

DISTRIBUIÇÃO DE SOLUTOS EM COLUNAS DE SOLO COM VINHAÇA

NELMÍCIO FURTADO DA SILVA¹; JOÃO ALBERTO LELIS NETO²; MARCONI BATISTA TEIXEIRA³; FERNANDO NOBRE CUNHA³; JARBAS HONORIO DE MIRANDA²; RUBENS DUARTE COELHO²

¹ Departamento de Agronomia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, nelmiciofurtado@gmail.com

² Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

³ Departamento de Agronomia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO.

1 RESUMO

O estudo do transporte dos componentes químicos da vinhaça no perfil do solo é importante, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. O uso da modelagem computacional nos permite de maneira precisa e rápida o monitoramento do deslocamento de solutos, importante na prevenção de impactos ambientais. Portanto, a obtenção e o entendimento dos parâmetros de transporte de solutos no solo auxiliam na redução da sua lixiviação para as camadas subsuperficiais. Neste sentido, objetivou-se, obter os parâmetros de transporte do sódio e potássio via vinhaça, a velocidade da água nos poros, o fator de retardamento, a dispersividade e o coeficiente de dispersão, tendo sido este trabalho feito em laboratório com colunas de solo Nitossolo Vermelho eutrófico. O ensaio foi conduzido empregando amostras deformadas coletadas na camada de 0-20 cm, posteriormente, a estas amostras foi aplicada vinhaça. Após a obtenção dos parâmetros de transporte, ajustados pelo programa computacional DISP, notou-se que as curvas de efluentes para ambos os íons estudados apresentaram semelhança em sua inclinação. Pelos resultados obtidos, os parâmetros de transporte evidenciaram positivamente os efeitos de adsorção e de deslocamento dos íons sódio e potássio presentes na vinhaça, principalmente em relação ao íon potássio.

Palavras-Chave: sódio; potássio; transporte de solutos; curva de eluição.

SILVA, N. F. da; LELIS NETO, J. A.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; MIRANDA, J. H. de; COELHO, D. C. DISTRIBUTION OF SOLUTES IN SOIL COLUMNS WITH VINASSE

2 ABSTRACT

The study of transport of chemical components of the vinasse in the soil profile is important, both environmentally and economical. Given this, the use of computational modeling is important as it allows for precise and fast way to monitor the movement of solutes in the prevention of environmental impacts. Therefore, obtaining and understanding the parameters of solute transport in the soil help to reduce leaching to the deep layers. In this sense, our aim was to work with these additional transport parameters of sodium and potassium via vinasse, as the speed of pore water velocity, retardation factor, dispersivity and the dispersion

coefficient, was performed in laboratory columns soil Alfisol. The test was conducted using the deformed samples collected at 0-20 cm, later applied to vinasse. After obtaining the transport parameters, adjusted by the computer program DISP, it was noted that the effluent curves for both ions studied showed similarity in its slope. The results obtained transport parameters showed positive effects of adsorption and displacement of sodium and potassium ions present in the vinasse, especially in relation to potassium ion.

Keywords: sodium; potassium; solute transport; breakthrough curve.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira estimada em 8.368,4 mil hectares no último levantamento em 2011, distribuídos em todos estados produtores. A previsão do total de cana moída na safra 2011/12 é de 571.471,0 milhões de toneladas (Conab, 2011).

A vinhaça é considerada o principal resíduo da indústria sucroalcooleira, produzida numa razão de aproximadamente 13 litros para cada litro de álcool. A aplicação da vinhaça no solo teve sua disseminação após o surgimento do Pró-Álcool, quando a produção de álcool passou a ser feita em grande escala, conseqüentemente, provocando o surgimento de maiores quantidades dos resíduos (Brito & Rolim, 2005).

