado Médio
		K ₀
Método de amostragem	2	695,6339*
Solo	1	2,6753*
Método de amostragem x Solo	2	146,4414**
Resíduo	18	68,6803
C.V. (%)		91,437

* significativo a 1% pelo teste F; ** - significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 17 - Teste Tukey a 5 % de significância das médias de condutividade hidráulica obtidas a partir de amostras retiradas utilizando o método desenvolvido (M1), amostras destorroadas (M2) e amostras coletadas com o amostrador de Uhland (M3)

Teste Tukey		
	Médias	Comparações
M1	19,2164	A
M2	7,0923	B
M3	0,8818	B

As médias seguidas de pelo menos uma mesma maiúscula na coluna não diferem entre si em nível de 5% de significância, pelo Teste de Tukey.

De acordo com a análise de variância, os valores da condutividade hidráulica em meio saturado, obtidos a partir de amostras retiradas com o método desenvolvido, amostrador de Uhland e amostras destorroadas, para ambos os solos, diferiram 1 % de significância entre si.

De acordo com o Teste de Tukey, a 5 % de significância, as médias de condutividade hidráulica em meio saturado, obtidas a partir de amostras retiradas com o método desenvolvido, diferiram significativamente daquelas determinadas a partir de amostras destorroadas e das amostras retiradas com o amostrador de Uhland, que, por sua vez, não diferem entre si.

Os resultados obtidos para os parâmetros de transporte de solutos e para a condutividade hidráulica em meio saturado comprovaram a hipótese de que na determinação destes parâmetros é necessário manter inalterada a estrutura do solo quando se deseja fazer inferências dos dados às condições em campo. Também não deixam dúvidas de que, ao alterar a estrutura natural do solo, tanto o padrão de escoamento da solução quanto dos íons nela contidos ficam alterados, produzindo, assim, resultados que não devem ser utilizados em programas computacionais para simular condições de campo.

O amostrador desenvolvido apresentou resultados convincentes, além de mostrar que é possível retirar amostras em uma faixa de profundidade maior, com um mínimo de perturbação da estrutura do solo, além da fácil operacionalidade.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos conclui-se que:

- O método desenvolvido para a amostragem de solo com estrutura é eficaz e de fácil operacionalidade.

- Os valores obtidos do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição, dos íons potássio e magnésio, são maiores nas amostras destorroadas em relação aos valores obtidos a partir das amostras com a estrutura indeformada, no PVAe. O maior tempo de interação e a maior área específica de adsorção em amostras destorroadas, resultam em maiores valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição.

- Os valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição obtidos em amostras com estrutura do LVAd, são maiores em relação aos valores destes parâmetros determinados a partir de amostras destorroadas. Acredita-se que houve uma maior difusão intra-agregados, dos íons, nas amostras com estrutura indeformada, o que resulta em maiores valores do fator de retardamento e do coeficiente de distribuição no LVAd.

- Em amostras com estrutura indeformada obteve maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo em relação às amostras destorroadas no PVAe e no LVAd. A maior dispersividade dos íons e a velocidade de escoamento da solução de trabalho em amostras com estrutura indeformada são fatores determinantes para os maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo nesta modalidade de amostras.

- As concentrações residentes são sensivelmente maiores quando as simulações são realizadas a partir dos parâmetros obtidos de amostras com estrutura indeformada. Essas diferenças entre as concentrações residentes obtidas a partir de amostras com estrutura indeformada e destorroadas estão associadas à maior dispersividade dos íons e da velocidade de escoamento da solução de trabalho em perfis com estrutura inalterada.

