

Artigo Técnico

Influência do substrato de pó de coco na lixiviação de água residuária

Influence of coconut powder substrate on leaching of wastewater

Fred Mikhail Carneiro Valério de Assis^{1*} , Abelardo Antônio de Assunção Montenegro¹ ,
Carolayne Wanessa Lins de Andrade Farias² , Suzana Maria Gico Lima Montenegro³ ,
Elvira Maria Régis Pedrosa¹ 

RESUMO

Nas últimas décadas, têm-se observado o crescimento da demanda de água e o agravamento dos cenários de escassez hídrica, bem como a ampliação de alternativas de reuso de água de efluentes de qualidade inferior, em particular de esgotos domésticos tratados. Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a influência do substrato de pó de coco no controle de transporte de solutos em solos irrigados com esgoto tratado doméstico. A água residuária doméstica tratada provém da Unidade Experimental de Tratamento e Reúso Hidroagrícola, no distrito de Mutuca-PE. O delineamento experimental foi em esquema fatorial (2 × 3), cujos fatores avaliados compreenderam dois tipos de solos típicos da região (Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo) e três tratamentos (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), com cinco repetições. Os parâmetros de transporte dos íons sódio e potássio foram obtidos por ajuste numérico, utilizando-se o modelo STANMOD. Constatou-se a existência de interação com soluto, sódio e potássio, em solo arenoso. O modelo STANMOD apresentou ótimo desempenho na simulação do transporte de solutos no solo. A cobertura de pó de coco mostrou-se eficiente na diminuição da lixiviação de íons em ambos os solos estudados.

Palavras-chave: cobertura morta; transporte de solutos; STANMOD; semiárido.

ABSTRACT

In the last decades, there has been an increase in the demand for water and the aggravation of water scarcity scenarios, as well as the expansion of water reuse alternatives for lower quality effluents, in particular treated domestic sewage. The objective of this study was to evaluate the influence of coconut powder substrate on the control of solute transport in irrigated soils with treated sewage reuse. The treated domestic wastewater comes from the Experimental Unit for Treatment and Agricultural Reuse in the district of Mutuca, Pernambuco. The experimental design was in a factorial scheme (2 × 3), whose evaluated factors comprised two types of soils typical of the region (Leptosols and Yellow Argisol) and three treatments (no coconut powder, 1 cm coconut powder, and 2 cm coconut powder) with five replicates. The transport parameters of the sodium and potassium ions were obtained by numerical adjustment using the STANMOD model. It was found the existence of interaction with solute, sodium, and potassium in sandy soil. The STANMOD model presented excellent performance in the simulation of solute transport in the soil. Soil coverage with coconut powder was shown to be efficient in reducing leaching of ions in both studied soils.

Keywords: mulching; solute transport; STANMOD; semiarid.

INTRODUÇÃO

Tem-se verificado, nas últimas décadas, aumento da demanda de água que ocorre não apenas para o uso doméstico, mas também para a agricultura e a indústria (AGRAFIOTI; DIAMADOPOULOS, 2012; ROLIM *et al.*, 2016).

Souza *et al.* (2015), avaliando a eficiência do tratamento de esgoto doméstico para fins de reuso agrícola, ressaltaram os danos ambientais causados pelo lançamento dos efluentes em corpos hídricos, devido à elevada quantidade de matéria orgânica e de outros elementos nele presentes, e destacaram o potencial do reúso

de tais efluentes para a mitigação dos impactos e para o convívio com a escassez de água. Dentro desse contexto, a reutilização de água residuária se apresenta como alternativa para a diminuição do lançamento inadequado, bem como para atenuar os problemas de escassez hídrica em algumas regiões (CHEN *et al.*, 2013).

O deslocamento 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, de certa maneira, agem nos parâmetros de transporte dos solutos (SANTOS *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2012).

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco - Recife (PE), Brasil.

²Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa (PB), Brasil.

³Universidade Federal de Pernambuco - Recife (PE), Brasil.

*Autor correspondente: fredmikhail@hotmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Projeto SUPER - Chamada MCTI/CNPq/ANA Nº 23/2015), Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE APQ 0300-5.03/97) (Consórcio UNIVERSITAS) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (REHIDRO 1830).

Recebido: 03/07/2018 - **Aceito:** 29/04/2020 - **Reg. Abes:** 20180037

Segundo Santos *et al.* (2019), a composição química e a estrutura celular das fibras vegetais têm alta complexidade. A fibra de coco é um material que contém textura variável, cuja influência está relacionada ao equilíbrio existente entre o conteúdo de ar e de água, o qual é fundamental para o cultivo das plantas (MARTINEZ, 2002). Além disso, a fibra apresenta características físico-químicas importantes que favorecem a formação das raízes (CASTOLDI *et al.*, 2014). Dentre as vantagens de utilização das fibras vegetais, como a do coco, podem-se citar a baixa massa específica, a maciez e a abrasividade reduzida, o fato de serem recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis, serem inertes aos fertilizantes e terem baixo custo e baixo consumo de energia na produção. Adicionalmente, o pó de coco apresenta alta porosidade, o que facilita a retenção de umidade e a manutenção de uma boa aeração. Em relação às propriedades químicas, pode-se destacar a capacidade de troca catiônica de média à alta, o que torna o pó de coco um substrato quimicamente móvel. Entretanto, algumas desvantagens e limitações envolvem a acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas, a baixa estabilidade dimensional e a alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura e umidade (LEVY NETO; PARDINI, 2006; ARAMÉNDIZ-TATIS; CARDONA-AYALA; CORREA-ÁLVAREZ, 2013).

Diante do exposto, o estudo teve como objetivo a avaliação experimental e numérica da influência do substrato de pó de coco no transporte de solutos, em meios porosos irrigados com esgoto tratado doméstico, considerando-se solos representativos da região semiárida.

METODOLOGIA

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Água e Solo (LAS), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). O solo utilizado no

estudo foi coletado na bacia experimental do Riacho Jatobá, localizada no município de Pesqueira, PE, com as seguintes coordenadas geográficas: 8°34'17" e 8°18'11" de latitude sul e 37°1'35" e 36°47'20" de longitude oeste.

A microbacia está inserida na bacia representativa do Riacho Mimoso, pertencente ao Rio Ipanema, e tem área de drenagem de 12,44 km² (ARAÚJO, 2016), onde predominam Neossolos Litólicos e Argissolos Amarelo. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0 a 20 cm, caracterizadas física e quimicamente conforme a EMBRAPA (2011) (Tabela 1).