O emprego da vinhaça como fertirrigação para a cana-de-açúcar merece destaque nacional quando se pensa na produção de efluentes do setor agroindustrial brasileiro (Luz, 2005). A vinhaça é o subproduto da fabricação do álcool, sendo composta, em sua maioria, por 93% de água e 7% de sólidos, 75% dos quais correspondem à matéria orgânica. A fração sólida é constituída, principalmente, de compostos orgânicos e elementos minerais, dos quais cerca de 20% é K, o nutriente determinante para a definição da dose a ser aplicada nos solos (Marques, 2006).

O entendimento da distribuição da água e soluto no solo para as distintas profundidades do perfil é de suma importância para prevenir um desequilíbrio de nutrientes no solo, evitando, assim, possível contaminação no lençol freático e desestruturação do solo (Costa, 2002).

O movimento de solutos no solo depende de fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, às propriedades do líquido percolante e às condições ambientais que influenciam nos parâmetros de transporte dos solutos. Entre os fatores que influenciam o processo de migração e a retenção de substâncias químicas, podem ser destacados: o tipo de solo, mineralogia, capacidade de troca catiônica, espécies de cátions absorvidos, velocidade de percolação e teor de matéria orgânica; concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, condições hidrogeológicas e temperatura e pH do meio (Costa, 2002).

A lixiviação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Entre os atributos químicos que afetam a lixiviação, estão a capacidade de retenção de íons e o pH (Santos et al., 2002).

Modelos de simulação podem proporcionar um entendimento melhor dos processos que ocorrem no solo, relativos ao deslocamento de solutos, constituindo ferramentas aplicáveis a estudos de minimização de impactos ao meio ambiente. O sucesso da simulação e resolução das equações que predizem o deslocamento de solutos no solo é necessário à determinação dos parâmetros de transporte que influenciam na relação solo-soluto. Os

parâmetros mais relevantes que devem ser determinados para este fim são a velocidade da água no poro, os coeficientes de difusão-dispersão e o fator de retardamento.

Nesse contexto, segundo Borges Júnior & Ferreira (2006), a preocupação com o comportamento de determinados produtos químicos no subsolo tem motivado os pesquisadores a desenvolver modelos teóricos com o objetivo de descrever os processos físicos envolvidos no transporte de solutos no perfil do solo.

Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo determinar os fatores de retardamento, coeficientes dispersivos-difusivos e as curvas de efluente para os íons sódio e potássio presentes na vinhaça, em colunas de solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Física do Solo pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, situada em Piracicaba/SP. O solo foi coletado no município de Piracicaba-SP, classificado e definido, segundo Embrapa (2006), como Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe). Trata-se de um solo constituído por material mineral, com horizonte B nítico abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, dentro de 150 cm da superfície do solo. Apresenta textura argilosa, com teores de argila maiores que 350 g kg^{-1} de solo a partir do horizonte A, e relação textural igual ou menor que 1,5. Foram utilizadas amostras do solo coletadas na camada de 0-20 cm, sendo caracterizadas física e quimicamente (Tabela 1).

Tabela 1. Características físico-químicas do Nitossolo Vermelho eutrófico utilizado no preenchimento das colunas de solo

Macronutrientes											
Prof.	P ¹	M.O ²	pH ³	K ¹	Ca	Mg	H+Al	S ⁴	T ⁵	Al	V ⁶
(cm)	mg/dm ³	g/dm ³	CaCl ₂	mmol/dm ³							%
0 - 20	8,0	27,0	5,0	2,5	15	25,2	39,0	48,0	86,0	1,0	55,8
Textura											
Prof.	Argila			Silte			Areia				
(cm)	g.kg ⁻¹										
0-20	410			209			381				

¹Extrator de P e K, Mehlich-1. ²M.O Matéria orgânica, g/dm³. ³pH em cloreto de cálcio, g/100 cm³ de terra. ⁴S Soma de bases, Ca + Mg + K. ⁵T Capacidade de troca de cátions, S + H+ Al. ⁶V Porcentagem de saturação de bases, V=100 S/T.

