

DINÂMICA DO POTÁSSIO, CLORO E FÓSFORO EM SOLO DA REGIÃO DO SUBMÉDIO DO VALE DO RIO SÃO FRANCISCO

PEDRO ROBINSON FERNANDES DE MEDEIROS¹; MARAÍSA DA SILVA FERREIRA²; JARBAS HONÓRIO DE MIRANDA³; MIGUEL JÚLIO MACHADO GUIMARÃES⁴; ALLAN CUNHA BARROS⁵ E CLÁUDIO AUGUSTO UYEDA⁶

¹ *Colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Campus Juazeiro, Av. Antônio C. Magalhães, 510 - Country Club, Juazeiro - BA, CEP: 48902-300. Brasil. E-mail: pedro.fernandes@univasf.edu.br.*

² *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Campus Juazeiro, Av. Antônio C. Magalhães, 510 - Country Club, Juazeiro - BA, CEP: 48902-300. Brasil. E-mail: silva.maraisaf@gmail.com.*

³ *Departamento de Engenharia de Biosistemas, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba - SP, CEP 13418-900. Brasil. E-mail: jhmirand@usp.br.*

⁴ *Colegiado de Agronomia, Instituto Federal do Maranhão - Campus São Raimundo das Mangabeiras., Rod. Transamazônica, sn, São Raimundo das Mangabeiras - MA, CEP: 65840-000. Brasil. E-mail: miguel.guimaraes@ifma.edu.br.*

⁵ *Agronomia, Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca, Av. Manoel Severino Barbosa - Bom Sucesso, Arapiraca - AL, CEP: 57309-005. Brasil. E-mail: allan.cunha@arapiraca.ufal.br.*

⁶ *Departamento de Desenvolvimento Educacional, Instituto Federal do Pernambuco - Campus Vitória do Santo Antão, End.: Propriedade Terra Preta, s/n, Zona Rural, Vitória de Santo Antão - PE, CEP: 55602-970. Brasil. E-mail: claudio.uyeda@vitoria.ifpe.edu.br.*

1 RESUMO

Os modelos matemáticos podem ser usados para entender a dinâmica dos íons no solo, em função principalmente da mobilidade da fração líquida em relação a fração sólida. O objetivo da pesquisa foi avaliar o deslocamento miscível dos íons potássio, cloro e fósforo, em colunas de PVC preenchidas com Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA_d) em diferentes densidades, utilizando como ferramenta adicional, o modelo matemático STANMOD (STudio of ANalytical MODels) para o ajuste numérico das *Breakthrough Curves* (BTC). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Irrigação da UNIVASF Campus Juazeiro-BA, utilizando-se colunas de PVC nas profundidades (alturas) de 0,10; 0,20 e 0,30 m e nas densidades de 1,30; 1,50 e 1,70 g cm⁻³. Utilizou-se solução com concentração de 1000 mg L⁻¹ contendo os fertilizantes Cloreto de Potássio (58% de K₂O e 39% de Cl) e Superfosfato Simples (8% de P₂O₅, 16% de Cálcio (Ca) e 8% de Enxofre (S)). Os resultados permitiram concluir que os íons potássio, cloro e fósforo tiveram uma elevada mobilidade no Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA_d) apresentando um menor valor do fator de retardamento (R) e um maior número de Peclet (P). O modelo STANMOD apresentou desempenho satisfatório no ajuste numérico das *Breakthrough Curves* (BTC's).

Palavras-chave: dispersividade, curvas de avanço de íons, dinâmica de solutos, STANMOD

**MEDEIROS, P. R. F.; FERREIRA, M. S.; MIRANDA, J. H.; GUIMARÃES, M. J. M.;
BARROS, A. C.; UYEDA, C. A.**

**IONS DYNAMICS IN POTASSIUM, CHLORINE AND PHOSPHORUS IN SOILS IN
THE SÃO FRANCISCO RIVER VALLEY**

2 ABSTRACT

Mathematical models can be used to understand the dynamics of ions in the soil, mainly due to the mobility of the liquid fraction in relation to the solid fraction. The objective was to measure the miscible displacement of potassium, chlorine and phosphorus ions in PVC columns filled with typical Dystrophic Yellow Argisol (PAd) in different densities, using the mathematical model STANMOD (Analytical Model Studio) as an additional tool Numeric Advance Curves (BTC). The tests were conducted at the Irrigation Laboratory of UNIVASF Campus Juazeiro-BA, using PVC columns at depths (heights) of 0.10; 0.20 and 0.30 m and densities of 1.30; 1.50 and 1.70 g cm⁻³. A solution with a concentration of 1000 mg L⁻¹ containing the fertilizers Potassium chloride (58% K₂O and 39% Cl) and Simple Superphosphate (8% P₂O₅, 16% Calcium (Ca) and 8% Sulfur) was used. (S)). The results allowed to conclude that the potassium, chlorine and phosphorus ions had high mobility in the typical Yellow Dystrophic Argisol (PAd), reducing a lower value of the delay factor (R) and a greater number of Peclet (P). The STANMOD model presents satisfactory performance without numerical adjustment of Breakthrough Curves (BTC's).

