

Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba¹

Forms of potassium in representative soils of the State of Paraíba, Brazil

Jailma dos Santos de Medeiros², Fábio Henrique Tavares de Oliveira³, Hemmannuella Costa Santos^{4*}, Jandeilson Alves de Arruda⁵ e Montesquieu da Silva Vieira⁶

RESUMO - Os solos do Estado da Paraíba apresentam grande diversidade de características químicas, físicas e mineralógicas, acarretando em variações nos teores e formas de K disponíveis no solo. Objetivou-se com este trabalho avaliar os teores de K não-trocável, K trocável e K solúvel em doze solos do Estado da Paraíba, na ausência e na presença de fertilização potássica, e correlacioná-los com as características químicas, físicas e mineralógicas desses solos. O estudo constou de 60 tratamentos, sendo 12 solos e cinco doses de K (0; 50; 100; 200 e 300 mg dm⁻³) na forma de cloreto de potássio, com três repetições. Após receberem os tratamentos, os solos foram incubados por um período de 21 dias, e em seguida, uma sub-amostra de 0,2 dm³ de cada solo foi retirada para determinação dos teores de K não-trocável, K trocável e K solúvel. Os solos formados sob clima semiárido foram os solos que apresentaram as maiores reservas de K não-trocável. Solos com maior proporção de mica e minerais do tipo 2:1 na fração argila apresentaram os maiores teores de K não-trocável e K trocável. Independente do grupo de solos, os teores de silte apresentaram correlação elevada com os teores de K não-trocável e de K trocável. Nos solos mais desenvolvidos, não foi evidenciada fixação de K proveniente do fertilizante. Porém, nos solos menos desenvolvidos, a fixação de K ficou evidenciada pela pequena quantidade de K recuperada pelo extrator acetato de amônio nos solos mais argilosos e, principalmente, naqueles com predominância de minerais do tipo 2:1 e mica.

Palavras-chave: Potássio não-trocável. Potássio trocável. Intemperismo.

ABSTRACT - The soils of the State of Paraíba in Brazil exhibit great diversity in their chemical, physical and mineralogical characteristics, which result in variations in the levels and forms of K available in the soil. The objective of this work was to evaluate the levels of non-exchangeable, exchangeable and soluble K in twelve soils in the State of Paraíba, both with and without potassium fertilizer, and to correlate them with the chemical, physical and mineralogical properties of these soils. The study consisted of 60 treatments, being made up of 12 types of soil and five levels of K (0, 50, 100, 200 and 300 mg dm⁻³) in the form of potassium chloride, with three replications. After receiving the treatments, the soils were incubated for a period of 21 days, and then a subsample of 0.2 dm³ was taken from each soil sample in order to determine the levels of non-exchangeable, exchangeable and soluble K. Soils formed under semiarid conditions presented the highest reserves of non-exchangeable K. Those with a greater proportion of mica and 2:1 minerals in the clay fraction, showed the highest levels of non-exchangeable and exchangeable K. Independently of the soil group, silt levels were highly correlated with the levels of non-exchangeable and exchangeable K. In the more developed soils, there was no evidence of K fixation as a result of the fertilizer. However, in the less developed soils, K fixation was evidenced by the small amount of K recovered by extraction with ammonium acetate from the more clayey soils and especially from those with a predominance of 2:1 minerals and mica.

Key words: Non-exchangeable potassium. Exchangeable potassium. Weathering.

*Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 13/11/2012; aprovado em 10/12/2013

Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, DSER/UFPB

²Departamento de Solos e Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Areia-PB, Brasil, 58.397-000, santosjailma@yahoo.com.br

³Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró-RN, Brasil, fabio@ufersa.edu.br

⁴Departamento de Agropecuária, Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras-PB, Brasil, hecosantos@yahoo.com.br

⁵Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Picuí, Picuí-PB, Brasil, jandeilson_agro@yahoo.com.br

⁶Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Ipangaçu, Ipangaçu-RN, Brasil, monti_br@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A forma com que o potássio (K) se liga à matéria mineral sólida do solo, bem como a energia dessas ligações, dá origem a diversas formas de K no solo: estrutural, trocável, não-trocável e solúvel (VILLA; FERNANDES; FAQUIN, 2004; CABBAU *et al.*, 2004). Nos solos, as formas não-trocáveis, trocáveis e solúveis estão em equilíbrio dinâmico, de modo que qualquer alteração nos teores de K na solução do solo provocada pela adubação, absorção pela planta ou perda por lixiviação, irá alterar os teores das demais formas desse elemento no solo, principalmente das formas trocável e não-trocável.

Neste contexto, a absorção de K pelas plantas desencadeará um processo contínuo de depleção de suas formas no solo, especialmente em solos com baixo teor solúvel desse elemento. Por outro lado, quando uma adubação potássica é realizada, imediatamente aumenta o K em solução e em seguida aumenta os teores de K trocável e K não-trocável no solo. Essa passagem de K solúvel para trocável e não-trocável depende de características dos solos como teor de argila, CTC e minerais presentes; além da fertilização potássica (KAMINSKI *et al.*, 2007; KAMINSKI *et al.*, 2010).