Os materiais de solo foram peneirados em uma malha de 2 mm e seco ao ar. Utilizou-se uma coluna de PVC com as dimensões de 25 cm de altura e 5 cm de diâmetro. As colunas foram preenchidas com solo até a altura de 20 cm. O preenchimento das colunas foi feito de forma a manter a densidade do solo o mais próximo possível do encontrado a campo no entorno de 1,29 a 1,31 g cm³. A extremidade inferior da coluna continha um disco de PVC crivado, de poros finos e um disco de papel de filtro rápido, era envolta com um tampão

munido de um espaço vazio abaixo do disco para drenagem do efluente. A Figura 1 ilustra os detalhes de construção da coluna de solo.



Figura 1. Detalhe da construção e preparo da coluna de solo.

Depois de preenchida a coluna com as amostras de solo, ela foi saturada com água destilada lentamente, de baixo para cima, até a água atingir 2/3 da sua altura, e posta dentro de um recipiente de plástico. As colunas eram deixadas em repouso durante 24 h. Depois de saturadas, eram fixadas em um suporte vertical e interligadas a uma bomba peristáltica para a aplicação de água destilada até o momento em que o íon a ser analisado retirado do efluente se encontrasse próximo de zero. Após esse período, era feita a troca da água destilada por vinhaça, começando assim o teste. A aplicação das soluções foi feita por meio de uma bomba peristáltica com um dosador para evitar variações na vazão de entrada na coluna de solo, mantendo a vazão constante, porém com um mínimo possível de perda da lâmina.

O grau de mistura dos dois fluidos miscíveis pode ser quantificado determinando a relação entre a concentração do soluto no efluente (C), coletado na secção de saída do elemento controle, e a concentração desse mesmo soluto na solução deslocadora (C_0). De

maneira geral, a relação C/C_0 é unitária em materiais não reativos, quando se tem passado um volume de fluido deslocador igual a duas vezes o número de volume de poros (VP) que estão contribuindo para o escoamento no perfil.

A Figura 2 esquematiza minuciosamente os detalhes construtivos e de ensaio da coluna de solo para elaboração da curva de eluição.

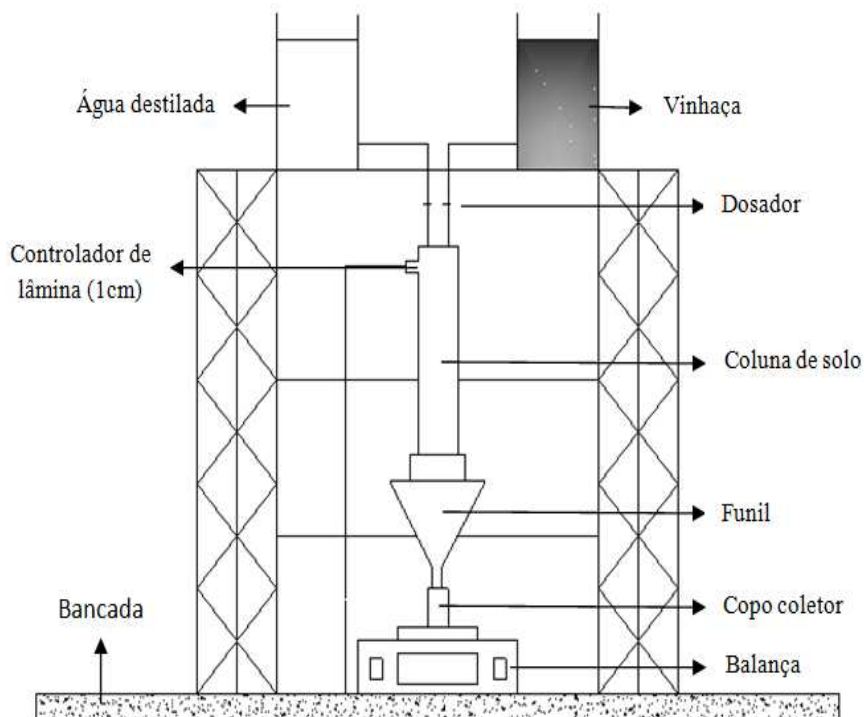


Figura 2. Esquema do ensaio da coleta de solução na coluna de solo para construção da curva de eluição.