Keywords: dispersive, ion advance curves, solute dynamics, STANMOD

3 INTRODUÇÃO

A mobilidade e a capacidade de adsorção dos íons no solo são influenciadas por diversos fatores, ou seja, o deslocamento de fluidos miscíveis é um processo que ocorre quando um fluido mistura-se com outro fluido e o desloca no perfil do solo, logo, a mobilidade de solutos no solo está inversamente relacionada à sua adsorção, à fração sólida ou às condições do meio que favoreçam a precipitação dos íons (OLIVEIRA et al., 2013).

O uso de modelos matemáticos para estimativa da retenção e transporte de íons no solo tem se tornado uma ferramenta aceitável para auxiliar na análise e simulação do deslocamento dos íons nos solos. Ensaios em colunas de solo associados a modelos matemáticos, possibilitam o entendimento do comportamento dos solutos no meio poroso e os processos de difusão, dispersão e mudanças durante o transporte (OLIVEIRA et al., 2013). Tais estudos são relevantes no sentido de tornar possível a estimativa da retenção e transporte de íons no solo, auxiliando na melhoria de atuais métodos,

bem como, auxiliar na aplicação de tecnologias que de certa forma apresentam algum erro de medição, tais como, calibração de sensores eletrônicos.

Com isso, a grande variedade de modelos já desenvolvidos em laboratórios, possibilita a melhoria das ferramentas computacionais, fornecendo informações para a aplicação desses modelos com confiança. Para que estes modelos possam determinar precisamente o movimento de solutos no solo, é necessária a determinação de alguns parâmetros de transporte como: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D) e dispersividade (λ) (SILVA, 2013). Podendo-se obter esses parâmetros partir da utilização do modelo STANMOD (*Studio of ANalytical MODels*), o qual estima os parâmetros por meio de concentração obtidas em laboratório ou prediz as concentrações de solutos em condições de escoamento permanente, usando para isso equações de convecção-dispersão (SILVA, 2013). O modelo tem como dados de entrada a concentração relativa (C/C_0) e o volume da solução dividido pelo volume de poros (VP). E como dados de saída o número de Peclet

(P), o fator de retardamento (R). Com esses, determinados o coeficiente de dispersão (D) a dispersividade (λ) e a velocidade da água nos poros (v).

O número de Peclet (P) é adimensional e relaciona a velocidade de advecção de um fluxo com sua velocidade de difusão, considerando o comprimento da coluna de solo. Já o fator de retardamento (R), representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante, representando, portanto, a interação entre o soluto e a fase sólida do solo (SANTOS, 2014).

A hipótese da pesquisa é que as características físicas dos solos da região do submédio do Vale do São Francisco, com elevada profundidade, interagem de maneira distinta com as moléculas químicas dos íons potássio, cloro e fósforo, afetando a sua dinâmica. Sobretudo, levando-se em conta diferentes aspectos de velocidade de deslocamento da solução do solo com a velocidade de deslocamento da molécula química, considerando aspectos de advecção e difusão.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica do deslocamento miscível dos íons potássio,

cloro e fósforo, em colunas preenchidas com solo classificado como Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd), utilizando como ferramenta adicional o modelo matemático STANMOD.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação, do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Campus Juazeiro/BA (9° 24' 46" S, 40° 30' 58" W).

A amostra de solo foi coletada na camada de 0,0 a 0,30 m de profundidade em áreas agricultáveis no município de Petrolina-PE, sendo classificado como Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd) (EMBRAPA, 2018). O PAd foi coletado na Fazenda Experimental da UNIVASF – Campus de Ciências Agrárias da UNIVASF em Petrolina-PE.

O solo foi homogeneizado, seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm. A caracterização física incluiu a análise granulométrica, a qual classificou o solo PAd como textura arenosa média (EMBRAPA, 2018) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química do Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd).

Parâmetro		PAd
Areia		0,81
Silte	kg kg ⁻¹	0,05
Argila		0,14
pH		6,4
CE	dS m ⁻¹	2,6
P		10
K ⁺		76,9
Ca ²⁺		39,7
Mg ²⁺		17,1
Na ⁺	mg L ⁻¹	54,8
Cu		0,04
Fe		25,09
Mn		0,74
Zn		6,28

Foram utilizadas colunas de PVC com diâmetro de 0,047 m e comprimentos (alturas) de 0,10; 0,20 e 0,30 m, representando as diferentes profundidades e preenchidas com material de solo, de forma a se obter diferentes densidades e volumes de poros em três repetições (Tabela 2). As diferentes densidades e volumes de poros foram calculadas utilizando como referência a densidade de partículas e a densidade do solo (Tabela 2).

