

Capacidade de suprimento de potássio em solos de Minas Gerais-Brasil

Potassium supplying capacity of soils from Minas Gerais-Brazil
Capacidad de aportación de potasio en suelos de Minas Gerais, Brasil

AUTHORS

Faria A.F.¹

Alvarez V. V.H.¹

Mattiello E.M.^{®1}
mattiello@ufv.br

Lima Neves J.C.¹

Felix de Barros N.¹

Nogueira de Paiva H.¹

[®] Corresponding Author

¹ Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa-UFV. CEP 36570-000. Viçosa-MG. Brasil.

Received: 05.10.2011 | Revised: 08.02.2012 | Accepted: 13.02.2012

RESUMO

O potássio está presente em diferentes formas no solo, diferindo na acessibilidade para as plantas e com reversibilidade entre essas formas. A capacidade dos solos no suprimento de K para as plantas é diferenciada e determinante na sustentabilidade da produção agrícola e no manejo da fertilização com este nutriente. Assim, neste trabalho objetivou-se avaliar a capacidade de suprimento de K por solos do Estado de Minas Gerais (Brasil) de diferentes mineralogias, em cultivo sucessivo de milho. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, num esquema fatorial 7 x 6 (sete solos e seis doses de K), sendo as unidades experimentais distribuídas em blocos casualizados, com quatro repetições, por sete cultivos sucessivos. As plantas eram colhidas após 45 d para cada cultivo. A disponibilidade de K para as plantas foi avaliada no início e no intervalo de cada cultivo, usando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3. Verificou-se expressiva redução dos teores de K no solo, comprometendo a produção de matéria seca do milho em todos os solos estudados. A reserva de K foi maior nos Argissolos, seguido dos Cambissolos e Latossolos. Houve participação de formas não trocáveis de K na nutrição do milho. A disponibilidade de K no solo avaliada pelo extrator Mehlich-1 representou 40% do K absorvido pelas plantas e, 61% do K absorvido quando utilizou-se o extrator Mehlich-3.

ABSTRACT

Potassium is present in distinct forms in the soil. The K forms in the soil are characterized by reversible exchanges between compartments and they have different characteristics in regards to availability for plant uptake. The soil's capacity to supply or restrict K to plants is different for each soil and it determines the sustainability of agricultural production and fertilization management. Thus, the goal of this study was to evaluate the K supplying capacity of soils of different mineralogies from Minas Gerais (Brazil), under successive corn cultivation. A greenhouse experiment was carried out in factorial 7 x 6 (seven soils and six rates of K), in a randomized complete block design, with four replications. The corn plants were cultivated during 45 days for seven successive crop cycles in pots. The potassium availability in the soil was evaluated at the beginning and at the end of each crop cycle using Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors. All treatments showed significant decreases in soil K content, which affected corn dry matter accumulation. The reserve of K was highest in Ultisols followed by Inceptisols and Oxisols. Contribution of non-exchangeable potassium to the plant nutrition was observed. The K availability in soil measured by Mehlich-1 represented 40% of K uptake by plants, and 61% of K uptake when Mehlich-3 was used.

DOI: 10.3232/SJSS.2012.V2.N1.02

RESUMEN

El potasio está presente en diferentes formas en el suelo, con distinta accesibilidad para las plantas pero con reversibilidad entre ellas. La capacidad de los suelos en la aportación de K para las plantas es diferente y determinante en la sustentabilidad de la producción agrícola y en el manejo de la fertilización con este nutriente. El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de aportación de K de suelos del Estado de Minas Gerais (Brasil), con diferente mineralogía, en cultivos sucesivos de maíz. El experimento, con un esquema factorial 7 × 6 (siete suelos y seis dosis de K), fue llevado a cabo en invernadero en bloques al azar, con cuatro repeticiones, durante siete cultivos sucesivos. En cada cultivo las plantas fueron cosechadas a los 45 días de su emergencia. La disponibilidad de K para las plantas fue determinada al inicio y entre cada cultivo con los extractores Mehlich-1 y Mehlich-3. Se verificó una expresiva reducción de las concentraciones de K en los suelos, comprometiendo la producción de materia seca de las plantas de maíz en todos los suelos estudiados. La reserva de K fue mayor en los Ultisoles, seguidos de los Inceptisoles y de los Oxisoles. Se observó la participación de formas no intercambiables de K en la nutrición de maíz. La disponibilidad de K del suelo determinada con el extractor Mehlich-1 representó el 40% del K absorbido por las plantas y el 61% del K absorbido cuando se utilizó el extractor Mehlich-3.