No Estado da Paraíba ocorre grande variação de solos, encontrando-se desde solos jovens, como os Neossolos Litólicos e os Luvisolos, até solos bastante desenvolvidos, como os Latossolos e Argissolos. Essas quatro classes de solo correspondem a quase 80% dos solos paraibanos, com destaque para Neossolos e Luvisolos (BRASIL, 1972).

Os solos mais desenvolvidos pedogeneticamente ocorrem sob fases de vegetação de floresta tropical subperenifólia (litoral, brejo), floresta subcaducifólia (agreste) e floresta caducifólia (Serra de Cuité), onde a precipitação pluvial é mais elevada que no semiárido. Os solos menos desenvolvidos pedogeneticamente ocorrem no semiárido, sob fase de vegetação de caatinga hiperxerófila, o que reflete a baixa precipitação pluvial nesse ambiente (BRASIL, 1972). Esses solos apresentam ampla variação de teores de silte, argila e minerais predominantes na fração argila, de modo que o K nesses solos se apresenta em formas e disponibilidades variadas para as plantas (MEDEIROS *et al.*, 2010).

Trabalhos sobre a quantificação das formas de K nos solos têm sido realizados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (MELO *et al.*, 2003; CABBAU *et al.*, 2004; VILLA; FERNANDES; FAQUIN, 2004; WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008; FRAGA *et al.*, 2009; KAMINSKI *et al.*, 2010), mas em solos do Nordeste e em especial no Estado da Paraíba esses trabalhos são escassos (MEDEIROS *et al.*, 2010).

Informações sobre as reservas das formas de K encontradas nos solos paraibanos permitirão estimar a

capacidade de suprimento de K para as plantas em curto, médio e longo prazos (CASTILHOS; MEURER, 2002; SILVA *et al.*, 2000). Diante do exposto, a quantificação das formas de K em solos representativos do Estado da Paraíba é importante para avaliar a capacidade de suprimento de K desses solos para as plantas, tendo em vista a escassez desses estudos.

Objetivou-se, neste trabalho, quantificar as formas de K presentes em doze solos representativos do Estado da Paraíba, na ausência e na presença de fertilização potássica, e correlacioná-las com as características químicas, físicas e mineralógicas desses solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Os doze solos utilizados nesse trabalho foram classificados por BRASIL (1972), enquadrando-se na nova classificação proposta por EMBRAPA (2006) como Argissolo Amarelo (PA); Argissolo Acinzentado (PAC); Argissolo Vermelho Eutrófico (PVe); Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA); Latossolo Amarelo (LA); Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); Neossolo Regolítico (RR); Neossolo Litólico (RL); Luvisolo Háptico (TX); Planossolo Háptico (SX); Neossolo Flúvico (RY) e Vertissolo Háptico (VX). Além de serem representativos do Estado da Paraíba em termos de ocorrência e de uso na agricultura, os doze solos selecionados são divididos em dois grupos de acordo com o grau de intemperismo: solos mais desenvolvidos ($K_i \leq 2,46$) e solos menos desenvolvidos ($K_i > 2,46$), representando 11 subordens do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Esses solos foram coletados em 11 municípios paraibanos distribuídos nas mesorregiões Litoral, Agreste e Sertão, sob condições variadas de vegetação, clima e relevo.

Foram coletadas amostras de solo da camada de 0-0,3 m de profundidade nos doze solos em estudo e levadas para o laboratório, onde foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas, e em seguida caracterizadas química, física e mineralogicamente (Tabelas 1 e 2), segundo métodos analíticos descritos em Donagema *et al.* (2011).

A necessidade de calagem dos solos foi estimada pela média aritmética da necessidade de calagem calculada pelos métodos da neutralização do Al^{3+} e elevação dos teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ e pelo método da saturação por bases (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). Apenas os solos PA, PAC, PVA e PVd receberam calagem, aplicando-se uma mistura de $CaCO_3$ (p.a.) e de $MgCO_3$ (p.a.) numa relação molar 4:1 e incubaram-se os solos por duas semanas com uma

quantidade de água correspondente a 50% da porosidade total de cada solo. Após a correção da acidez desses quatro solos, doses de K correspondentes a 0; 50; 100; 200 e 300 mg dm⁻³ foram aplicadas nos doze solos em três repetições, na forma de cloreto de potássio (KCl) P.A. em solução e os mesmos foram incubados durante 21 dias com uma quantidade de água correspondente a 50% da porosidade total de cada solo previamente determinada, e aplicada de uma só vez.

Durante os períodos de incubação dos solos após receberem a calagem e as doses de K, as amostras de solos (3,2 dm³) estavam acondicionadas em vasos plásticos em casa de vegetação. Após cada período de incubação as amostras dos solos foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 4,0 mm, homogêneas e devolvidas aos vasos. O número de vasos utilizados foi 180, correspondente a 12 solos x 5 doses de K x 3 repetições. Em seguida, uma sub-amostra de 0,2 dm³ do solo de cada vaso foi retirada e passada em peneira de malha de 2 mm para análise dos teores das formas de K presentes em cada solo.