Para se obter um perfil homogêneo, as colunas foram preenchidas em camadas

de 3 cm, em que cada camada adicionada era “acomodada” à camada anterior. Na parte inferior de cada coluna foi colocado um pedaço de tecido sintético, uma tela e um funil, e na parte superior um disco de manta de poliéster (Bedim) com o objetivo de se evitar distúrbios na superfície do solo (na coluna) ao interligar a coluna com a emissão da solução a ser aplicada. A carga hidráulica acima do solo foi mantida constante (2 cm) a partir da utilização de um emissor e com auxílio de um frasco de mariotte.

Tabela 2. Densidades (ds) utilizadas para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd)

Solo	Densidades (g cm ⁻³)		
	ds1	ds2	ds3
Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd)	1,30	1,50	1,70

*ds1 (densidade 1), ds2 (densidade 2) e ds3 (densidade 3)

As colunas foram saturadas com água deionizada de forma lenta e ascendente, permanecendo em repouso durante 36 horas para a total saturação. Após essa etapa as colunas foram interligadas aos emissores e ao frasco de mariotte para aplicação de água destilada

correspondente a 2 vezes o volume de poros, com a finalidade de lixiviar todos os íons solúveis do solo.

Para o preparo das soluções, visando a aplicação dos íons potássio (K⁺) e cloro (Cl⁻) foi utilizada uma solução de Cloreto de Potássio e para o íon fósforo (P), solução

com Superfosfato Simples, ambas com concentração de $C_o = 1000 \text{ mg L}^{-1}$. Essas soluções foram aplicadas até que o volume percolado correspondesse a 3,5 vezes o volume de poros (Santos et al., 2010). O volume de poros (V_p) para cada coluna foi calculado utilizando a Equação 5. Para cada altura (profundidade) de coluna foram três repetições, em cada repetição foram coletadas 10 alíquotas de volume que representam as coletas do lixiviado equivalentes a 0,35 vezes do volume de poros para cada coluna.

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

Em que:

V_p – volume de poros

r – raio da coluna (cm)

h – altura de solo na coluna (cm)

D_s – densidade do solo (g/cm^3)

D_p – densidade de partículas (g/cm^3).

As análises químicas das soluções lixiviadas foram realizadas no laboratório de Química do Solo, Campus Juazeiro/BA. O íon potássio (K^+), foi determinado por espectrofotometria de chama, o íon cloro por titulometria e o íon fósforo por Espectrometria de Absorção Atômica, no intuito de correlacionar a concentração da solução das alíquotas com a concentração da solução inicial (C/C_o).

Com os valores de concentração do potássio, cloro e fósforo, foram elaboradas as curvas de avanço dos respectivos íons. Tendo como objetivo o ajuste dos parâmetros de transporte do soluto, no modelo STANMOD. Para o ajuste das curvas foi escolhida a opção CFITIM (VAN GENUCHTEN, 1981), código do modelo de adsorção de equilíbrio linear, que tem como dados de entrada a concentração relativa (C/C_o) do soluto e o volume de poros (VP). Os dados de saída do modelo STANMOD são, número de Peclet (P) e fator de retardamento (R), a

partir destes foram determinados os parâmetros de coeficiente de dispersão (D) e a dispersividade (λ).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelas Figura 1, 2 e 3 podem ser conferidas as *Breakthrough Curves* obtidas para o estudo do deslocamento miscível dos íons potássio, cloro e fosforo, em um Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd), em três profundidades e três densidades. Por meio desses dados observados, foi possível determinar os parâmetros de transporte, dos respectivos íons, por meio do modelo STANMOD (*Studio of Analytical Models*), conforme será discutido a seguir.

O Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd) é um solo de textura média. Dessa forma, foi possível observar que houve um efeito da densidade do solo na dinâmica do íon potássio. Para as densidades de 1,5 e 1,7 g cm^{-3} pode-se observar um maior efeito adsorativo evidenciando que a maior densidade propiciou um maior tempo de contato entre a parte sólida do solo. Pois em se tratando de um solo com 81% de areia e tratando com um cátion esperava-se um maior deslocamento no solo. Portanto, o único fator que causou o retardamento no deslocamento da solução e maior adsorção, foi o efeito da densidade do solo, cuja concentração relativa não alcançou 100%. Demorando em torno de 3,5 VP. O menor efeito adsorativo foi evidenciado pela coluna de 10 cm e menor densidade (1,3 g cm^{-3}). Tal condição reduziu o tempo de interação entre o cátion e a parte da matriz do solo, facilitando o seu deslocamento.

Pela Tabela 3 podem ser conferidos os parâmetros de transporte do íon potássio. Pode-se notar que houve o efeito da densidade nos valores do fator de retardamento (R) evidenciando um maior efeito adsorativo, ou seja, proporcionou um

maior tempo de contato entre o íon potássio e a matriz do solo. Pinho e Miranda (2014) estudando o transporte de potássio em colunas de solo, observou que houve grande interação do íon potássio com a matriz de solo argiloso. Características de interação também foi observada por Matos, Gariglio e Lo Monaco (2013) em um Latossolo Vermelho Eutrófico férrico de textura muito argilosa ao avaliar o deslocamento miscível de cátions proveniente da vinhaça em coluna de solo.