PALAVRAS-CHAVE

Disponibilidade de potássio, depleção de potássio, milho

KEY WORDS

Potassium availability, potassium depletion, corn

PALABRAS CLAVE

Disponibilidad de potasio, reducción de la concentración de potasio, maíz

1. Introdução

O K está presente no solo nas formas estrutural, não trocável, trocável e em solução, diferindo na acessibilidade para as plantas e com reversibilidade entre essas formas (Syers 2003). As formas de K em solução e trocável são consideradas prontamente disponíveis às plantas e, as demais formas, constituem a reserva de K dos solos. Essa reserva está associada, principalmente, à presença de minerais primários como as micas biotita, muscovita e glauconita, o ortoclásio e o microclínio, (K estrutural) e, de minerais secundários, do tipo 2:1, com alta densidade de carga negativa, (K não trocável) (Song e Huang 1988; Huang 2005). O intemperismo promove a liberação dos nutrientes para a solução do solo, por meio dos seus processos, ocorrendo ao longo do tempo a liberação gradual do K estrutural para formas disponíveis às plantas.

Em regiões tropicais, com predomínio de solos intemperizados (Latosolos e Argissolos), a reserva de K é normalmente muito baixa. A reserva de K limita-se a presença de muscovita na fração grosseira de alguns Latossolos ou associada à argilominerais 2:1 com polímeros de hidróxi-Al nas entrecamadas e em minerais interestratificados como caulinita-vermiculita ou caulinita-esmectita, nas frações argila e silte (Silva et al. 1995). Os Argissolos apresentam normalmente maiores teores de K, principalmente aqueles oriundos de rochas pelíticas, granitos, gnaisse e migmatitos (Meurer et al. 1996).

A avaliação da capacidade dos solos fornecerem K para as plantas tem sido feita em ensaios de média a longa duração (Andersson et al. 2007; Simonsson et al. 2009; Andrist-Rangel et al. 2010; Öborn et al. 2010). Alternativamente, tem sido usada a técnica de cultivos sucessivos em vasos, simulando o que ocorre quando o solo é cultivado intensamente. Esses ensaios permitem avaliar a contribuição das diferentes formas de K na nutrição das plantas e a capacidade de suprimento de K pelo solo ao longo dos cultivos.

Se por um lado alguns solos apresentam boa reserva de K, mantendo teores adequados do nutriente na solução do solo e, portanto, a produtividade das culturas (Andersson et al. 2007), outros solos, intemperizados ou de textura arenosa, apresentam limitada reserva de K, necessitando de fertilização constante com o nutriente. Esses solos, especialmente em regiões tropicais, apresentam rápida depleção dos teores de K com os cultivos. Lana e Neves (1994) avaliaram a exaustão do K do solo por meio de cultivos sucessivos com eucalipto, em seis solos, e observaram maior produção de matéria seca e maior absorção de K nos primeiros cultivos, refletindo a contribuição da reserva imediata de K para as plantas, representada pelo K trocável. Os autores verificaram que a contribuição de formas não trocáveis, na produção de matéria seca e na quantidade de K absorvido nos últimos cultivos, pareceu ter sido a principal fonte de K.

Como o K não trocável pode ser uma fonte disponível para as plantas ao longo de seu ciclo de vida, verifica-se a necessidade de conhecer melhor a cinética de liberação desta forma de K para a solução do solo, que depende principalmente de fatores relacionados com a mineralogia do solo e a sua proporção em cada fração granulométrica (Bortoluzzi et al. 2005).

A capacidade de suprimento de K dos solos é importante para determinar a sustentabilidade da produção vegetal e, nesse contexto, a quantificação das formas disponíveis de K a curto e longo prazo torna-se necessária para o manejo e fertilização do solo.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar a capacidade de suprimento de K por solos do Estado de Minas Gerais de diferentes mineralogias.

2. Material e Métodos

Plantas de milho foram cultivadas em casa de vegetação, em vasos plástico contendo 4,5 dm³ de solos coletados no Estado de Minas Gerais (**Quadro 1**). As amostras dos solos foram coletadas da camada superficial 0-20 cm, secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 4 mm para os cultivos e em malha de 2 mm para a caracterização física, química e mineralógica (**Quadro 2**). Nos solos, foi realizada a calagem de acordo com o método da neutralização do Al³⁺ e da elevação dos teores de

Ca²⁺ + Mg²⁺ (Alvarez V. et al. 1999). A calagem foi feita em todo o volume de solo, individualmente para cada unidade experimental, sendo o período de incubação de 35 d, com umidade mantida à capacidade de campo.