O K solúvel do solo foi extraído utilizando-se dois extratores: água destilada e solução de cloreto de cálcio (CaCl₂) 0,01 mol L⁻¹, na relação solo:extrator de 1:10 (m/v) e tempo de agitação de cinco minutos. Como os

extratos obtidos eram turvos, adicionou-se 1 mL de uma solução de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ para floculação dos coloides e posterior obtenção do extrato límpido após a filtragem. Para extração do K trocável foi utilizado o acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 na relação solo: extrator de 1:10 (m/v) e tempo de agitação de cinco minutos (HELMKE; SPARKS, 1996). O teor de K não-trocável foi estimado subtraindo-se do teor de K do solo extraído com HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente, o teor de K trocável extraído do solo com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 (HELMKE; SPARKS, 1996).

As análises estatísticas consistiram dos cálculos das médias dos teores das formas de K dos solos, da análise de correlação dos valores dessas médias com algumas características químicas e físicas dos solos e da análise de regressão, sendo realizadas por meio do pacote estatístico SAEG (2007), e testados pelo teste t. Foram ajustadas equações de regressão linear simples para os teores de K trocável e de K solúvel em CaCl₂ e em água destilada, como variáveis dependentes das doses de K aplicadas. Os valores dos coeficientes angulares dessas equações, que representam as taxas de recuperação de K pelos extratores, foram correlacionados com algumas características químicas e físicas dos solos, como CTC, teores de silte e argila, Ki.

Tabela 1 - Atributos químicos de 12 solos representativos do Estado da Paraíba⁽¹⁾

Solo ⁽²⁾	pH	C.O.	Prem ⁽³⁾	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	(H+Al)	CTC
	(H ₂ O)	dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	mmol dm ⁻³						
Solos mais desenvolvidos ⁽⁴⁾											
PA	5,9	0,35	45	1,52	0,4	6,0	4,0	0,2	1,1	16,8	27,4
PAC	4,4	1,07	47	3,59	1,0	8,0	6,0	0,5	9,6	56,7	72,0
PVe	6,3	0,90	35	6,80	3,9	54,0	18,0	0,4	0,0	27,5	103,8
PVA	5,5	1,07	28	2,63	2,4	11,0	13,0	0,4	3,2	55,0	81,8
LA	5,9	0,59	44	11,42	1,8	16,0	11,5	1,1	0,0	21,4	51,8
PVd	5,0	0,80	28	2,32	1,9	19,0	8,0	0,4	3,2	42,8	72,0
Solos menos desenvolvidos ⁽⁴⁾											
RR	7,0	0,34	54	24,1	1,8	18,0	9,0	0,2	0,0	10,7	39,7
RL	6,2	0,38	45	4,3	1,9	20,0	11,0	2,5	0,5	22,9	58,3
TX	6,2	0,76	41	4,4	6,4	61,0	40,0	1,0	0,0	29,0	137,4
SX	7,2	0,43	37	21,6	2,1	122,0	56,0	3,0	0,0	15,3	198,4
RY	7,3	0,89	44	144,3	6,0	110,0	40,0	0,9	0,0	12,2	169,1
VX	8,4	0,37	25	19,8	6,9	291,0	104,0	21,9	0,0	7,6	431,3

⁽¹⁾Análises realizadas conforme metodologias apresentadas em DONAGEMA *et al.* (2011). ⁽²⁾PA: Argissolo Amarelo; PAC: Argissolo Acinzentado; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; PVd: Argissolo Vermelho distrófico; RR: Neossolo Regolítico; RL: Neossolo Litólico; TX: Luvisso Háplico; SX: Planossolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico; VX: Vertissolo Háplico. ⁽³⁾Fósforo remanescente (ALVAREZ *V et al.*, 2000). ⁽⁴⁾Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46; Solos menos desenvolvidos: Ki ≥ 2,46, com exceção do solo RR

Tabela 2 - Classe de solo⁽¹⁾, material de origem⁽²⁾, granulometria⁽³⁾, características mineralógicas e localização dos solos representativos do Estado da Paraíba