Para os ensaios experimentais, utilizou-se água residuária de esgoto doméstico tratado, proveniente da Unidade Piloto Experimental de Tratamento e Reúso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos (Estação de Tratamento de Esgoto [ETE] — MUTUCA), situada no distrito de Mutuca, Pesqueira, PE. A estação trata os esgotos por processo anaeróbico, mediante emprego de reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), seguido de lagoa de polimento, e vem sendo utilizada pela UFRPE para a disposição controlada de esgoto doméstico tratado e a produção agrícola de diversas culturas, tais como: algodão, milho, feijão, palma forrageira, babosa, moringa oleífera, chichá, entre outras. Na Tabela 2 se encontra a caracterização físico-química da água residuária.

As amostras de solo foram inicialmente destorroadas e peneiradas em peneira com diâmetro de 2 mm, sendo posteriormente secas em estufa a 105°C, para obtenção da terra fina seca em estufa (TFSE), por um período de 24 horas. Utilizaram-se, no experimento, colunas de acrílico com 30 cm de comprimento e 6 cm de diâmetro interno. Na parte inferior das colunas foi colocado um círculo de manta sintética sobre uma tela, definidos por um "cap", para a sustentação do material, visando evitar a perda de solo durante os ensaios; na parte superior da coluna colocou-se um círculo de manta sintética de modo a

Tabela 1 - Caracterização física e química das amostras do solo utilizado nos ensaios.

Caracterização física									
Solo	Areia Total	Areia Fina	Areia Grossa	Silte	Argila	D _s	D _p	α	K _{sat}
	(%)					(Kg.dm ⁻³)		(m ³ .m ⁻³)	(cm.min ⁻¹)
Neossolo Litólico	82,07	16	84	1	16,93	1,45	2,62	44,66	0,208
Argissolo Amarelo	70,01	23,50	76,50	10,39	19,60	1,47	2,57	42,80	0,015
Caracterização química									
	CE	pH	K	Na	COT	MO			
	(ds.m ⁻¹)	(adm)	(mmolc.L ⁻¹)		(g.Kg ⁻¹)				
Neossolo Litólico	1,36	7,35	0,60	2,60	20,50	35,26			
Argissolo Amarelo	0,80	7,89	0,90	1	20,05	34,48			

D_s: densidade do solo; D_p: densidade da partícula; α: porosidade; K_{sat}: condutividade hidráulica do solo saturado; CE: condutividade elétrica do extrato de saturação; pH: potencial hidrogeniônico (adm - adimensional); K: potássio; Na: sódio; COT: carbono total orgânico; MO: matéria orgânica.

Fonte: elaboração própria.

Tabela 2 - Análise físico-química da água residuária.

CE	pH	Alc	Cl	OD	DBO	DQO	SS	ST	SF	SSusp	SSuspF	P
(dS.m ⁻¹)	(adm)	(mg)	(mg.L ⁻¹)	(mg O ₂ .L ⁻¹)			(mg.L ⁻¹)					
2,67	7,90	708	200	7	487	902	0,50	2,345	2,094	50	30	2,50

CE: condutividade elétrica; pH: potencial hidrogeniônico (adm - adimensional); Alc: alcalinidade; Cl: cloretos; OD: oxigênio dissolvido; DBO: demanda biológica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; SS: sólidos sedimentáveis; ST: sólidos totais; SF: sólidos fixos; SSusp: sólidos suspensos; SSuspF: sólidos suspensos fixos; P: fósforo.

Fonte: elaboração própria.

proporcionar melhor distribuição do líquido a ser percolado e garantir a uniformidade de infiltração da solução no solo (Figura 1).

As colunas foram preenchidas com solo até a altura de 25 cm. O preenchimento foi realizado de forma a manter a densidade do solo próxima às condições de campo. A cada 150 g de solo, foi realizado o seu acondicionamento com o auxílio de um disco de madeira, com diâmetro inferior ao diâmetro interno da coluna.

Para o preenchimento do pó de coco, foi utilizada a densidade de 4 t.ha⁻¹ (0,04 g.cm³), segundo recomendações de Montenegro *et al.* (2013), que, utilizando essa mesma densidade em palha de arroz, obtiveram adequada redução no escoamento superficial e maior infiltração. Como a área da coluna apresenta 28,27 cm², a massa de pó de coco aplicada foi de aproximadamente 1,25 g (1,25 g / 28,27 cm² = 0,04 g.cm³), para obter a densidade proposta por Montenegro *et al.* (2013). Essa massa de 1,25 g de pó de coco, após acondicionada na coluna, resultou em altura de 0,25 cm.

Para iniciar o teste, primeiramente, a coluna foi saturada com água deionizada, processo realizado de forma lenta e ascendente, por capilaridade, colocando-a em um balde e, em seguida, adicionando-se a água por gotejamento ao longo das paredes do balde, até cerca de 2/3 da altura da coluna.

O conjunto foi mantido em repouso por um período de 24 horas. Depois de saturadas, as colunas foram fixadas em um suporte vertical e interligadas ao purificador de água GEHAKA 10x, para aplicação de água deionizada por um período de 24 horas, mantendo-se constante uma carga hidráulica. Após a percolação da água no solo, a água deionizada foi substituída pela água residuária.

Para cada coluna, foram determinadas as características físico-hídricas: volume de poros, fluxo e velocidade de avanço. O volume de poros de cada coluna (V_p) foi determinado pela Equação 1:

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

Em que:

r = raio da coluna, cm;

h = comprimento da coluna, cm;

D_s = densidade do solo, g.cm⁻³;

D_p = densidade das partículas, g.cm⁻³.



Fonte: elaboração própria.

Figura 1 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de aplicação e coleta dos efluentes.

O fluxo de cada coluna foi calculado por meio da Equação 2:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Em que:

q = fluxo, cm.min⁻¹;

Q = vazão, cm³.min⁻¹;

A = seção transversal da coluna, cm².

A velocidade de avanço da solução percolante para cada solo foi definida pela Equação 3:

$$V_f = \frac{q}{\alpha} \quad (3)$$

Em que:

V_f = velocidade de avanço, cm.min⁻¹;

q = fluxo, cm.min⁻¹;

α = porosidade total, cm³.cm⁻³.

Cada ensaio consistiu na aplicação de aproximadamente 5 L de água residuária, em que eram coletadas alíquotas de 20 mL do efluente em cada coluna, até que a concentração dos íons da solução lixiviada atingisse ou ficasse próxima à concentração aplicada. O efluente era coletado em frascos plásticos mantidos fechados, armazenados sob refrigeração e que, posteriormente, foram analisados.

Foram obtidas, nas amostras de efluente, as concentrações dos íons potássio e sódio por fotometria de emissão de chama (EMBRAPA, 2011).