- Os valores de condutividade hidráulica em meio saturado, dos solos PVAe e LVAd, obtidos a partir de amostras retiradas com o método desenvolvido, são superiores em relação aos valores obtidos das amostras de solo retiradas com o amostrador de Uhland e amostras destorroadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, I. C. D.; NASCENTES, C. R.; MATOS, A. T.; AZEVEDO, R. F. Determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em latossolo compactado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, n.4, p.623-630, 2005.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F. & FERREIRA, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.604-611, 2006.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Amostragem do solo (1999). http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/anexos/download/6300.pdf f. acesso: 05/12/2008.
- DEMUELENAERE, R., G., A. Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro. 2004. 120 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004.
- de ZORZI, P.; BARBIZZI, S.; BELLI, M.; FAJGELJ, A.; JACIMOVIC, R.; JERAN, Z.; SANSONE, U.; van der PERK, M. A soil sampling reference site: The challenge in defining reference material for sampling. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.66, n.12, p.1588– 1591, 2008a.
- de ZORZI, P.; BARBIZZI, S.; BELLI, M.; MUFATO, R.; SARTORI, G.; STOCCHERO, G. Soil sampling strategies: Evaluation of different approaches. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.66, n.12, p.1691– 1694, 2008b.
- DREVER, J. I. *The geochemistry of natural waters*. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 436p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises de solo. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.
Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília:
EMBRAPA, 1999. 370p.
- FERREIRA, P. A.; GARCIA, G. O.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. R.; BORGES
JÚNIOR, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de
café conilon. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 28, n.1, p. 29-35, 2006.
- FERREIRA, P. A. Transporte de solutos no solo. Viçosa – MG: UFV, 2007. 30p.
(Apostila).
- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. Londres: Academic Press, 1980. 413 p.
- JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. *Soil Physics*. 5 ed. New York:
Jonh Wiley & Sons, 1991. 328p.
- KAY, B. D. e ANGERS, D. A. Soil struture. In: SUMNER, M. E., Ed. *Handbook of
soil science*. Boca Raton: CRC PRESS, 2000. p. a-229 – a-276.
- LA ROCHELLE, P.; SARRAILH, J.; TAVENAS, F.; ROY, M.; LEROUÉIL, S.
Causes of disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. *Canadian
Geotechnical Journal*, Ottawa, v.1, n.18, p.52-66, 1981.
- LEIJ., F. J. e van GENUCHTEN, M. T. Solute transport. In: SUMNER, M. E., Ed.
Handbook of soil science. Boca Raton: CRC PRESS, 2000. p. a-183 – a-228.
- MATOS, A. T.; COSTA, L. M.; FONTES, M. P. F.; MARTINEZ, M. A. Correlação
entre os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco,
cádmio, cobre e chumbo e algumas propriedades físicas dos solos. *Engenharia na
Agricultura*, Viçosa, v.6, n.4, p.235-246, 1998.
- MÉLO, 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*, Campina Grande, v.10, n.2, p.456-465, 2006
- NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Miscible displacement: III. Theoretical
considerations. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 26:216-221, 1962.
- OLIVEIRA, L. F. C, MARTINEZ, M. A., PRUSKI, F. F., RUIZ, H. A. MATOS, A.
T. Metodologia de amostragem de solo para a obtenção da condutividade

- hidráulica e da curva de eluição de solutos. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.8, n.2, p. 112-121, 2000.
- OLIVEIRA, E. M. M.; RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. *Campina Grande*, v.8, n.2/3, p.196-203, 2004.
- PREVEDELLO, C. L. Física de solos com problemas resolvidos. Curitiba: Saeafes, 1996. 446p.
- RADCLIFFE, D. E. e RASMUSSEN, T. C. Soil water moviment. In: SUMNER, M. E., Ed. *Handbook of soil science*. Boca Raton: CRC PRESS, 2000. p. a-87 – a-128.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G., F. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. 5 ed. rev. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322p.
- ROSSI, P.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N. Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.3, p. 675-682, 2007.
- SOARES, M. R. Coeficiente de distribuição (*K_d*) de metais pesados e sua relação com atributos físico-químicos de solos do estado de São Paulo. 2004. 200 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2004.
- SQUIRE, S., RAMSEY, M.H., GARDNER, M.J., LISTER, D. Sampling proficiency test for the estimation of uncertainty in the spatial delineation of contamination. *Analyst* 125, p.2026–2031, 2000.
- STAUNTON, S. Usefulness and limitations of the distribution coefficient, *K_d*, in understanding and predicting the fate and trace metals in soil. In: SYMPOSIUM OF ENVIRONMENTAL BIOGEOCHEMISTRY, 15., Wroclaw, Poland, 2001. Biogeochemical processes and cycling of elements in the environmental. Wroclaw, Poland: Polish Society of Humic Substances (PTSH), 2001. p. 49-50.
- TEIXEIRA, M. A. Desenvolvimento de equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. 1998. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

- Agrícola). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.
- van GENUCHTEN, M.T. E 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.
- van der PERK, M.; de ZORZI, P.; BARBIZZI, S.; BELLI, M.; FAJGELJ, A.; SANSONE, U.; JERAN, Z.; JACIMOVIC, R. The effect of short-range spatial variability on soil sampling uncertainty. Applied Radiation and Isotopes, Oxford, v.66, n. 12, p.1582– 1587, 2008.
- VIEIRA, E. O. Índices de lixiviação e modelagem do transporte de pesticidas no solo. . 2003. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2003.
- WOLSCHICK, D. Modelo SIMASS-C: inclusão da modelagem do crescimento e desenvolvimento do milho. 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.