Solo	Município de coleta	Material de origem ⁽²⁾	Formação geológica e litologia	Precipitação pluvial mm	Granulometria			Minerais ⁽⁴⁾	Ki ⁽²⁾
					Areia	Silte	Argila		
					dag kg ⁻¹				
-----Solos mais desenvolvidos ⁽⁵⁾ -----									
PA	Jacumã	Sedimentos areno-argilosos	Terciário- Grupo Barreiras	1500	88	3	9	Ct, Gb, Gt	1,72
PAC	Maman-guape	Sedimentos argilosos-arenosos	Terciário- Grupo Barreiras	1600	84	4	12	Ct, Gt	1,92
PVe	Marizópolis	Saprolito da rocha e material transportado	Granito metassomático	600	58	24	18	Ct, Gt, Mi, (2:1)	2,11
PVA	Areia	Saprolito da rocha e material transportado	Pré- Cambiano (CD). Biotita-gnaiss	900	66	11	23	Ct, Gt	2,46
LA	Cuité	Sedimentos argilo-arenosos e argilosos	Terciário- Sedimentos da Série Serra do Martins	600	65	6	29	Ct, Gt	2,16
PVd	Alagoa Grande	Saprolito da rocha com material pseudo-autóctone no desenvolvimento do horizonte A	Pré-Cambiano (CD). Hornblenda- biotita-gnaiss	1200	49	13	38	Ct, Gt, Mi, Hm	2,25
-----Solos menos desenvolvidos ⁽⁵⁾ -----									
RR	Esperança	Saprolito do migmatito	Migmálio (embrechitofacoidal)	800	89	8	3	Ct, Mi, Qz, (2:1)	2,17
RL	Pocinhos	Saprolito do gnaiss	Pré-Cambiano-gnaiss	650	81	11	8	Mi, Ct, (2:1)	2,93
TX	São Miguel de Taipu	Saprolito da rocha com material pseudo-autoctone no desenvolvimento do horizonte A	Pré-Cambiano (CD). Hornblenda-gnaiss	700	67	19	14	Ct, Mi, (2:1), Fp	3,42
SX	Cuité	Saprolito da rocha gnaiss com biotita e Hornblenda e material pseudo-autoctone	Pré-Cambiano (CD). Gnaiss com Biotita e Hornblenda	600	64	17	19	(2:1), Mi, Ct, Gt	4,21
RY	Sousa	Sedimentos areno-argilosos	Pré-Cambiano. Arenitos e folhelhos	700	45	35	20	Mi, Ct, (2:1)	3,20
VX	Sousa	Folhelhos e argilitos calcíferos	Cretáceo. Sedimentos da Série Rio do Peixe	700	22	35	43	(2:1), Qz, Mi	4,52

⁽¹⁾EMBRAPA (2006): PA: Argissolo Amarelo; PAC: Argissolo Acinzentado; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; PVd: Argissolo Vermelho distrófico; RR: Neossolo Regolítico; RL: Neossolo Litólico; TX: Luvisso Háplico; SX: Planossolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico; VX: Vertissolo Háplico. ⁽²⁾ BRASIL (1972). ⁽³⁾ DONAGEM *et al.* (2011). ⁽⁴⁾Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Mi: mica; (2:1): mineral 2:1; Hm: hematita; Qz: quartzo; Fp: feldspato. Os minerais estão citados na ordem de sua predominância no solo. ⁽⁵⁾Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46. Solos menos desenvolvidos: Ki ≥ 2,46, com exceção do solo RR

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo PVe e os seis solos menos desenvolvidos (RR, RL, TX, SX, RY e VX), apresentaram as maiores reservas de K não-trocável e de K trocável (Tabela 3), provavelmente devido à presença de mica e de minerais

secundários do tipo 2:1 nesses solos (Tabela 2). Considerando que o K não-trocável é uma reserva de K do solo que pode ser liberada pelos minerais primários alteráveis presentes principalmente na fração silte do solo ou liberada pelos minerais secundários do tipo 2:1 presentes na fração argila, esses solos são os que

possuem maior capacidade de suprimento de K para as plantas (MELO *et al.*, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2010).

As reservas de K não-trocável do Neossolo Flúvico (RY) e do Luvisolo Háptico (SX) são de 8.187 e 6.157 kg ha⁻¹ de K, respectivamente (Tabela 3), constituindo-se numa reserva de K na fase sólida do solo que pode vir a ser disponibilizada para as plantas em médio e longo prazos. Por outro lado, a capacidade de suprimento de K para as plantas pelos solos mais desenvolvidos, especialmente aqueles mais arenosos, é muito pequena, como observado nos solos Argissolo Amarelo (PA) e Argissolo Acinzentado (PAC), com valores iguais a 19 e 37 kg ha⁻¹ de K (Tabela 3). Entre os solos mais desenvolvidos, os solos PA e PAC apresentaram os menores teores de K não-trocável, K trocável e K solúvel, enquanto os solos PVe e PVA apresentaram os maiores teores dessas formas de K (Tabela 3).

Com relação ao K trocável, a tendência foi semelhante à verificada para o K não-trocável, com maiores estoques

de K trocável encontrados nos solos menos desenvolvidos (Tabela 3), nos quais se observa maior presença de mica e de minerais secundários do tipo 2:1, maiores teores de silte e maiores valores de Ki (Tabela 2).

As quantidades de K solúvel extraído com CaCl₂ nos solos mais desenvolvidos variaram de 58 kg ha⁻¹ no solo PA a 310 kg ha⁻¹ no solo PVe, e nos solos menos desenvolvidos essa variação foi de 109 kg ha⁻¹ no solo RL a 510 kg ha⁻¹ no solo TX (Tabela 3). Para os solos mais desenvolvidos, a quantidade de K solúvel em água foi 66%, em média, da quantidade de K solúvel em CaCl₂, enquanto para os solos menos desenvolvidos esse valor foi 44% (Tabela 3). Esse maior poder de extração de K pelo CaCl₂, em relação à água destilada, pode ser explicado pela presença do cátion Ca²⁺ no extrator CaCl₂, talvez extraído uma pequena fração de K trocável. Portanto, pode-se admitir que o extrator água destilada forneceu uma estimativa mais aproximada da quantidade de K presente na solução do solo, livre das forças de atração eletrostáticas.