Os parâmetros de transporte fator de retardamento (R) e número de Peclet (P) foram estimados por meio de ajuste numérico utilizando-se o *software* STANMOD (STudio of ANalytical MODEls) (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2008), mediante a interface do modelo CFITIM (VAN GENUCHTEN, 1981). O modelo foi desenvolvido para analisar os dados observados nos ensaios de efluentes em meios porosos e simular o processo utilizando soluções analíticas das equações unidimensionais de transporte convectivo-dispersivo de equilíbrio e não equilíbrio.

O coeficiente de difusão-dispersão (D) foi obtido a partir da Equação 4:

$$D = \frac{V_f L}{P} \quad (4)$$

Em que:

D = coeficiente de difusão-dispersão, cm².min;

V_f = velocidade de avanço, cm.min⁻¹;

L = comprimento da coluna de solo, cm;

P = número de Peclet, adimensional.

A dispersividade (λ) foi calculada a partir dos valores de D e v (Equação 5):

$$\lambda = \frac{D}{v} \quad (5)$$

Em que:

D = coeficiente de difusão-dispersão, L².T⁻¹;

v = velocidade média da água nos poros, L.T⁻¹.

A distribuição da concentração de íons em uma coluna de solo com concentração inicial uniforme, em equilíbrio dinâmico, que será substituída em

um tempo $t = 0$ por uma solução com concentração constante, pode ser submetida a uma solução analítica. As condições iniciais e de contornos foram dadas pelas Equações 6, 7 e 8.

$$c(z,0) = c_i \quad (6)$$

$$c(0,t) = c_0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (8)$$

A solução para a equação de convecção-dispersão sujeita aos valores iniciais e de contorno, já citados, pode ser obtida pela Equação 9 (BIGGAR; NIELSEN, 1962; VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986):

$$\frac{c(z,t) - c_i}{c_0 - c_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rz - vt}{\sqrt{4D.Rt}} \right) + \frac{1}{2} e^{\frac{vz}{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rz - vt}{\sqrt{4D.Rt}} \right) \quad (9)$$

Em que:

$\operatorname{erfc}(u)$: função erro complementar.

A solução simples (Equação 10), frequentemente utilizada em experimentos de deslocamento miscível, é obtida retendo somente o primeiro termo do lado direito da Equação 9:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rz - vt}{\sqrt{4D.Rt}} \right) \quad (10)$$

Realizou-se análise estatística do desempenho do modelo, comparando-se os valores das curvas de eluição obtidos em laboratório (dados observados) e os simulados pelo STANMOD (dados simulados), considerando-se os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de correlação (r); índice de concordância (d) e índice de desempenho (c).

A análise da precisão foi baseada no coeficiente de correlação (r), que apresenta o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média. Por sua vez, a exatidão foi estimada por meio do índice de concordância ou índice de Willmott (d) (WILLMOTT *et al.*, 1985). Seus valores variam de zero a um, sendo o valor nulo indicador de nenhuma concordância e a unidade, de perfeita concordância (Equação 11).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - O_m|) + (|O_i - O_m|)} \right] \quad (11)$$

Em que:

d = índice de concordância, adimensional;

E_i = dado estimado pelo modelo;

O_i = dado observado;

O_m = média dos dados observados;

N = número de dados.

O índice de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), é obtido pela multiplicação entre os índices “ r ” e “ d ”, e a classificação do desempenho do modelo baseia-se nos critérios apresentados na Tabela 3.

Em relação à estatística descritiva, adotou-se um delineamento experimental em esquema fatorial 2×3 , consistindo em dois tipos de solos (Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo) e três coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), com cinco repetições, totalizando 30 ensaios com colunas.

Os dados foram submetidos à análise de regressão e à análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, transformados para atender aos pressupostos da ANOVA. Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa Statistix 9 (MICHEREFF, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se, na Tabela 4, a ANOVA para os íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) sob os tratamentos estudados. Houve influência significativa para os fatores solo e cobertura isoladamente e para a interação dos fatores solo-cobertura ($p < 0,05$) no íon sódio (Na^+); porém, para o íon potássio (K^+), não houve influência significativa para a interação dos fatores, só ocorrendo para o solo e a cobertura isoladamente ($p < 0,05$).

A Tabela 5 apresenta o efeito da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon sódio (Na^+) para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.

Tabela 4 - Análise de variância para os íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) sob os tratamentos de coberturas e solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Na	K
Solo	1	19,25*	18,34*
Cobertura	2	4,48*	6,97*
Solo* cobertura	2	3,02*	1,14 ^{NS}
Resíduo	1,076		
C.V. (%)		19,91	9,58

NS: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F;

C.V.: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5 - Efeito da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon sódio (Na^+) para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo*.

Cobertura do solo	Solo	
	Neossolo Litólico (mmolc.L ⁻¹)	Argissolo Amarelo (mmolc.L ⁻¹)
Sem pó de coco	0,4532 aA	0,3517 aB
1 cm de pó de coco	0,4450 aA	0,2917 aB
2 cm de pó de coco	0,3419 bA	0,3093 aA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: elaboração própria.

Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho do modelo, de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Índice de desempenho (c)	> 0,85	0,76 a 0,85	0,66 a 0,75	0,61 a 0,65	0,51 a 0,60	0,41 a 0,50	≤ 0,40
Desempenho	Ótimo	Muito bom	Bom	Mediano	Sufrível	Mau	Péssimo

Fonte: elaboração própria.

Para o Neossolo Litólico, verifica-se diferença entre o substrato com 2 cm de pó de coco e os tratamentos sem pó de coco e 1 cm de pó de coco, em que a cobertura de 2 cm de pó de coco causou redução na lixiviação do íon sódio na coluna, mostrando a eficiência do tratamento aplicado. Tais resultados corroboram Carrijo, Liz e Makishima (2002), que estudaram o efeito da fibra da casca do coco-verde como substrato agrícola e verificaram que a fibra de coco, em comparação com outros sete tipos de substratos, mostrou-se superior, em termos absolutos, na produção da cultura do tomate. Entre os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo, houve diferença entre as coberturas sem pó de coco e 1 cm de pó de coco, porém os solos não diferiram para a da cobertura de 2 cm de pó de coco. Verifica-se que, para o Neossolo Litólico, a lixiviação do íon sódio foi maior para os tratamentos sem pó de coco e com 1 cm de pó de coco do que no Argissolo Amarelo. Tal fato ocorreu devido às diferenças entre as texturas dos solos. Com a presença de 2 cm de pó de coco, os solos apresentaram contaminações equivalentes no lixiviado (Tabela 5).