A vinhaça foi coletada em uma usina de álcool próxima à cidade de Piracicaba, tendo sido tomados os devidos cuidados para se obter uma amostra representativa, coletada antes de ser destinada aos canais de transporte da vinhaça no campo para evitar uma contaminação ou adição de partículas de solo. A vinhaça foi analisada no laboratório para determinação de sua composição química, determinando os teores de potássio e sódio, segundo Embrapa (1997). A vinhaça era homogeneizada constantemente para evitar que a parte sólida decantasse no reservatório no momento da aplicação. A Tabela 2 mostra a caracterização físico-química da vinhaça utilizada no experimento.

Tabela 2. Caracterização físico-química da vinhaça utilizada na coluna de solo

Descrição	Unidade	Valores
DBO ¹	mg/l	10974,5
DQO ²	mg/l	62085,5
SDT ³	mg/l	14886
CE ⁴	dS/m	11,5
pH	-	4,5
K	mg/l	2934
Na	mg/l	51

¹DQO - demanda química de oxigênio; ²DBO - demanda bioquímica de oxigênio; ³SDT - sólidos dissolvidos totais; ⁴CE - condutividade elétrica.

O volume coletado no efluente para realizar o teste foi de 10 mL, volume adequado para a realização das análises químicas. O teste chegava ao fim quando a concentração inicial era coletada no final da coluna, tendo sido feitas quatro repetições de colunas de solo.

A Figura 3 exemplifica os recipientes contendo o volume coletado do efluente da coluna de solo para análise e elaboração da curva de eluição.



Figura 3. Recipientes contendo o volume coletado do efluente.

Foram determinados os parâmetros de transporte, o fator de retardamento e o coeficiente de difusão-dispersão, utilizando o modelo computacional DISP, Programa para cálculo dos parâmetros de transporte de solutos no solo em deslocamento de fluidos miscíveis desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, por Borges Júnior & Ferreira (2006), com o qual foram ajustadas as curvas dos efluentes para os íons sódio e potássio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios dos parâmetros de transporte dos íons - fator de retardamento (R), transporte-dispersão (D), número de Peclet (P) e coeficiente de determinação (R^2) se encontram na Tabela 3. Para o íon potássio, obteve-se maior valor no fator de retardamento, que expressa as interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação da solução deslocadora no solo, evidenciando que o íon potássio tem maior interação com o solo que o sódio. Todavia, a mobilidade dos íons no solo influencia a eficiência de utilização dos nutrientes pelas plantas e sua lixiviação. Íons com alta mobilidade podem se perder facilmente por lixiviação e contaminar águas subterrâneas (Sangoi et al., 2003).

O transporte de potássio e sódio no solo está relacionado com o tamanho dos agregados, sendo mais fácil o transporte daqueles de menor tamanho, com o tempo de difusão, a geometria do meio poroso (inter e intra-agregados), a textura do solo e o tipo de mineral de argila, como demonstrado por Miranda et al. (2005). Estes autores avaliaram uma simulação do deslocamento do íon potássio em colunas de solo não-saturado utilizando do modelo MIDI, bem como apresentaram a determinação dos parâmetros de transporte do íon potássio em um Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa. Previram, com bom ajuste, o

perfil de umidade e o de deslocamento do íon potássio, incluindo o retardamento de movimentação desse íon em relação à frente de molhamento. Para que a simulação atinja padrões cada vez mais confiáveis, ressaltaram a importância da determinação dos parâmetros de transporte, principalmente quando se trata da previsão do deslocamento de solutos no solo.