Outro aspecto que pode ser observado é o efeito do tamanho da coluna no parâmetro dispersão, ou seja, como se aumenta as possibilidades de “caminhamento” da solução no solo, aumentou-se o efeito dispersivo, diminuindo-se por consequência o Peclet Number (P). Mostrando que para esse tipo de solo, o tamanho da coluna e a densidade do solo, afetou a dinâmica e adsorção do íon potássio.

Figura 1. Breakthrough curves do íon potássio (K^+) em colunas de solo com alturas de 0,10 m (A, D e G), 0,20 m (B, E e H) e 0,30 m (C, F e I) e densidades de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ (A, B e C), $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ (D, E e F) e $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$ (G, H e I) para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd).

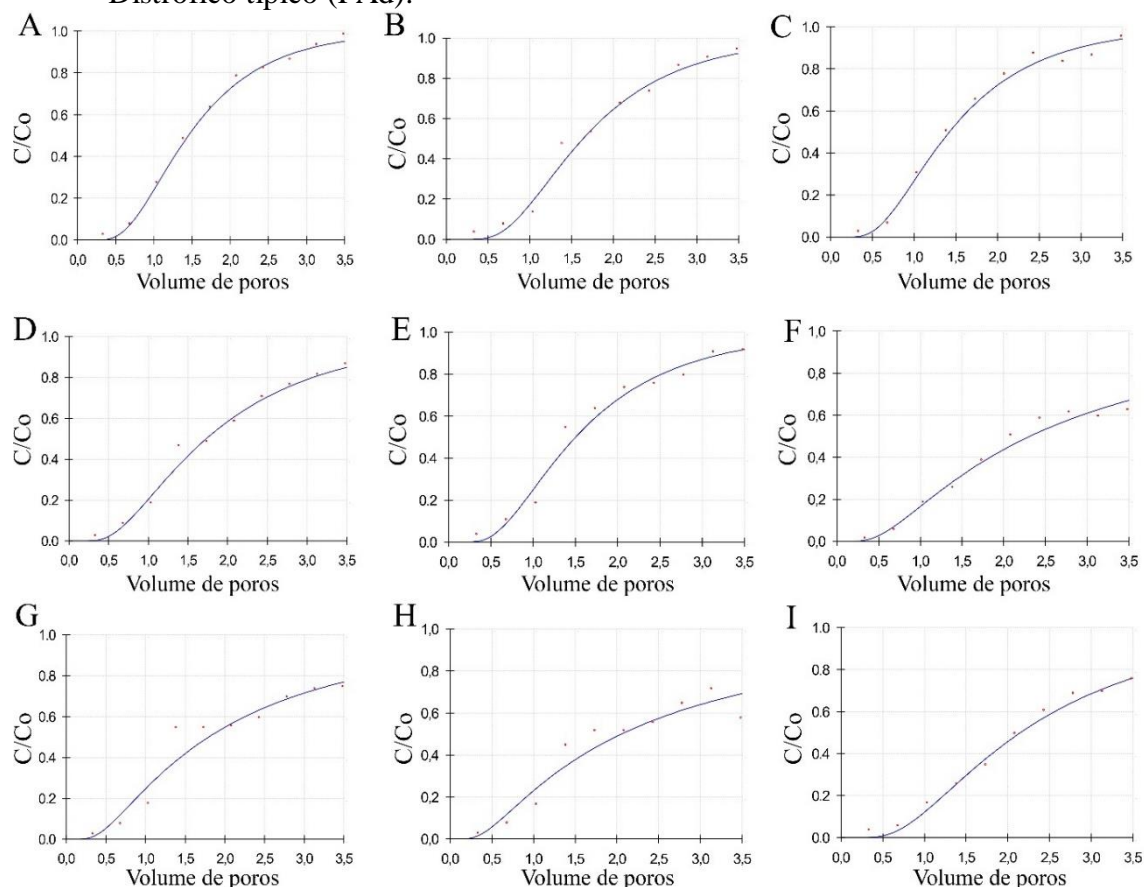


Tabela 3. Parâmetros de transporte para o íon potássio a partir do fator de retardamento (R) e número de Peclet (P), velocidade da solução do solo (v - cm min^{-1}), a dispersividade (λ - cm) e o coeficiente de dispersão (D - $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) no Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd) para diferentes profundidades (H) e densidades de solo (ds)