A Tabela 6 apresenta a influência do tipo de solo na lixiviação do íon potássio (K^+). Verifica-se que o Argissolo Amarelo apresentou maior média do que o Neossolo Litólico. Adicionalmente, destaca-se que houve diferença na lixiviação do íon potássio (K^+) entre os tratamentos sem pó de coco e com pó de coco, entretanto, não houve diferença em relação à espessura adotada, conforme a Tabela 7. O fato de não haver diferença entre as alturas de cobertura de pó de coco sugere que a utilização de 1 cm pode ser uma alternativa viável e econômica para a prática agrícola. Carrijo, Liz e Makishima (2002), realizando experimento em campo para análises de diferentes tipos de coberturas como substrato agrícola no desenvolvimento da cultura do tomate, verificaram que a produção de tomate foi superior quando se utilizou a fibra da casca do coco-verde, em termos absolutos, em relação ao pó de serra, à casca de arroz carbonizada, ao maravalha, ao comercial (plantmax), ao substrato do CNPH, à casca de arroz cru e à lâ de rocha.

As curvas de eluição de efluentes para os íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para as condições sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, respectivamente, são apresentadas na Figura 2.

Tabela 6 - Influência do tipo de solo na lixiviação do íon potássio (K^+)*.

Solo	Média (mmolc.L ⁻¹)
Neossolo Litólico	0,1413 b
Argissolo Amarelo	0,1823 a

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 7 - Influência da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon potássio (K^+)*.

Cobertura do solo	Sem pó de coco	1 cm de pó de coco	2 cm de pó de coco
Média (mmolc.L ⁻¹)	0,1864 a	0,1535 b	0,1456 b

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
Fonte: elaboração própria.

Em todas as curvas de eluição do íon sódio nos solos estudados (Figura 2) atingiu-se no lixiviado, pelo menos, 90% da concentração inicial aplicada, exceto para as coberturas de 1 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo e 2 cm de pó de coco do Neossolo Litólico, que atingiram 72 e 86%, respectivamente. Santos *et al.* (2010), estudando os parâmetros de transporte em colunas de solos Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolo Regolítico, e Silva *et al.* (2012), avaliando os parâmetros em colunas de solo Nitossolo Vermelho eutrófico, obtiveram concentrações de sódio no lixiviado de 90 e 100%, respectivamente, da concentração inicial aplicada.

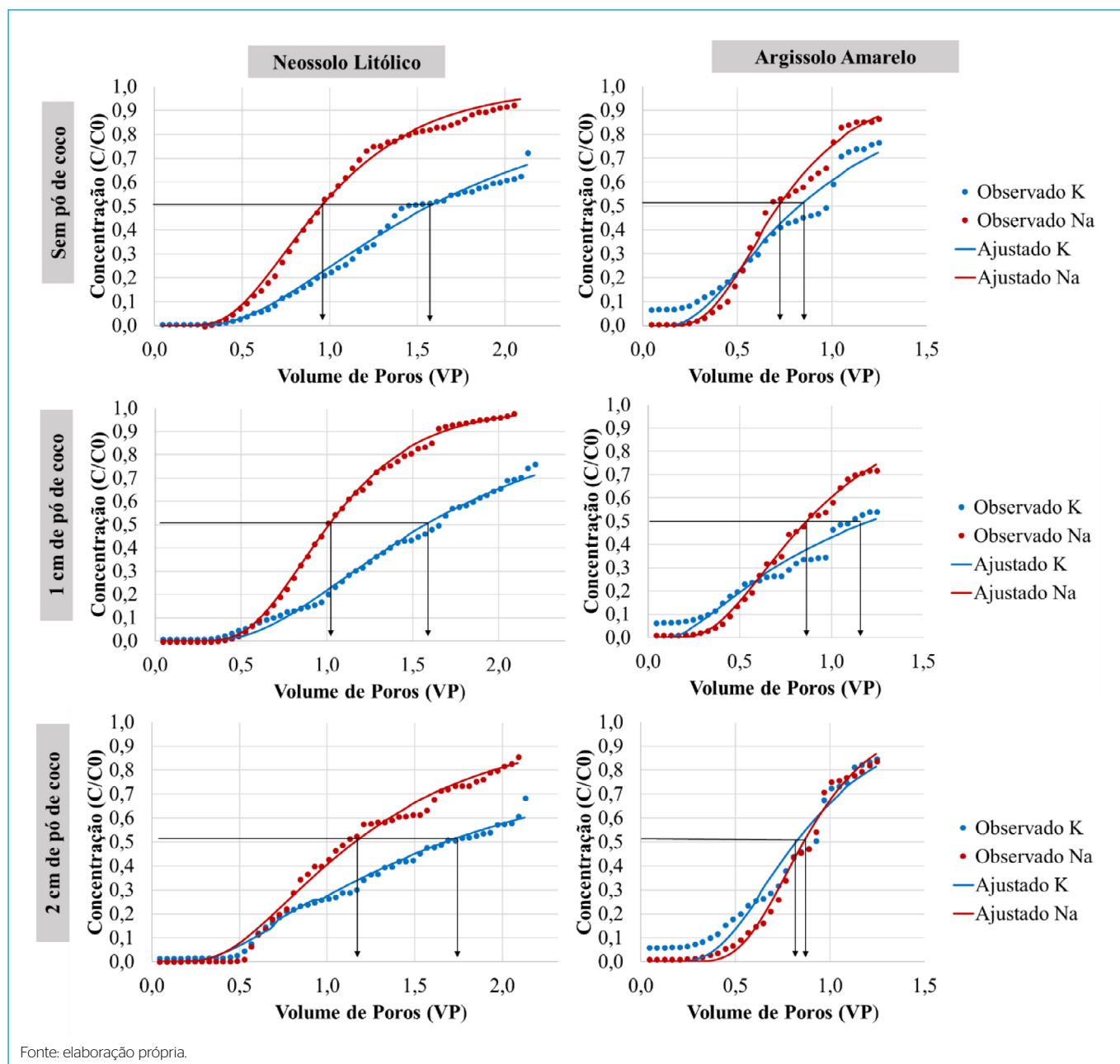
Observando-se o íon potássio, em todas as curvas eluição dos solos estudados, atingiu-se no lixiviado, pelo menos, 70% da concentração inicial aplicada, exceto para a cobertura de 1 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo, que atingiu 55%. Esse resultado está relacionado à influência da cobertura de pó de coco na retenção do íon potássio durante o processo de lixiviação. Basso, Soto e Chang (2017), avaliando a capacidade de retenção e de transporte de espécies iônicas da vinhaça em solo arenoso no cultivo de cana-de-açúcar, observaram, no lixiviado, 100% da concentração inicial aplicada. Pinho e Miranda (2014), estudando o transporte de água e potássio em colunas preenchidas com Latossolos Vermelho-Amarelo e Nitossolos Vermelho, atingiram, pelo menos, 90% da solução inicial aplicada de potássio.