Tabela 3. Parâmetros de transporte para ambos os elementos obtidos para um Nitossolo Vermelho eutrófico sob aplicação de vinhaça, utilizando-se o modelo computacional DISP

Elemento	R	D ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$)	P	R ²
Sódio	2,032	7,737	67,86	0,977
Potássio	1,396	4,0912	64,19	0,989

Segundo Nielsen & Biggar (1962), o número de volume de poros correspondente à concentração relativa de 0,5 é uma primeira indicação, no sentido da existência ou não, de interações soluto-solo. Quando o valor correspondente a 0,5, a concentração relativa é de 1 volume de poros, significa que o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo; por outro lado, quando o valor é maior que 1, isto é, a curva de efluente se apresenta deslocada para a direita, significa que, ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando em um fator de retardamento maior que a unidade. Portanto, quanto maior o fator de retardamento, maior a interação soluto-solo.

Como a fase sólida do solo interage com os íons em solução (adsorção), eles têm seu transporte retardado em relação à água. Genuchten & Wierenga (1986) consideraram esse fator de retardamento (R) igual ao número de volume de poros, para $C/Co = 0,5$.

Foram ajustados modelos de regressão relacionando C/Co com o VP, sendo escolhido o modelo com maior R² ajustado e significância dos coeficientes até 5%. O fator de retardamento para o sódio e o potássio (R), mostrado na Tabela 3, foi considerado igual ao número de volume de poros para $C/Co = 0,5$, conforme Genuchten & Wierenga (1986).

Apesar de se tratar de um solo argiloso (areia = 38 %, silte = 20 % e argila = 41 %), com predominância de composição caulínica na fração argila, ocorreu interação entre o sódio e o potássio em relação aos coloides demonstrada pelo fator de retardamento, em média 2,032 VP para o sódio e 1,396 VP para o potássio (Tabela 3), indicando que, no solo estudado, é necessário aplicar a ele os respectivos VP, além da lâmina de irrigação a ser aplicada para compensar o retardamento destes dois elementos em relação à frente de avanço da solução no solo.

Embora a vinhaça possa promover melhoria na fertilidade do solo, as quantidades aplicadas não devem ultrapassar sua capacidade de troca iônica, isto é, as doses devem ser definidas de acordo com as características de cada solo, de forma a não proporcionar o desbalanceamento de elementos minerais (Silva et al., 2006). A Cetesb, por meio da norma P4.231 (versão janeiro/2005), estabeleceu, como premissa para aplicação da vinhaça, que a concentração máxima de potássio trocável no solo não pode exceder 5% da sua Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e que, atingido tal limite, a aplicação deve ser feita de forma a somente repor a extração média de K da cultura (Gariglio, 2008).

O potássio necessitou de uma quantidade de no mínimo 2,6 VP e no máximo 3,3 VP para que a concentração inicial fosse atingida (Figura 4), ao contrário do sódio, que ficou em torno de 1,8 VP, não ultrapassando 2 VP (Figura 5).

Na curva de eluição do potássio (Figura 4), observou-se maior deslocamento da curva de eluição para a direita, quando comparado ao sódio, indicando que o íon potássio foi retido

no solo com maior intensidade que o sódio. O potássio, segundo Malavolta (1980), é um macronutriente que tem caminhamento no solo predominantemente pelo processo de difusão. Entretanto, uma grande parcela desse nutriente pode se movimentar no solo por fluxo de massa.

Zanini (1991) verificou que, de maneira geral, os locais de maiores concentrações de K^+ coincidiram com os locais de maiores valores de umidade, evidenciando seu caminhamento por fluxo de massa, concordando com Malavolta (1980), isto é, a distribuição de potássio no solo correlacionou-se com a distribuição de água, indicando que ela pode ter elevado o controle da localização desse íon no solo em função da fertirrigação e da irrigação.