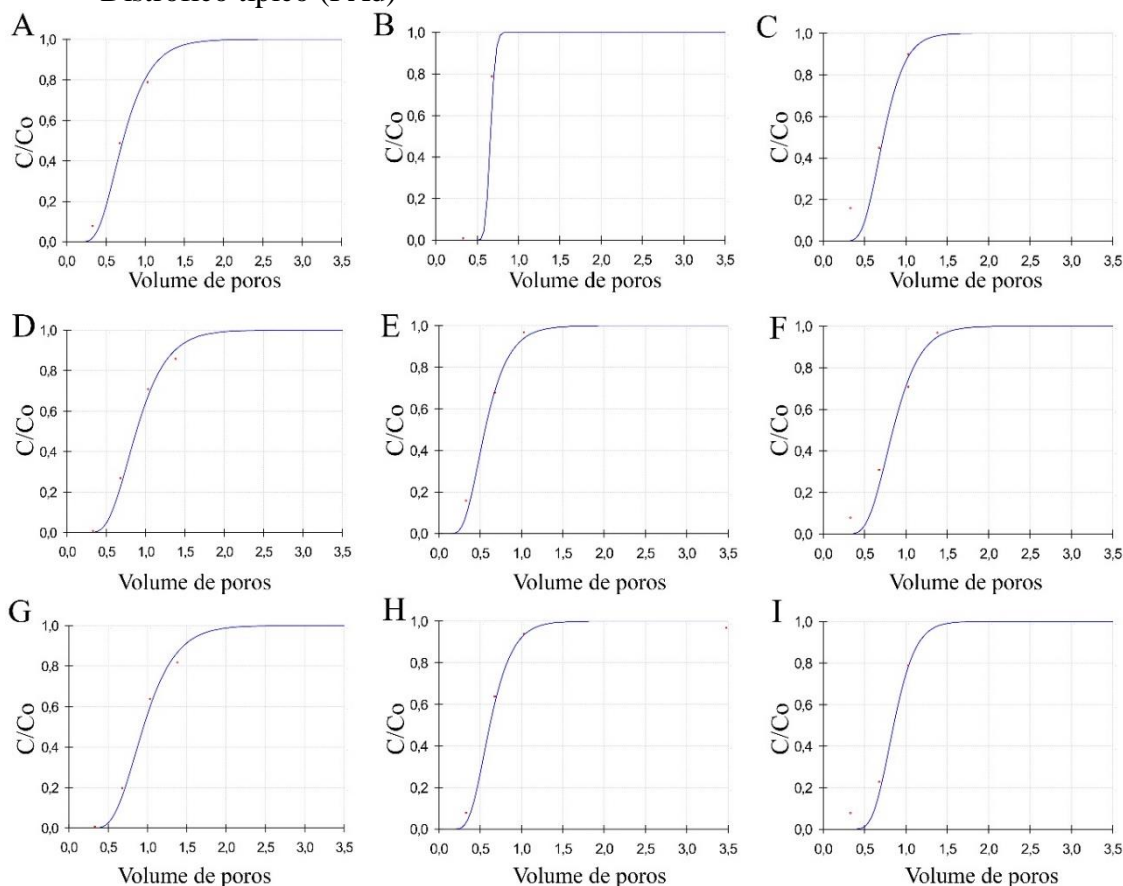
	H (0,10m)			H (0,20m)			H (0,30m)		
	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3
P	6,548	3,841	2,000	6,563	4,865	1,338	5,597	1,823	3,761
R	1,665	2,161	2,647	1,800	1,800	3,504	1,667	3,517	2,697
N	0,088	0,075	0,062	0,176	0,150	0,124	0,265	0,226	0,186
Λ	0,015	0,026	0,015	0,013	0,014	0,015	0,015	0,017	0,018
D	1,130	1,200	1,310	1,540	1,620	1,185	1,420	1,720	1,490

*H - altura das colunas de solo; PAd-(ds1 - $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, ds2 - $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, ds3 - $1,7 \text{ g cm}^{-3}$)

Em estudo realizado por Santos (2014), em Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho, foi observado que o Latossolo necessitou de um maior volume de poros de solução para atingir a máxima concentração relativa ($C/C_0 = 1$), mostrando que o Argissolo Amarelo apresentou a maior velocidade de avanço do soluto enquanto o Latossolo Vermelho maior interação soluto-solo. Nesse sentido, Pinho e Miranda

(2014) estudando a relação da velocidade de escoamento da solução e do comprimento da coluna de solo com os parâmetros de transporte do íon potássio em um Latossolo e um Neossolo, observaram que o fator de retardamento do potássio (K^+) foi maior no solo argiloso devido à maior capacidade de troca catiônica, favorecida pela maior quantidade de argila e também de matéria orgânica.

Figura 2. Breakthrough curves do íon cloro (Cl^-) em colunas de solo com alturas de 0,10 m (A, D e G), 0,20 m (B, E e H) e 0,30 m (C, F e I) e densidades de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ (A, B e C), $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ (D, E e F) e $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$ (G, H e I) para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd)



Por outro lado, Santos (2014) referem que, quanto menor a velocidade de avanço da solução (v) na coluna de solo maior é o tempo de contato entre os íons da solução e os colóides do solo, promovendo uma maior oportunidade de retenção dos íons do soluto, causando aumento nos valores do fator de retardamento.