O desenvolvimento e a forma das curvas de eluição de efluentes de determinado íon caracterizam o deslocamento miscível; assim, indicam a existência ou não de efeitos de interação entre o soluto e o solo (BIGGAR; NIELSEN, 1962). Observando-se as inclinações nas curvas de eluição dos íons sódio (Na^+) e potássio (K^+), verifica-se que para o íon potássio a inclinação das curvas ocorreu suavemente e mais tardiamente, necessitando de maior quantidade de volume de poros (VP). Quando o deslocamento das curvas se apresenta mais verticalizado, ou seja, com maior declividade, existe baixa interação entre soluto e o meio (BIGGAR; NIELSEN, 1962). Tal comportamento pode ser observado no íon sódio (Na^+), em ambos os solos. Por outro lado, as curvas do íon potássio (K^+) se apresentaram mais horizontais, indicando a existência de maior interação do soluto com o solo para o Neossolo Litólico e o Argissolo Amarelo.

Para ambos os íons (Na^+ e K^+), percebe-se que as condições sem pó de coco e com coberturas 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo necessitaram de menor volume de poros ($VP = 1,3$) para atingir a máxima concentração relativa ($C/C_0 = 1$), quando comparado ao Neossolo Litólico ($VP = 2,1$). Esse resultado é explicado pelo fato que as velocidades médias de soluto nos poros da solução do Neossolo Litólico apresentaram valores superiores à solução do Argissolo Amarelo.

De acordo com Biggar e Nielsen (1962), na concentração relativa $C/C_0 = 0,5$, o VP correspondente é o primeiro indicativo da existência de interação soluto-solo. Pôde-se verificar que, em relação ao solo Argissolo Amarelo, não houve interação para os íons sódio e potássio, pois, para as “setas” nas curvas em que a concentração relativa (C/C_0) corresponde a 0,5, os VP foram inferiores a 1 (exceto para cobertura de 1 cm de pó de coco no íon potássio). Oliveira *et al.* (2013), analisando a mobilidade do lítio em solos com disposição de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais, também encontraram valores de VP para $C/C_0 = 0,5$ inferiores a 1.

No que se refere ao solo Neossolo Litólico, o valor de VP foi maior do que 1 para a maioria das coberturas, indicando que houve interação entre o soluto e o solo, exceto para as condições sem pó de coco, no íon sódio. Basso e Kiang (2017), estudando contaminantes inorgânicos como o potássio (K^+) em resíduos



Fonte: elaboração própria.

Figura 2 – Curvas de eluição dos íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, ajustadas e observadas pelo modelo STANMOD para o Neossolo Litólico e o Argissolo Amarelo (em que C/C_0 é a concentração relativa).

urbanos, industriais e rurais no estado de São Paulo, encontraram valores de VP de 4,7 e 4,0 para solos arenosos e argilosos, respectivamente. Basso, Soto e Chang (2017) encontraram valores de VP de 1,5 em solo arenoso com cultivo de cana-de-açúcar. Pinho e Miranda (2014) obtiveram valores de VP de 1,5 e 2 em um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Nitossolo Vermelho, respectivamente.

Ao analisar as relações entre a condição sem pó de coco e com coberturas 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco (Figura 3), torna-se claro o efeito das coberturas na retenção nos íons sódio e potássio para os solos estudados. Observando-se os coeficientes angulares das regressões, verifica-se que a cobertura de 1 cm de pó de coco no Neossolo Litólico para o íon sódio e a cobertura

de 2 cm de pó de coco no Argissolo Amarelo para o íon potássio apresentaram valores superiores a 1, indicando a eficiência das coberturas na retenção desses íons. Os pontos abaixo da reta 1:1, nas coberturas de 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco para o íon sódio e no Argissolo Amarelo, apresentam a dispersão desse íon no solo.

Os parâmetros de transporte dos íons sódio e potássio nas condições sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco no Neossolo Litólico e no Argissolo Amarelo são apresentados na Tabela 8. O ajuste do modelo aos dados obtidos experimentalmente e a estimativa dos parâmetros de transporte do sódio (P, R, v, λ e D) para cada tratamento foram realizados para cada coluna de solo.