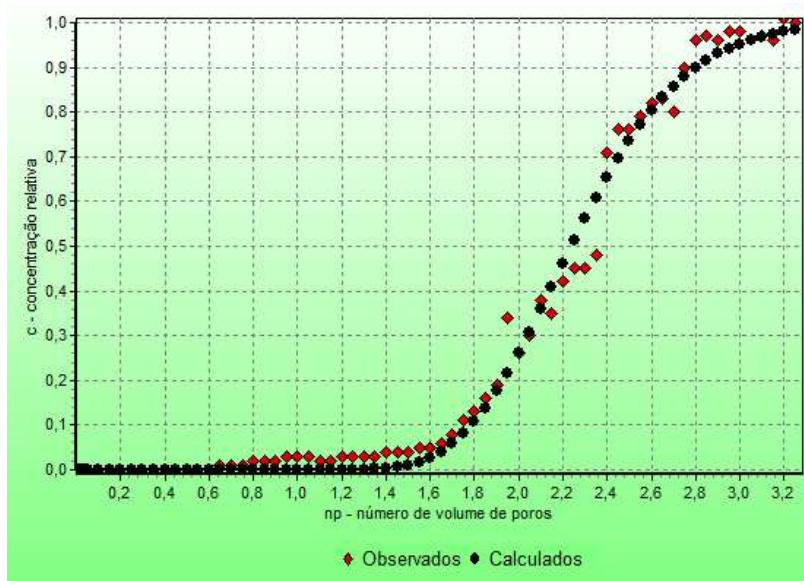


Figura 4. Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça para íon potássio.

Na curva de eluição do sódio (Figura 5), observou-se menor deslocamento da curva de eluição para a direita, quando comparado ao potássio, indicando que o íon sódio foi retido no solo com menor intensidade do que o potássio.

Brito et al. (2007) avaliaram o poder de retenção em colunas de solo para o Nitossolo, Argissolo e Espodossolo, que receberam doses de vinhaça, e no que diz respeito a íons lixiviados presentes na vinhaça, como o potássio e o sódio, que possam vir a poluir as águas do lençol freático, verificaram que, apesar da elevação na concentração do Na, todos os solos tiveram elevado poder de retenção desse cátion. A concentração do K do lixiviado diminuiu significativamente em relação à concentração da vinhaça, obedecendo a uma lógica baseada no maior ou menor teor de argila.

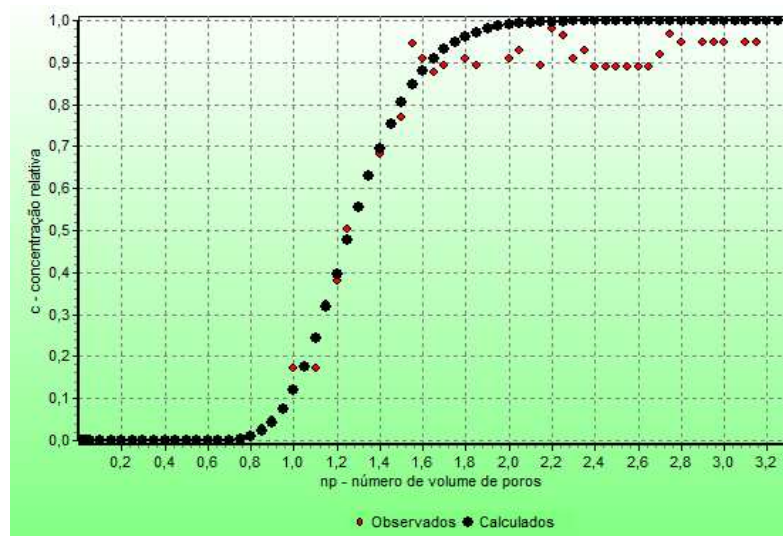


Figura 5. Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça para íon sódio.