No caso do íon cloro foram observados menores valores do fator de retardamento (R) indicando uma maior mobilidade desse íon nesse tipo de solo. Segundo, Basso e Kiang (2017) concluíram que o íon cloro tem um fator de retardamento (R_d) maior em solos argilosos. Essa mobilidade pode ser devida ao fato do solo já possuir uma maior concentração de potássio em relação aos outros íons e ao acrescentar mais potássio vindo do cloreto

do potássio, o efeito de “arraste” do íon acompanhante do cloro (no caso o potássio) ficou mais evidente. Pela Figura 2, pode-se conferir que não houve o efeito da densidade ou da altura da coluna em relação ao íon cloro. O que se pode observar é que o cloro apresentou um maior deslocamento no solo em questão, demandando de 1,0 a 1,5 VP para atingir a concentração relativa de 100%. Fato relacionado à grande mobilidade e lixiviação devido à elevada solubilidade e característica química do íon cloro.

Pela Tabela 4 podem ser conferidos os parâmetros de transporte do íon cloro. Pode-se notar que praticamente não houve o efeito da densidade do solo em sua mobilidade, de acordo com os valores do fator de retardamento (R), ao contrário do

íon potássio. Por se tratar de um ânion e com o peso atômico menor que o do potássio, e devido à característica física do solo em questão, sofreu o “arraste” do íon acompanhante. Dessa forma o efeito dispersivo foi menor no solo em questão, e consequentemente apresentando maiores valores do Peclet Number (P).

Em relação ao íon fósforo (Figura 3), fica evidente a não mobilidade desse ânion. Ou seja, o fósforo ficou concentrado no solo, pois não deve ser considerado retenção pois devido ao solo apresentar maior número de cargas positivas (solo arenoso) adsorveu fortemente esse ânion. O que de certa forma, também influenciou no deslocamento do cloro, por se tratar de um ânion também. Notou-se que nas profundidades (altura da coluna) de 0,20 e 0,30 m o retardamento do fósforo foi bem acentuado, o que mostra que para esse íon a profundidade e densidade do solo influenciam na sua mobilidade (PINHO; MIRANDA, 2014).

Esse resultado está relacionado ao fato de que o fósforo tem baixa mobilidade no solo, não sendo um nutriente sujeito à perdas por percolação. Nos fertilizantes fosfatados sob a forma de fosfato solúvel em água, em contato com a solução do solo, o fósforo pode se solubilizar.

Uma forma de explicar a relação de interação solo-soluto para o íon cloro, o que pode influenciar diretamente a frente de avanço, é que para o solo PAd foi possível atingir a concentração relativa (C/C_0) máxima, o que indica uma baixa interação (MELO; ALLEONI, 2009).

Em relação à inclinação das curvas de avanço para os íons potássio e fósforo observa-se resultados semelhantes em relação as variáveis altura de coluna e densidade do solo. O que segundo Basso e Kiang (2017) é um indicativo de maior interação entre solo-soluto, resultando em maiores valores de retardamento.

Tabela 4. Parâmetros de transporte para o íon cloro a partir do fator de retardamento (R) e número de Peclet (P), velocidade da solução do solo (v - cm min^{-1}), a dispersividade (λ - cm) e o coeficiente de dispersão (D - $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) no Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd) para diferentes profundidades (H) e densidades de solo (ds)

	H (0,10m)			H (0,20m)			H (0,30m)		
	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3
P	12,96	16,22	17,27	12,10	12,34	16,65	24,12	28,16	33,80
R	0,77	0,93	1,00	0,66	0,60	0,65	0,75	0,88	0,87
V	0,099	0,095	0,092	0,167	0,214	0,224	0,275	0,229	0,286
Λ	0,008	0,006	0,006	0,017	0,016	0,012	0,012	0,011	0,009
D	0,680	0,462	0,359	0,2913	0,2434	0,1490	0,3296	0,2408	0,1864

*H - altura das colunas de solo; PAd-(ds1 - $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, ds2 - $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, ds3 - $1,7 \text{ g cm}^{-3}$)