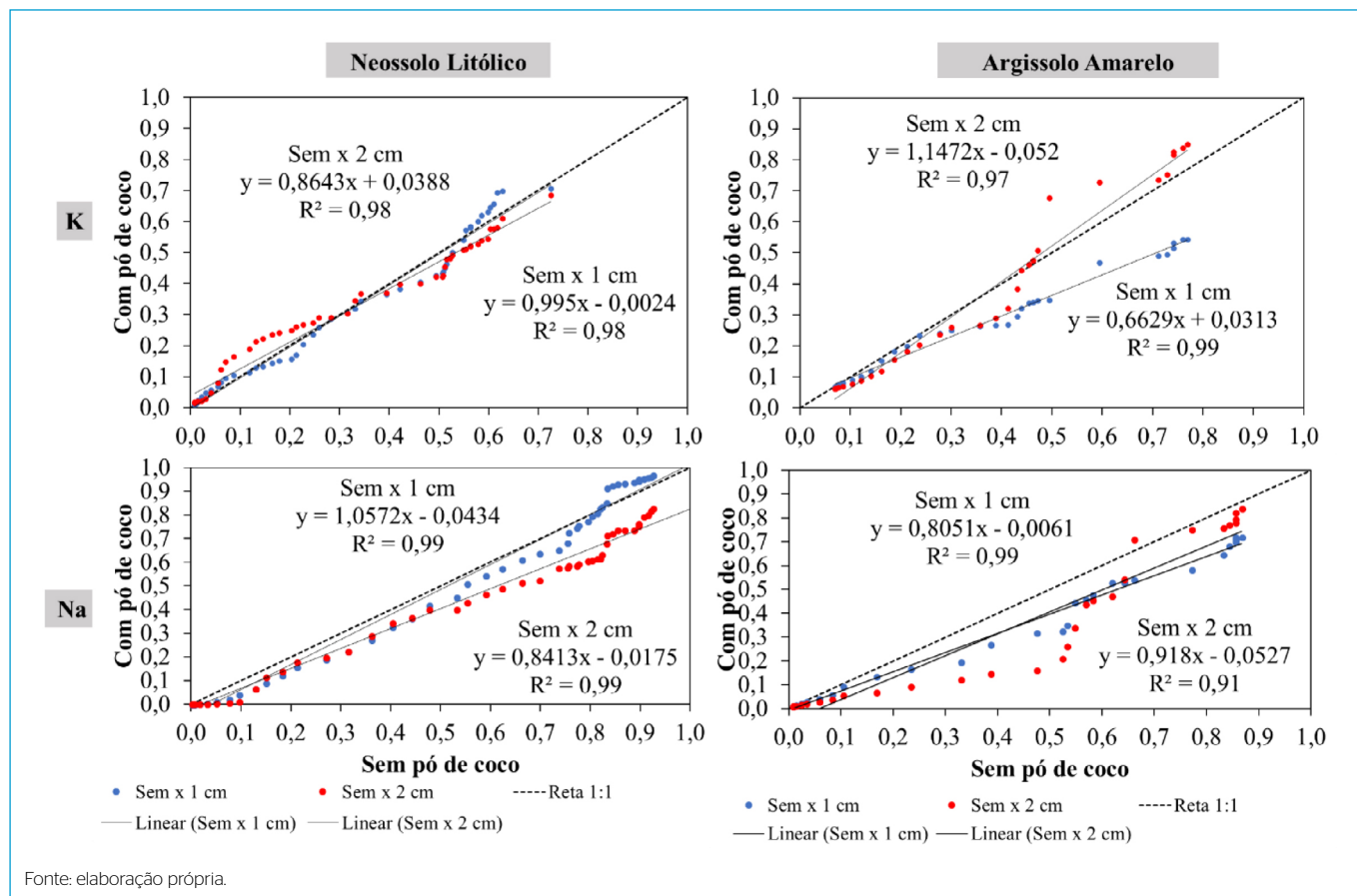


Figura 3 - Relações entre os íons e os solos estudados, sob os tratamentos sem pó de coco, 1 cm de pó de coco, e 2 cm de pó de coco.

Tabela 8 - Parâmetros de transporte do sódio (Na⁺) e do potássio (K⁺) para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, no Neossolo Litólico e no Argissolo Amarelo.

Solo	Cobertura do solo	P		R		v (cm.min ⁻¹)	λ (cm)		D (cm ² .min ⁻¹)	
		Na	K	Na	K		Na	K	Na	K
Neossolo Litólico	Sem pó de coco	7,78	3,84	1,07	1,97	0,26	3,86	7,81	1,01	2,04
	1 cm de pó de coco	11,99	5,05	1,09	1,88	0,19	2,50	5,94	0,46	1,10
	2 cm de pó de coco	4,68	1,93	1,39	2,51	0,07	6,40	15,52	0,43	1,04
Argissolo Amarelo	Sem pó de coco	8,31	3,72	0,82	1,06	0,03	3,61	8,06	0,12	0,27
	1 cm de pó de coco	6,03	1,06	1,00	2,33	0,03	4,98	28,39	0,17	0,95
	2 cm de pó de coco	17,84	8,80	0,91	0,93	0,04	1,68	3,41	0,07	0,15

P: número de Peclet; R: fator de retardamento; v: velocidade média de água nos poros; λ: dispersividade; D: coeficiente difusão-dispersão.
 Fonte: elaboração própria.

Verificou-se que para o íon sódio, na maioria dos tratamentos de cobertura, os valores correspondentes ao P foram menores que 10, indicando que o transporte predominante ocorreu por difusão. Para a cobertura de 1 cm de pó de coco do Neossolo Litólico e a cobertura de 2 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo, o valor de P foi superior a 10. Logo, o transporte predominante foi por convecção. Tais resultados corroboram o de Andrade *et al.* (2018), que, ao analisarem os parâmetros hidrodispersivos em um Planossolo Háptico do semiárido pernambucano sob reuso agrícola, encontraram P de 27,57 para o íon sódio, com a ocorrência de transportes predominante por convecção. Silva *et al.* (2012) encontraram elevados

valores de P para o íon sódio (P = 67,86) em solo sob aplicação de vinhaça, também observando transporte predominantemente por convecção.

Para o íon potássio, em todas as condições de cobertura e em ambos os solos, os valores correspondentes ao P foram menores que 10, indicando que o transporte predominante ocorreu por difusão. Basso e Kiang (2017) obtiveram números de Peclet médios de 2,40 e 7,16, em solos arenosos e argilosos, respectivamente, ocorrendo transporte predominante por difusão. Oliveira *et al.* (2013) encontraram números de Peclet de 3,15; 5,40 e 5,45, e observaram que o transporte predominante também ocorreu por difusão.

O R é um parâmetro que, indiretamente, expressa a capacidade do solo em reter íons. O R dependerá das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação da solução no solo, e indicará a existência de interação entre o cátion e as cargas negativas desse solo (VALOCCHI, 1984).

Os valores médios de R para o íon sódio em ambos os solos foram iguais a 0,95; 1,05 e 1,15 VP para as condições sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, respectivamente. Para o íon potássio, as médias foram iguais a 1,52; 2,11 e 1,72, respectivamente. Basso, Soto e Chang (2017) obtiveram R de 1,4.

Os maiores valores encontrados para o R nos solos estudados foram para o íon potássio, para todos os tratamentos de cobertura. Apesar de o potássio ser um cátion monovalente, assim como o sódio, o solo foi capaz de reter esse soluto com maior intensidade, na medida em que o fluxo de massa avançou (ANDRADE *et al.*, 2018). Adicionalmente, percebe-se que na condição sem pó de coco, para ambos os íons, houve menor R, quando comparada às coberturas de pó de coco, evidenciando forte tendência da cobertura de pó de coco na retenção de solutos no solo. Basso e Kiang (2017), estudando contaminantes inorgânicos como o potássio, em doses de 250, 500 e 1.000 mg.L⁻¹, encontraram fatores de retardamento médios de 7,56; 5,12 e 4,65, respectivamente.

O D para o íon potássio foi superior ao íon sódio, em todas as condições e em ambos os solos estudados (Tabela 8). Santos (2016) obteve valores de D de 5,70 e 1,53 cm².min⁻¹, para os solos Latossolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, respectivamente, indicando que uma das causas para o menor D no Argissolo foi sua menor velocidade de fluxo. Basso e Kiang (2017) também encontraram valores mais baixos de D para o íon potássio no solo argiloso, quando comparado a um solo arenoso.

Os valores de λ , que representam o alcance do fluxo unidimensional dos solutos na direção vertical, foram maiores no íon potássio em relação ao íon sódio, para todas as condições de cobertura e em ambos os solos estudados, indicando que o íon potássio apresentou maior alcance dispersivo do que o íon sódio.