Os tratamentos, fatorial 7 x 6, sendo sete solos do Estado de Minas Gerais e seis doses de K (0, 50; 100; 200; 300; e 500 mg dm⁻³ de K), foram distribuídos em blocos casualizados, com quatro repetições.

Quadro 1. Classificação dos solos de Minas Gerais-MG, Brasil

Classificação Americana	Classificação Brasileira	Município-MG
Oxisol udox distric	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd ₁) ¹	Santa Bárbara
Oxisol udox distric	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd ₂)	Viçosa
Oxisol udox distric	Latossolo Vermelho distrófico (LVd)	Santa Bárbara
Inceptisol Ochrept distric	Cambissolo Háplico TB distrófico (CXtb ₁)	Santa Bárbara
Inceptisol Ochrept distric	Cambissolo Háplico TB distrófico (CXtb ₂)	Santa Bárbara
Ultisols Udalfs	Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe ₁)	Uberlândia
Ultisols Udalfs	Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico Chernossólico (PVAe ₂)	Uberlândia

¹Símbolo conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA 2006).

Quadro 2. Características mineralógicas, físicas e químicas das amostras da camada superficial (0-20 cm) dos solos de Minas Gerais-MG, Brasil

Símbolo	Mineralogia ⁽¹⁾		Argila ⁽²⁾	Areia ⁽²⁾	CTC ⁽³⁾	K total	K ⁽⁴⁾
	silte	argila					
			-----%-----		cmolc dm ⁻³	-----mg dm ⁻³ -----	
LVAd ₁	Mi, Ct e Gb	Ct e Gb	51	42	8,6	2352	50,0
LVAd ₂	Qz, Ct, Gt e Gb	Ct, Gt e Gb	70	23	9,8	37	9,0
LVd	Ct e Gb	Ct e Gb	34	62	8,1	82	11,0
CXtb ₁	Ct e Gb	Ct e Gb	34	56	7,5	1912	66,0
CXtb ₂	Qz, Ct e Gb	Ct e Gb	55	36	15,5	504	49,0
PVAe ₁	Qz, Mi	Mi e Ct	35	54	9,1	13 377	140,0
PVAe ₂	Mi, Ct	Ct e Es	25	62	20,7	3 986	133,0

⁽¹⁾Difratogramas de raios-X: Mi: mica; Ct: caulinita; Gb: Gibbsita; Qz: quartzo; Gt: Goethita; Es: Esmeclita; ⁽²⁾Ruiz 2005; ⁽³⁾CTC a pH 7,0 extrator Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾Extrator Mehlich-1.

Juntamente com o corretivo CaCO_3 e MgCO_3 (relação molar de 4:1), aplicaram-se, apenas antes do primeiro cultivo, as doses de K na forma de KCl em solução. Ao final deste período, foram coletadas subamostras de $0,5 \text{ dm}^3$ para determinação dos teores das formas de K.

No plantio de cada cultivo foi feita a adubação com P e S, de acordo com o P remanescente de cada solo (Alvarez V. et al. 2000), sendo a fonte de P o fosfato monocálcico e a de S o sulfato de cálcio e de magnésio. Também foi aplicada a dose de 100 mg dm^{-3} de N, sendo a fonte o fosfato monoamônico. Em seguida, foi feito o semeio do milho, mantendo-se quatro plantas por vaso. Foram aplicados semanalmente 50 mg dm^{-3} de N, na forma de uréia e, para os micronutrientes, foram realizadas quatro aplicações, totalizando 0,81; 1,33; 1,55; 3,66; 0,15 e 4 mg dm^{-3} respectivamente para o B (H_3BO_3), Cu ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Fe ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Mn ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Mo ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e Zn (ZnCl_2). Foram realizados sete cultivos sucessivos, em diferentes estações do ano.

Em cada cultivo, a parte aérea das plantas era colhida aos 45 d após a emergência, cortando-se a $0,5 \text{ cm}$ do solo e postas para secar em estufa de circulação forçada de ar a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h. As plantas foram pesadas, trituradas em moinho tipo Wiley e mineralizadas por digestão nítrico-perclórica (3:1 v/v). Nos extratos foram determinados os teores de K por espectrofotometria de emissão em chama.