Tabela 3 - Formas de potássio (K) não-trocável, K trocável e K solúvel extraído com solução de cloreto de cálcio (CaCl₂) 0,01 mol L⁻¹ e com água destilada, em amostras de solos mais e menos desenvolvidos do Estado da Paraíba

Solo ⁽¹⁾	K não-trocável ⁽²⁾	K trocável ⁽³⁾	K solúvel ⁽⁴⁾	
			CaCl ₂	Água
----- kg ha ⁻¹ (5) -----				
Solos mais desenvolvidos				
PA	19	75	58	58
PAC	37	128	99	80
PEv	1.111	714	310	165
PVA	420	329	202	108
LA	70	277	151	119
PVd	301	286	149	111
Solos menos desenvolvidos				
RR	632	251	149	110
RL	1.928	336	109	74
TX	2.559	1.226	510	201
SX	6.157	302	115	55
RY	8.187	914	344	153
VX	3.385	1.975	250	53

⁽¹⁾PA = Argissolo Amarelo; PAC = Argissolo acinzentado; PEv = Argissolo Vermelho eutrófico; PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo; LA = Latossolo Amarelo; PVd = Argissolo Vermelho distrófico; RR = Neossolo Regolítico; RL = Neossolo Litólico; TX = Luvisolo Háptico; SX = Planossolo Háptico; RY = Neossolo Flúvico; VX = Vertissolo Háptico. ⁽²⁾ Calculado subtraindo-se do K extraído com ácido nítrico 1 mol L⁻¹ fervente o K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7 (Helmke; Sparks, 1996). ⁽³⁾ K extraído com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0, adotando-se a relação solo:solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos (Helmke; Sparks, 1996). ⁽⁴⁾ K extraído com solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ ou com água destilada, na relação solo:solução(m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos. ⁽⁵⁾ Considerando a camada do solo de 0-30 cm

Quando se compara a relação entre o K solúvel em água e o K trocável, nos solos SX, RY e VX, que são os solos menos desenvolvidos mais argilosos (Tabela 2), as quantidades de K solúvel em água representam apenas 18, 17 e 3%, respectivamente, das quantidades de K trocável (Tabela 3). Para os solos PVA, LA e PVd, que são os solos mais desenvolvidos com maiores teores de argila, esses valores foram 33, 43 e 39%, respectivamente (Tabela 3). Esses resultados indicam que os solos menos desenvolvidos, principalmente aqueles mais argilosos e com maior proporção de minerais do tipo 2:1, os quais apresentam maior CTC (Tabelas 1 e 2), mantêm na solução do solo apenas uma pequena proporção do K prontamente disponível para as plantas. O K trocável é a forma de K do solo que mais se relaciona com a quantidade de K acumulada nas plantas, juntamente com o K da solução que são, inicialmente, as formas do elemento

prontamente disponíveis para as plantas (VILLA *et al.*, 2004; CABBAU *et al.*, 2004).

Entre os solos mais desenvolvidos, o teor de K não-trocável apresentou correlação positiva e elevada (Tabela 4) com a CTC efetiva ($r = 0,95^{**}$), teor de silte ($r = 0,97^{**}$) e relação silte/argila ($r = 0,96^{**}$), mas para o grupo de solos menos desenvolvidos só foi verificada uma pequena correlação ($r = 0,66^*$) entre os teores de K não-trocável dos solos e os teores de silte. O teor de silte foi o que se correlacionou melhor com os teores de K não-trocável e K trocável do solo (Tabela 4). A fração silte dos solos é constituída principalmente de minerais primários alteráveis, os quais podem apresentar grandes reservas de K não-trocável (SILVA *et al.*, 2008). O teor de K não-trocável só apresentou correlação positiva significativa ($r = 0,72^{**}$) com o índice Ki quando foram agrupados todos os solos na análise de correlação.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação linear simples entre os teores de potássio (K) não-trocável, K trocável, K solúvel em cloreto de cálcio (CaCl_2) 0,01 mol L⁻¹ e em água destilada e características químicas e físicas dos solos mais e menos desenvolvidos do Estado da Paraíba

Característica	K não-trocável ⁽¹⁾	K trocável ⁽²⁾	K solúvel ⁽³⁾	
			CaCl ₂	Água
Solos mais desenvolvidos (n = 6)				
CTC	0,82*	0,82*	0,87*	0,79*
CTC efetiva	0,95**	0,98**	0,94**	0,93**
Silte	0,97**	0,96**	0,94**	0,90**
Silte/argila	0,96**	0,90**	0,85**	0,75**
Ki	0,36 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,55 ^{ns}
Argila	0,07 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,42 ^{ns}
Solos menos desenvolvidos (n = 6)				
CTC	0,31 ^{ns}	0,83*	0,15 ^{ns}	-0,37 ^{ns}
CTC efetiva	0,31 ^{ns}	0,82*	0,12 ^{ns}	-0,39 ^{ns}
Silte	0,66*	0,78*	0,44 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Silte/argila	-0,35 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,37 ^{ns}
Ki	0,44 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,38 ^{ns}
Argila	0,36 ^{ns}	0,85*	0,17 ^{ns}	-0,34 ^{ns}
Todos os solos (n = 12)				
CTC	0,54*	0,87**	0,33 ^{ns}	-0,20 ^{ns}
CTC efetiva	0,57*	0,86**	0,32 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
Silte	0,74**	0,84**	0,64*	0,27 ^{ns}
Silte/argila	0,36 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,35 ^{ns}
Ki	0,72**	0,71**	0,36 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
Argila	0,10 ^{ns}	0,50*	0,12 ^{ns}	-0,09 ^{ns}