A Tabela 9 apresenta a ANOVA dos parâmetros de transporte dos íons sódio e potássio. Para o íon sódio, não houve influência significativa para os parâmetros P e λ dos fatores estudados, ocorrendo apenas para o fator tratamento, de maneira isolada ($p < 0,05$). Já para os parâmetros velocidade média de água nos poros (v) e D verificou-se influência apenas para o fator solo isoladamente ($p < 0,05$).

Para o íon potássio (K⁺), houve influência significativa para os parâmetros P, R, v , D e λ , apenas para o fator solo e de maneira isolada ($p < 0,05$).

Os resultados do teste de comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey, para as condições em que ocorreram diferenças significativas, são apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Verifica-se que houve diferença entre as médias do Neossolo Litólico e do Argissolo Amarelo para o D e para v , sendo os valores do Neossolo Litólico significativamente superiores quando comparados com o Argissolo Amarelo. Santos (2016) obteve valores de D de 5,70 e 1,53 cm².min⁻¹ para os solos Latossolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, respectivamente, com este último apresentando menor velocidade de fluxo. Basso e Kiang (2017) encontraram, para o íon potássio, valores de D iguais a 0,119 e 0,098 cm².min⁻¹, em solos arenosos e argilosos, respectivamente.

Tabela 10 - Influência do tipo de solo nos parâmetros de transporte do íon sódio (Na⁺)*.

Solo	D	v (cm.min ⁻¹)
Neossolo Litólico	0,81 a	0,36 a
Argissolo Amarelo	0,18 b	0,04 b

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 11 - Influência da cobertura do solo com pó de coco para o parâmetro de transporte R no íon sódio (Na⁺)*.

Cobertura do solo	Sem pó de coco	1 cm de pó de coco	2 cm de pó de coco
R	0,82 b	1,01 b	1,56 a

*Médias seguidas dos tratamentos por letras minúsculas e as do solo por letras maiúsculas não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 12 - Influência do tipo de solo para os parâmetros de transporte do íon potássio (K⁺)*.

Solo	P	R	v (cm.min ⁻¹)	D	λ
Neossolo Litólico	7,14 a	1,67 a	0,36 a	2,71 a	6,59 b
Argissolo Amarelo	1,25 b	1,13 b	0,04 b	0,97 b	26,43 a

P: número de Peclet; R: fator de retardamento; v : velocidade média de água nos poros; λ : dispersividade; D: coeficiente difusão-dispersão; *médias seguidas dos tratamentos por letras minúsculas e as do solo por letras maiúsculas não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 9 - Análise de variância dos parâmetros de transporte: número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente de difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ) com nível de probabilidade de 5%.

Fonte de Variação	GL	P		R		v (cm.min ⁻¹)	D (cm ² .min ⁻¹)		λ (cm)	
		Na	K	Na	K		Na	K	Na	K
Solo	1	0,85 ^{NS}	8,98*	0,40 ^{NS}	10,20*	26,01*	6,99*	9,05*	4,09 ^{NS}	5,36*
Cobertura	2	3,02 ^{NS}	0,45 ^{NS}	7,80*	0,94 ^{NS}	2,63 ^{NS}	0,17 ^{NS}	2,11 ^{NS}	3,20 ^{NS}	0,27 ^{NS}
Solo* cobertura	2	3,27 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,54 ^{NS}	0,44 ^{NS}	2,84 ^{NS}	1,87 ^{NS}	1,94 ^{NS}	1,46 ^{NS}	0,23 ^{NS}
Resíduo	24									
C.V. (%)		33,53	56,79	11,45	11,1	11,45	26,48	46,86	26,77	36,49

GL: grau de liberdade; NS: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 13 - Desempenho do modelo STANMOD na estimativa das concentrações de Na⁺ e K⁺ para as condições de cobertura estudadas.

Solo	Cobertura do solo	d		r		c		Desempenho
		Na	K	Na	K	Na	K	
Neossolo Litólico	Sem pó de coco	0,9988	0,9980	0,9788	0,9768	0,9777	0,9748	Ótimo
	1 cm de pó de coco	0,9994	0,9991	0,9803	0,9789	0,9796	0,9767	Ótimo
	2 cm de pó de coco	0,9963	0,9977	0,9762	0,9770	0,9725	0,9748	Ótimo
Argissolo Amarelo	Sem pó de coco	0,9956	0,9937	0,9628	0,9487	0,9586	0,9427	Ótimo
	1 cm de pó de coco	0,9983	0,9915	0,9980	0,9430	0,9963	0,9350	Ótimo
	2 cm de pó de coco	0,9976	0,9889	0,9633	0,9524	0,9609	0,9418	Ótimo

d: índice de concordância; r: coeficiente de correlação; c: índice de desempenho.
Fonte: elaboração própria.

Observa-se que houve diferença entre o R do sódio com a cobertura de 2 cm de pó de coco e entre as condições sem pó de coco e 1 cm de pó de coco. Tais resultados indicam que a cobertura de 2 cm de pó de coco apresentou influência na lixiviação do sódio (Na⁺), verificando-se a eficiência da cobertura de pó de coco sob essa densidade específica de aplicação. Carrijo, Liz e Makishima (2002), no estudo relacionado a alternativas de coberturas para uso como substrato agrícola, encontraram maior absorção de sais pela cobertura de pó de coco e, conseqüentemente, menor absorção dos íons pela cultura. Tais resultados indicam que a utilização de pó de coco, quando existe aplicação de águas residuárias com alto teor de sais, representa alternativa viável para a prática agrícola.

Verifica-se que houve diferença entre os solos para os parâmetros P, R, v, D e λ. O Neossolo Litólico apresentou valores de média superiores ao Argissolo Amarelo, exceto para a λ. Pinho e Miranda (2014), ao estudarem os parâmetros hidrodispersivos em Latossolos Vermelho-Amarelo e Nitossolos Vermelho, encontraram valores de λ maiores no Nitossolo Vermelho.

O resultado da avaliação da precisão, da exatidão e do desempenho entre as concentrações estimadas pelo STANMOD e observadas experimentalmente é apresentado na Tabela 13.

Observa-se que, em todas as condições, os índices de concordância foram muito próximos da unidade, e os coeficientes de correlação (r) foram superiores a 0,96 e 0,94, para os íons sódio e potássio, respectivamente, indicando alta precisão e ajuste do modelo. Os índices de desempenho foram superiores a 0,85, mostrando, de acordo com a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), que todas as concentrações simuladas pelo STANMOD apresentaram ótimo desempenho de ajuste numérico. Andrade *et al.* (2018) encontraram coeficiente de correlação de 0,96 com ótimo desempenho do modelo. Moura *et al.* (2013), estudando os parâmetros hidrodispersivos em solos da Zona da Mata de Pernambuco, também encontraram r superiores a 0,98 e ótimo desempenho do STANMOD.