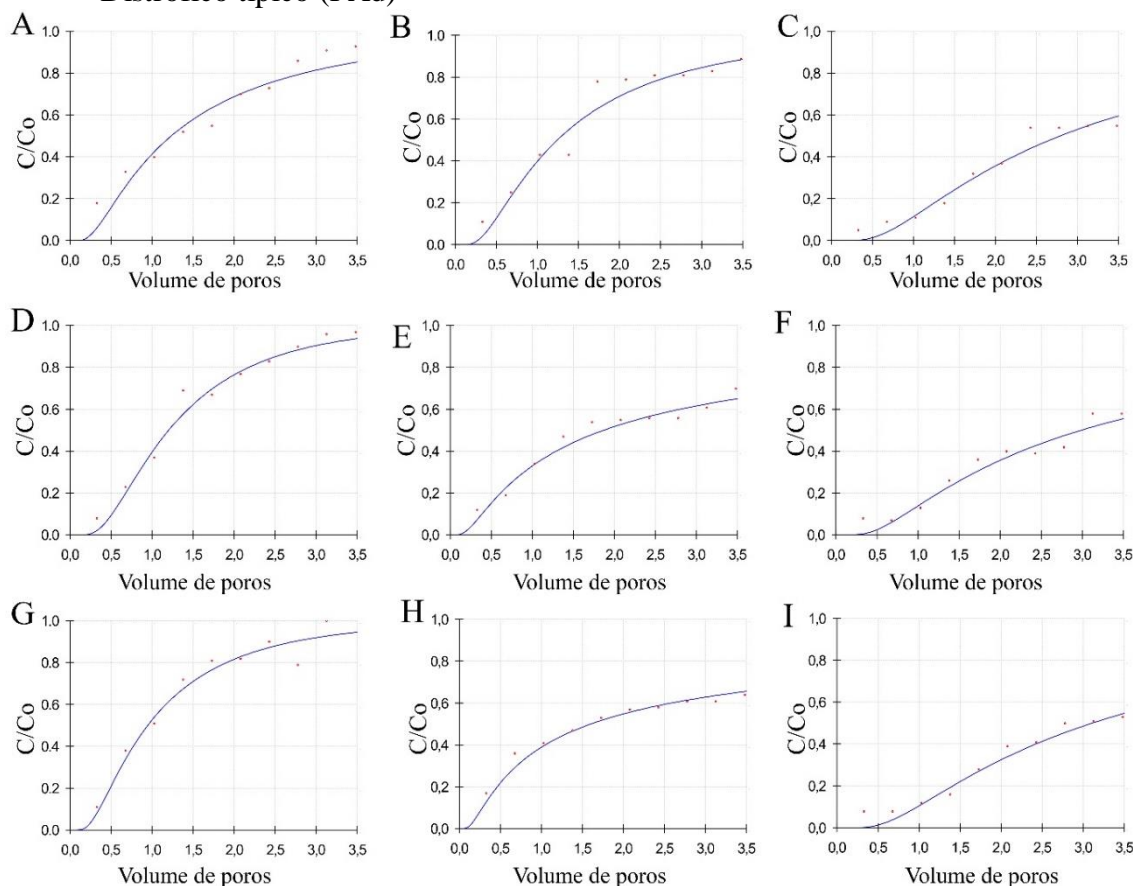
O seu efeito dispersivo foi um pouco menor em relação ao cloro, evidenciando assim, menores valores do Peclet Number quando comparado ao cloro. Isso denota o fato da baixa mobilidade, maior efeito adsorvivo e menor dispersão. Principalmente, quando observadas as alturas das colunas de 10 e 20 cm.

Quanto à característica dos processos físicos que envolvem o número de Peclet (P), para P menor que 0,01 tem predominância do fluxo difusivo; para P entre 0,01 e 50 o fluxo é difusivo e advectivo, e para P maior que 50 o fluxo é advectivo (MONCADA, 2004). Assim, observa-se processo físico que envolve o

número de Peclet ocorre na faixa entre 0,01 e 50, mostrando o domínio de fluxo difusivo e advectivo (LIBARDI, 2005). Para a respectiva pesquisa, ocorreu uma

homogeneização do meio poroso afim de obter valores elevados de densidade do solo, o que justifica os valores baixos de dispersividade (λ).

Figura 3. Breakthrough curves do íon fósforo (P_2O_5) em colunas de solo com alturas de 0,10 m (A, D e G), 0,20 m (B, E e H) e 0,30 m (C, F e I) e densidades de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (A, B e C), $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ (D, E e F) e $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ (G, H e I) para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAD)



A velocidade da solução do solo é proporcional ao coeficiente de dispersão (D), devido característica da variável dispersividade (λ) (SANTOS, 2014). Deste modo, os resultados obtidos nesta pesquisa estão dentro da teoria do transporte de solutos.

Os resultados desta pesquisa também concordam com a teoria descrita por Nielsen e Biggar (1962), que valores mais elevados dos coeficientes de dispersão-difusão (D) estão associados a menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da

faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo tornando os acréscimos na concentração relativa (C/C_0) baixos para acréscimos no número de volume de poros.

Por outro lado, Engler et al. (2008) mencionam que o coeficiente de dispersão-difusão pode ser indicativo da capacidade do solo em reter determinado soluto à medida em que a frente de umedecimento da solução aplicada avança no perfil do solo. Segundo essa teoria, para o íon cloro obteve elevada inclinação das curvas e conseqüentemente estreita faixa de mistura

o que também indica baixos valores dos coeficientes de dispersão-difusão (D).