⁽¹⁾Calculado subtraindo-se do K extraído com ácido nítrico 1 mol L⁻¹ fervente o K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7 (Helmke; Sparks, 1996). ⁽²⁾K extraído com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0, adotando-se a relação solo:solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos (Helmke; Sparks, 1996). ⁽³⁾K extraído com solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ ou com água destilada, na relação solo:solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos, *, ** e ns: significativo a 5, 1% e não significativo, respectivamente

Independentemente do grupo de solos, o teor de K trocável dos solos foi diretamente proporcional ao teor de silte (Tabela 4). Entre os solos mais desenvolvidos o solo PVe foi o que apresentou maior quantidade de K trocável, e entre os solos menos desenvolvidos foram extraídas maiores quantidades de K trocável no solo VX (Tabela 3). Embora os solos RY e SX sejam os solos com maior reserva de K não-trocável, o mesmo não pode ser dito para o K trocável.

As declividades das equações de regressão linear simples que estimam os teores de K trocável e solúvel em função de doses de K aplicadas (Tabelas 5 e 6) indicam a taxa de recuperação pelo extrator do nutriente aplicado ao solo. Assim, valor de declividade igual a 1 (um) significa que o extrator recupera 100% da dose de K aplicada e valores de declividade maior ou menor que 1 (um) significa que o extrator extrai, respectivamente, uma quantidade de K maior ou menor que a quantidade de K adicionada ao solo (MEDEIROS *et al.*, 2010).

A taxa de recuperação de K trocável pelo extrator acetato de amônio não variou muito dentro do grupo de solos mais desenvolvidos, sendo que nos solos PAC e PVD esse extrator recuperou aproximadamente 100% da dose de K aplicada, e nos demais solos mais desenvolvidos a taxa de recuperação variou de 111 a 124% (Tabela 5). Isso significa que nenhuma parte do K aplicado como fertilizante a esses solos passa para formas não-trocáveis de K, ou seja, a capacidade de fixação de K (adsorção específica de K) desses solos é mínima ou desprezível, de modo que a taxa de recuperação de K pela planta nesses solos também tende a ser de 100% do K adicionado, se não houver perda do elemento no solo.

No grupo de solos menos desenvolvidos, a taxa de recuperação de K pelo extrator acetato de amônio variou de 17% no solo SX a 108% no solo TX (Tabela 6). Apenas nos solos RR e TX todo o K adicionado ao solo foi recuperado pelo extrator acetato de amônio (Tabela 6).

Tabela 5 - Equações de regressão linear simples que estimam os teores de potássio (K) (\hat{y} , em mg dm^{-3}) trocável e K solúvel em cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e em água, em solos mais desenvolvidos do Estado da Paraíba, como variável dependente de doses de K (x , em mg dm^{-3}) aplicadas aos solos

Solo ⁽¹⁾	Forma de K ⁽²⁾	Equação	R ²	p
PA	K trocável	$\hat{y} = 6,44 + 1,1090^{**}x$	0,96	0,0017
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 20,74 + 0,6203^{**}x$	0,99	0,0000
	K solúvel em água	$\hat{y} = 14,84 + 0,5684^{**}x$	0,99	0,0001
PAC	K trocável	$\hat{y} = 32,90 + 1,0378^{**}x$	0,99	0,0002
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 33,29 + 0,6716^{**}x$	0,99	0,0001
	K solúvel em água	$\hat{y} = 20,42 + 0,6112^{**}x$	0,99	0,0001
PVe	K trocável	$\hat{y} = 241,35 + 1,2147^{**}x$	0,99	0,0000
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 107,40 + 0,5442^{**}x$	0,99	0,0001
	K solúvel em água	$\hat{y} = 53,19 + 0,4776^{**}x$	0,98	0,0005
PVA	K trocável	$\hat{y} = 95,95 + 1,2386^{**}x$	0,99	0,0001
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 61,41 + 0,6861^{**}x$	0,97	0,0011
	K solúvel em água	$\hat{y} = 33,78 + 0,5780^{**}x$	0,99	0,0003
LA	K trocável	$\hat{y} = 96,50 + 1,1252^{**}x$	0,97	0,0007
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 54,42 + 0,6586^{**}x$	0,98	0,0007
	K solúvel em água	$\hat{y} = 41,22 + 0,6044^{**}x$	0,98	0,0004
PVD	K trocável	$\hat{y} = 105,55 + 1,0218^{**}x$	0,95	0,0019
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 55,49 + 0,5901^{**}x$	0,98	0,0006
	K solúvel em água	$\hat{y} = 32,74 + 0,5439^{**}x$	0,99	0,0000

⁽¹⁾PA = Argissolo Amarelo; PAC = Argissolo acizentado; PVe = Argissolo Vermelho eutrófico; PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo; LA = Latossolo Amarelo; PVD = Argissolo Vermelho distrófico. ⁽²⁾O K não-trocável foi calculado subtraindo-se do K extraído com ácido nítrico 1 mol L^{-1} fervente o K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7 (Helmke; Sparks, 1996). O K trocável foi extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0, adotando-se a relação solo:solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos (Helmke; Sparks, 1996). O K solúvel foi extraído com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ou com água destilada, na relação solo:solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos, ** = significativo a 1% de probabilidade pelo teste t

Nos solos mais argilosos e com maior predominância de argila silicatada do tipo 2:1 e de mica, grande parte do K aplicado a esses solos (83% no SX, 47% no RY e 36% no VX) foi fixada, passando para formas não trocáveis de K (Tabela 6).