CONCLUSÕES

Houve maior interação entre o sódio e o solo na cobertura com 2 cm de pó de coco, e as maiores perdas de sódio por lixiviação ocorreram nas amostras sem cobertura de pó de coco. Para o íon potássio, houve maior interação nas coberturas com pó de coco, sendo as perdas associadas à ausência de pó de coco. Dessa forma, o substrato de pó de coco mostrou-se eficiente na diminuição da lixiviação de íons nos solos estudados.

Os íons sódio e potássio se deslocaram no Neossolo Litólico e no Argissolo Amarelo com transporte predominantemente por difusão.

A cobertura de pó de coco foi efetiva para retardar o transporte de solutos nos solos estudados. A adoção de cobertura de pó de coco de espessura de 2 cm propiciou significativa retenção do íon sódio, reduzindo, assim, o impacto desse íon para as camadas inferiores de ambos os solos.

O modelo STANMOD apresentou ótimo desempenho no ajuste numérico da simulação do transporte de solutos nos solos estudados, constituindo-se em ferramenta adequada para estudos de deslocamento de íons em água residuária.

AGRADECIMENTOS

À UFRPE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Assis, F. M. C. V.: Conceituação, Análise Formal, Escrita — Primeira Redação. Montenegro, A. A. A.: Conceituação, Análise Formal, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Farias, C. W. L. A.: Conceituação, Análise Formal, Escrita — Primeira Redação. Montenegro, S. M. G. L.: Análise Formal, Escrita — Primeira Redação. Pedrosa, E. M. R.: Análise Formal, Escrita — Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

AGRAFIOTI, E.; DIAMADOPOULOS, E. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. *Agricultural Water Management*, v. 105, p. 57-64, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.002>

ANDRADE, C.W.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MIRANDA, J.H.; MONTENEGRO, A.A.A.; ASSIS, F.M.C.V. Simulation of sodium and potassium dynamics by the HYDRUS 2D model in a Haplic Planosol via residue water. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n. 6, p. 874-884, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n6p874-884/2018>

- ARAMÉNDIZ-TATIS, H.; CARDONA-AYALA, C.; CORREA-ÁLVAREZ, E. Efecto de diferentes sustratos en la calidad de plántulas de berenjena (*Solanum melongena* L.). *Revista Colombiana Ciencias Hortícolas*, v. 7, n. 1, p. 55-61, 2013. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i1.2035>
- ARAÚJO, D.C.S. *Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano*. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.
- 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 Subterrânea*, v. 31, n. 1, p. 117-133, 2017. <https://doi.org/10.14295/rasv31i1.28638>
- BASSO, J.B.; SOTO, M.A.A.; CHANG, H.K. Percolação de vinhaça em coluna de solo arenoso da formação Rio Claro. *Águas Subterrânea*, v. 31, n. 1, p. 52-65, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28584>
- BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Miscible displacement: II. Behavior of tracers. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 26, n. 2, p. 125-128, 1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600020010x>
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARRIJÓ, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. *Horticultura Brasileira*, v. 20, n. 4, p. 533-535, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362002000400003>
- CASTOLDI, R.; GOMES, R.F.; CHARLO, H.C.O.; MELO, D.M.; BRAZ, L.T. Performance of cucumber hybrids cultivated in coconut fiber and soil. *Horticultura Brasileira*, v. 32, n. 1, p. 86-90, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000100014>
- CHEN, W.; LU, S.; JIAO, W.; WANG, M.; CHANG, A.C. Reclaimed water: A safe irrigation water source. *Environmental Development*, v. 8, p. 74-83, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.04.003>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 225 p.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- MARTINEZ, P.F. Manejo de substrato para horticultura. In: ENCONTRO NACIONAL DE SUBSTRATOS PARA PLANTAS, 2002. Campinas. *Anais* [...]. Campinas: IAC, 2002. p. 53-76.
- MICHEREFF, S.J. *Tutorial do programa STATISTIX 9*. 2009.
- MONTENEGRO, A.A.A.; ABRANTES, J.R.C.B.; LIMA, J.L.M.P.; SINGH, V.P.; SANTOS, T.E.M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, v. 109, p. 139-149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.018>
- MOURA, A.E.S.S.; CARVALHO, J.F.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CARMO, A.I.; MAGALHÃES, A.G.; SOUSA, C.C.M.; ANTONINO, A.C.D.; ARAÚJO, J.A.C.; MELO, R.O. Determinação de parâmetros hidrodispersivos em solos da Zona da Mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 109-115, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p109-115>
- 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. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 139-148, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200006>
- 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. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 5, p. 899-911, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000500009>
- ROLIM, H.O.; CHAVES, J.R.; NUNES, A.B.A.; SILVA FILHO, H.A.; SANTOS, E.V.M. Qualidade dos efluentes de sistemas de tratamento Biológico UASB E UCT para reuso agrícola. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, p. 393-414, 2016. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n2p393-414>
- SANTOS, J.S.; LIMA, V.L.A.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; SILVA, L.V.B.D.; AZEVEDO, C.A.V. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 11, p. 1226-1233, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001100013>
- SANTOS, R.S.S. *Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino*. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- SANTOS, W.G.; BORGES, G.A.; GUERREIRO, L.H.H.; CARDOSO, D.N.P.; CASTRO, D.A.R.; RODRIGUES, E.C. Influência do tratamento químico na fibra de coco para utilização em compósito polimérico. In: VOIGT, C.L. *Impactos das tecnologias na Engenharia Química 3*. Ponta Grossa: Atena, 2019. p. 63-67.
- SILVA, N.F.; LELIS NETO, J.A.; TEIXEIRA, M.B.; CUNHA, F.N.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. *Revista Irriga*, v. 1, n. 1, p. 340-350, 2012. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p340>
- ŠIMÚNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.H.; SEJNA, M. Development and applications of the Hydrus and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, v. 7, n. 2, p. 587-600, 2008. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- SOUZA, C.F.; BASTOS, R.G.; GOMES, M.P.M.; PULSCHEN, A.A. Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reuso agrícola. *Ambiente & Água*, v. 10, n. 3, p. 587-597, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1549>
- VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. *Water Resources Research*, v. 20, n. 4, p. 499-503, 1984. <https://doi.org/10.1029/WRO20i004p00499>
- VAN GENUCHTEN, M.T. Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. Riverside: USDA, ARS, U. S. Salinity Laboratory, 1981.
- VAN GENUCHTEN, M.T.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: Black, C.A. (Org.). *Methods of soil analysis*. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 1025-1054.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison for models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>