Os íons estudados obtiveram efeito de fluxo difusivo e advectivo. Porém o íon cloro foi o mais que se aproximou do fluxo somente advectivo, sendo também o de

menor interação solo-soluto segundo a inclinação das curvas de avanço. Em comparação ao potássio, este obteve valores maiores do fator de Retardamento, o que indica uma maior retenção pelo solo.

Tabela 5. Parâmetros de transporte para o íon fósforo a partir do fator de retardamento (R) e número de Peclet (P), velocidade da solução do solo (v - cm min^{-1}), a dispersividade (λ - cm) e o coeficiente de dispersão (D - $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) no Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd) para diferentes profundidades (H) e densidades de solo (ds)

Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAd)									
	H (0,10m)			H (0,20m)			H (0,30m)		
	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3	ds1	ds2	ds3
P	1,60	3,56	2,45	2,21	1,28	1,58	1,80	1,04	1,45
R	1,97	1,53	1,32	1,78	8,06	6,80	4,28	5,71	2,70
N	0,088	0,075	0,062	0,077	0,038	0,024	0,026	0,023	0,086
Λ	0,006	0,003	0,004	0,009	0,018	0,003	0,017	0,029	0,021
D	0,553	0,211	0,254	0,595	0,701	0,270	0,265	0,226	0,186

*H - altura das colunas de solo; PAd-(ds1 - $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, ds2 - $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, ds3 - $1,7 \text{ g cm}^{-3}$).

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos para o solo da região do submédio do vale do São Francisco, conclui-se que os íons potássio e fósforo tiveram comportamentos semelhantes a partir da avaliação dos parâmetros de transporte obtidos pelo modelo STANMOD. Para ambos, ficou evidenciado um efeito adsorptivo e baixa mobilidade no solo em questão. O efeito da densidade do solo ficou mais evidente em relação ao íon potássio, mas não em relação

aos outros íons (cloro e fósforo). O efeito do comprimento das colunas não ficou evidente.

O íon cloro apresentou uma elevada mobilidade no Argissolo Amarelo Distrófico típico apresentando um menor valor do fator de retardamento (R), um maior efeito dispersivo e resultando em menores valores do *Peclet Number* (P). O modelo STANMOD apresentou desempenho satisfatório no ajuste numérico das Breakthrough Curves (BTC's).

7 REFERÊNCIAS

BASSO, J. B.; KIANG, C. H. Retardamento e dispersão hidrodinâmica de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo itararé no estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 117-133, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28638>. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28638>. Acesso em: 19 nov. 2019.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: www.embrapa.br/solos/sibcs. Acesso em: 19 nov. 2019.

ENGLER, M. P. C.; CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q.; BLOEM, E. M.; SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. An alternative approach for the determination of soil water mobility. **Pedosphere**, Nanjing, v. 18, n. 3, p. 328-334, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60022-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60022-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016008600223>. Acesso em: 19 nov. 2019.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: EDUSP, 2005. 311 p. Disponível em: <https://www.edusp.com.br>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MATOS, A. T.; GARIGLIO, H. A. A.; LO MONACO, P. A. V. Deslocamento miscível de cátion proveniente da vinhaça em colunas de solo. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 743-749, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000700008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/s33DMQBcd3MkS5QPv7qzfCP/?lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. 695 p. Disponível em: <https://www.sbc.org.br/blog/publicacao/quimica-e-mineralogia-de-solos>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MONCADA, M. P. H. **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de soluto associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.academia.edu/20978202>. Acesso em: 19 nov. 2019.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement: III Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 3, p. 216-221, 1962. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600030010x>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1962.03615995002600030010x>. Acesso em: 19 nov. 2019.

OLIVEIRA, L. F. C.; NOGUEIRA, J. G.; FRIZZARIM, S. S.; FIA, R.; FREITAS, J. S.; FIA, F. R. L. Sorção e mobilidade do lítio em solos de áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 139-148, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/GKmFgDhtfvTQrchLfK4mSHd/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2019.

PINHO, R. E. C.; MIRANDA, J. H. Avaliação do modelo HYDRUS-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 899-911, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000500009>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/eagri/a/PWJz5vwgxWZCNw3KQM5CRdx/?lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SANTOS, R. S. S. **Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-06012015-110030/pt-br.php>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SANTOS, J. S.; LIMA, V. L. A.; BORGES JÚNIOR, J. C.; SILVA, L. V. B. D.; AZEVEDO, C. A. V. Mobilidade de solutos em coluna de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1226-1233, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001100013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/gtFvRsPZ8hyx79VhbJJ56fQ/?lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SILVA, L. P. **Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-26062013-110203/publico/Livia_Previatello_da_Silva.pdf. Acesso em: 19 nov. 2019.

VAN GENUCHTEN, M. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero order production and first order decay. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 49, n. 3-4, p. 213-233, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90214-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90214-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169481902146>. Acesso em: 19 nov. 2019.