As perdas de nutrientes causadas pelo fenômeno da lixiviação são importantes pelo fato de significar baixas eficiências de utilização de nutrientes pelas culturas e, por consequência, menores rendimentos. Quando lixiviados, os nutrientes incorporam-se ao lençol freático pelo processo de drenagem interna e, assim, são transportados a grandes distâncias, contaminando o lençol freático e também os mananciais de água potável (Konrad, 2002).

Os parâmetros de transporte dos íons estudados foram obtidos pela aplicação do software DISP, cujo valor mais alto do coeficiente de dispersão-difusão ocorreu para o sódio. Valores mais elevados dos coeficientes de difusão-dispersão estão relacionados às menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo, tornando os acréscimos na concentração relativa baixos em relação aos acréscimos no número de volume de poros (Nielsen & Biggar, 1962).

A menor velocidade de avanço do potássio é uma das possíveis causas para os seus menores valores de coeficiente de dispersão-difusão para este solo. O coeficiente de dispersão-difusão pode ser indicativo da capacidade do solo em reter determinado soluto à medida que a frente de umedecimento da solução aplicada avança no perfil do solo (Engler et al., 2008).

Os coeficientes de determinação (R^2) para as curvas de efluentes foram superiores a 97%, indicando correlação adequada entre os valores experimentais e os valores ajustados pelo programa DISP.

6 CONCLUSÕES

A metodologia de amostragem de colunas de solo foi adequada ao estudo da lixiviação de sódio e potássio.

Os parâmetros de transporte evidenciaram positivamente os efeitos de adsorção e de deslocamento dos íons sódio e potássio presentes na vinhaça, sendo que o íon potássio foi retido no solo com maior intensidade do que o sódio.

Recomenda-se, no solo estudado, aplicar 2,032 VP para o sódio e 1,396 VP para o potássio, além da lâmina de irrigação a ser aplicada para compensar o retardamento destes dois elementos em relação à frente de avanço da solução no solo.

O software DISP apresentou uma excelente correlação para os íons estudados, com um coeficiente de determinação superior a 97%.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, v.10, n.3, p.604-611, 2006.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M. Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v.26, n.1, p.78-88, 2005.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. R. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.27, n.3, p.773-781, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, dezembro/2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf>. Acesso em: 08 de abr. 2012.

COSTA, P. O. da S. **Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/BA**. Rio de Janeiro: PUC, 2002. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2º ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENGLER, M. P. C.; CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V.; BLOEM, E.; SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. **An alternative approach for the determination of soil water mobility**. *Pedosphere*, v.18, n.3, p.328-334, 2008.

GARIGLIO, H. A. de A. **Alterações físicas e químicas e mobilidade de solutos em solos submetidos à aplicação de vinhaça proveniente da fabricação de álcool carburante**. Minas Gerais: UFV, 2008. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).

GENUCHTEN, M. T. VAN; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. **Soil Science American Society**, v.67, n.1, p.1025-1054, 1986.

KONRAD, M. **Efeito de sistemas de irrigação localizada sobre a produção e qualidade da acerola (*Malpighia spp*) na região da Nova Alta Paulista**. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

LUZ, P. H. de C. **Novas tecnologias no uso da vinhaça e alguns aspectos legais**. II simpósio de tecnologia de produção de cana-de-açúcar, 2005, 73p.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2.ed. Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 1980. 91 p. (Boletim Técnico, 4)

MARQUES, M. O. **Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Editorial 2006. p.369-375.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Miscible displacement**: III, Theoretical considerations. Soil Science Society of America Proceedings, v.26, n.3, p.216-221, 1962.

MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; LIBARDI, P. L.; FOLEGATTI, M. V. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia. Agrícola, Jaboticabal**, v.25, n.3, p.677-685, 2005.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia e manejo de restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, v.01, n.33, p.65-70, 2003.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.579-585, 2006.

ZANINI, J. R. **Distribuição de água e do íon K^+ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento**. II - Teores de K^+ no bulbo molhado. ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, v.46, n.1, p.24-38, 1991.