O solo SX, com apenas 19% de argila, fixou 83% da dose de K adicionada, ao passo que o solo VX, com 43% de argila, fixou apenas 36% da dose de K adicionada (Tabela 6), demonstrando a grande importância da mineralogia da fração argila para explicar as quantidades de K fixadas nos solos. Ambos os solos apresentam argila silicatada do tipo 2:1 como mineral predominante na fração argila, mas o solo SX apresenta maior proporção de mica em relação ao solo VX (Tabela 2), o que pode explicar a menor taxa de recuperação de K trocável observada no solo SX, em relação ao solo VX (Tabela 6).

Dentro do grupo de solos mais desenvolvidos, a taxa de recuperação de K solúvel em CaCl_2 e em água não variou muito entre solos, com média de 63% para o extrator CaCl_2 e 56% para o extrator água destilada (Tabela 5), indicando que mais da metade do K adicionado a esses solos permanece livre na solução do solo, podendo ser facilmente absorvido

pela planta ou perdido por lixiviação. Por outro lado, no grupo de solos menos desenvolvidos, a taxa de recuperação de K solúvel extraído com CaCl_2 variou de 5,8 (SX) a 112% (RR) e a taxa de recuperação de K solúvel extraído com água destilada variou de 4,7 (SX) a 74,5% (RR) (Tabela 6).

De acordo com a análise de correlação considerando-se os doze solos como um só grupo verifica-se que as declividades ΔK trocável/ ΔK aplicadas se correlacionaram negativamente com as características do solo (K_i , CTC, CTC efetiva e teor de silte) que direta ou indiretamente estão relacionadas com o grau de desenvolvimento e com a mineralogia dos solos, evidenciando que a fixação de K no solo foi maior naqueles menos desenvolvidos (Tabela 7).

Os menores valores de taxas de recuperação de K solúvel foram verificados nos solos SX e VX e o maior valor no solo RR. Os valores dos coeficientes de correlação (Tabela 7) entre as taxas de recuperação de K solúvel e as características químicas e físicas dos solos indicam que a taxa de recuperação de K solúvel dos solos pelos extratores CaCl_2 e água destilada é diretamente proporcional ao grau de desenvolvimento desses solos.

Tabela 6 - Equações de regressão linear simples que estimam os teores de potássio (K) (\hat{y} , em mg dm^{-3}) trocável e K solúvel em cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e em água, em solos menos desenvolvidos do Estado da Paraíba, como variável dependente de doses de K (x , em mg dm^{-3}) aplicadas aos solos

Solo ⁽¹⁾	Forma de K ⁽²⁾	Equação	R ²	p
RR	K trocável	$\hat{y} = 86,02 + 1,0525^{**}x$	0,97	0,0010
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 34,36 + 1,1162^{**}x$	0,98	0,0006
	K solúvel em água	$\hat{y} = 31,74 + 0,7448^{**}x$	0,99	0,0004
RL	K trocável	$\hat{y} = 116,84 + 0,8863^{**}x$	0,97	0,0007
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 32,00 + 0,7282^{**}x$	0,96	0,0020
	K solúvel em água	$\hat{y} = 17,78 + 0,4193^{**}x$	0,99	0,0003
TX	K trocável	$\hat{y} = 385,62 + 1,0845^{**}x$	0,98	0,0006
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 162,29 + 0,4796^{**}x$	0,98	0,0004
	K solúvel em água	$\hat{y} = 62,95 + 0,5267^{**}x$	0,99	0,0001
SX	K trocável	$\hat{y} = 97,40 + 0,1727^{**}x$	0,97	0,0012
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 36,78 + 0,0578^{**}x$	0,90	0,0067
	K solúvel em água	$\hat{y} = 16,60 + 0,0471^{**}x$	0,95	0,0019
RY	K trocável	$\hat{y} = 296,97 + 0,5281^{**}x$	0,96	0,0014
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 110,35 + 0,5120^{**}x$	0,98	0,0004
	K solúvel em água	$\hat{y} = 51,17 + 0,2055^{**}x$	0,98	0,0001
VX	K trocável	$\hat{y} = 649,38 + 0,6393^{**}x$	0,98	0,0004
	K solúvel em CaCl_2	$\hat{y} = 81,08 + 0,1673^{**}x$	0,99	0,0003
	K solúvel em água	$\hat{y} = 17,14 + 0,0493^{**}x$	0,93	0,0051

⁽¹⁾RR = Neossolo Regolítico; RL = Neossolo Litólico; TX = Luvisolo Háplico; SX = Planossolo Háplico; RY = Neossolo Flúvico; VX = Vertissolo Háplico. ⁽²⁾O K não-trocável foi calculado subtraindo-se do K extraído com ácido nítrico 1 mol L^{-1} fervente o K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7 (Helmke; Sparks, 1996). O K trocável foi extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0, adotando-se a relação solo: solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos (Helmke; Sparks, 1996). O K solúvel foi extraído com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ou com água destilada, na relação solo: solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos, ** = significativo a 1% de probabilidade pelo teste t

Tabela 7 - Coeficientes de correlação linear simples entre as declividades das equações de regressão linear simples que estimam os teores de potássio (K) trocável e K solúvel em cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e em água, como variável dependente de doses de K aplicadas, e características químicas e físicas dos solos mais e menos desenvolvidos do Estado da Paraíba

Característica	ΔK trocável/ ΔK aplicado	ΔK solúvel/ ΔK aplicado	
		CaCl_2	Água
Solos mais desenvolvidos (n = 6)			
CTC	0,41 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-0,57 ^{ns}
CTC efetiva	0,49 ^{ns}	-0,68*	-0,81*
Silte	0,49 ^{ns}	-0,73*	-0,90**
Silte/argila	0,58 ^{ns}	-0,71*	-0,88*
Ki	0,42 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,10 ^{ns}
Argila	-0,17 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
Solos menos desenvolvidos (n = 6)			
CTC	-0,45 ^{ns}	-0,76*	-0,77*
CTC efetiva	-0,46 ^{ns}	-0,74*	-0,77*
Silte	-0,41 ^{ns}	-0,58 ^{ns}	-0,69*
Silte/argila	0,55 ^{ns}	0,92**	0,82*
Ki	-0,65 ^{ns}	-0,97**	-0,89*
Argila	-0,45 ^{ns}	-0,75*	-0,79*
Todos os solos (n = 12)			
CTC	-0,59*	-0,74**	-0,82**
CTC efetiva	-0,62*	-0,73**	-0,83**
Silte	-0,50*	-0,56*	-0,74**
Silte/argila	-0,15 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Ki	-0,77**	-0,76**	-0,87**
Argila	-0,18 ^{ns}	-0,59*	-0,44 ^{ns}

*, ** e ^{ns} significativo a 5%, 1% e não-significativo, respectivamente.

CONCLUSÕES

- Os solos formados sob clima semiárido, como o Argissolo Vermelho eutrófico e os solos menos desenvolvidos, foram os solos que apresentaram as maiores reservas de K não-trocável;
- Solos com maior proporção de mica e minerais do tipo 2:1 na fração argila apresentaram os maiores teores de K não-trocável e K trocável;
- Independente do grupo de solos, os teores de silte apresentaram correlação elevada com os teores de K não-trocável e de K trocável;
- Em solos menos desenvolvidos, a relação entre o K solúvel em água e o K trocável foi muito pequena, principalmente, nos solos mais argilosos;

5. Nos solos mais desenvolvidos, não foi evidenciada fixação de K proveniente do fertilizante. Porém, nos solos menos desenvolvidos, a fixação de K ficou evidenciada pela pequena quantidade de K recuperada pelo extrator acetato de amônio nos solos mais argilosos e, principalmente, naqueles com predominância de minerais do tipo 2:1 e mica.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V. H. *et al.* Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- BRASIL. I. **Levantamento exploratório de solos do estado da Paraíba**. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do estado da Paraíba. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

- CABBAU, A. R. *et al.* Resposta e níveis críticos de potássio para o arroz cultivado em solos de várzea inundados. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 1, p. 75-86, 2004.
- CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 977-982, 2002.
- DONAGEMA, G. K. *et al.* (Org.) **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Documentos / Embrapa Solos; 132).
- EMPRESABRASILEIRADE PESQUISAAGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2006. 306 p.
- FRAGA, T. I. *et al.* Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 497-506, 2009.
- HELMKE, P. A.; SPARKS, D. L. Lithium, sodium, rubidium and cesium. In: SPARKS, D. L. *et al.* **Methods of soil analysis**. Part 3. Chemical methods. Madison: SSSA/ASA, 1996. p. 551-574 (Book Series, 5).
- KAMINSKI, J. *et al.* Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1003-1010, 2007.
- KAMINSKI, J. *et al.* Potassium availability in a Hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 783-791, 2010.
- MEDEIROS, J. S. *et al.* Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do Estado da Paraíba com graus de desenvolvimento pedogenético diferentes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 183-194, 2010.
- MELO, V. F. *et al.* Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 807-819, 2003.
- MELO, V. F. *et al.* Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. **Química e Mineralogia do Solo**. Parte I: conceitos básicos. Viçosa: SBCS, 2009. p. 251-332.
- OLIVEIRA, F. H. T. *et al.* Banco de Solos Representativos do Estado da Paraíba. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359p.
- SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, 2007.
- SILVA, I. R. *et al.* Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 2065-2073, 2000.
- SILVA, V.A. *et al.* Kinetics of K release from soils of Brazilian coffee regions: effect to ganic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 533-540, 2008.
- VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 649-658, 2004.
- WERLE, R.; GARCIA, A. R.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.