Após a colheita das plantas de cada cultivo, o solo foi separado das raízes e amostrado para análise de K. As raízes foram picotadas e misturadas ao restante do solo para dar-se início ao próximo cultivo. A determinação do K foi feita usando o extrator Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) e a dosagem por espectrofotometria de emissão em fotômetro em chama.

A contribuição da fração do K não disponível na nutrição da planta foi estimada pela seguinte fórmula:

$$CK_{nd} = 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^7 AK_i - (QK_1 - QK_7)}{\sum_{i=1}^7 AK_i} \right]$$

Onde:

CK_{nd} = contribuição do K não disponível pelo método (%).

AK_i = acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho no cultivo i (mg/vaso).

QK_1 = conteúdo de K disponível (M1 ou M3) nas amostras superficiais dos solos coletadas depois da incubação e antes do primeiro cultivo, no volume de $4,0 \text{ dm}^3$ (mg/vaso).

QK_7 = conteúdo de K disponível (M1 ou M3) nas amostras superficiais dos solos coletadas antes do sétimo cultivo no volume de $3,24 \text{ dm}^3$ (mg/vaso).

Os dados foram submetidos à análise de variância, comparando as doses de K, dentro de cada solo, por regressão. Os cultivos foram analisados de forma independente, considerando-se a produção de matéria seca, o conteúdo de K acumulado e o teor do nutriente nos solos ao longo dos cultivos.

3. Resultados

Produção de matéria seca e acúmulo de K

A aplicação do K antes do primeiro cultivo do milho propiciou resposta na produção de matéria seca da parte aérea das plantas nos solos estudados, exceto para o PVAe_1 (Quadro 3), por apresentar originalmente teor mais elevado de K (Quadro 2). Os ajustes dos dados experimentais aos modelos permitiram simular o valor de “máxima eficiência econômica” ($0,9 \hat{y}$ máximo) para produção de matéria seca e da respectiva dose recomendada de K para cada solo (Quadro 3). No primeiro cultivo, as plantas crescidas no PVAe_1 apresentaram resposta nula à aplicação de K, enquanto que aquelas crescidas no LVAd_1 apresentaram a maior resposta no crescimento (Quadro 3).

Considerando as equações ajustadas para a produção de matéria seca no primeiro cultivo, na dose 0 mg dm^{-3} de K, o LVAd_2 apresentou a menor produção, $3,0 \text{ g/vaso}$, e o PVAe_1 obteve a maior, $20,2 \text{ g/vaso}$. Já a dose recomendada para atingir $0,9 \hat{y}$ máximo variou de 0,0 a $218,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de K para os solos PVAe_1 e LVd , re-

spectivamente (Quadro 3). Na dose zero de K, o PV Ae₁ proporcionou a maior produção de matéria seca acumulada nos sete cultivos de milho, 95,3 g/vaso, e o LVd, a menor, 20,9 g/vaso, seguindo do LV Ad₂, 30,5 g/vaso (Quadro 3).

Os cultivos sucessivos do milho, sem reposição de K, elevaram a demanda de K pela planta (Quadro 3). No acumulado dos cultivos, a produção de matéria seca correspondente a máxima eficiência econômica foi de 79,0 g/vaso para o LVd e de 418,8 g/vaso para PV Ae₁. Para a obtenção da máxima eficiência econômica no PV Ae₁, a dose recomendada (DR) de K aumentou de 0, no primeiro cultivo, para 467 mg dm⁻³ de K, no acumulado dos cultivos. Os Latossolos, mais pobres em K, apresentaram DR elevada já no primeiro cultivo e a não reposição do K afetou grandemente a produção de matéria seca (Quadro 3).

A produção de matéria seca do milho (média para as doses de K) foi drasticamente reduzida entre o primeiro e o sétimo cultivo (Figura 1), embora para os Argissolos e o CXtb₂ observou-se elevação da produção no segundo cultivo, decorrente do período mais favorável de variáveis climáticas como temperatura, luminosidade e umidade relativa e pelo efeito residual do K da adubação no primeiro cultivo. A partir do segundo cultivo, o decréscimo na produção de matéria seca foi acentuado, conseqüência do esgotamento do K do solo. Para os Argissolos, por apresentarem maiores teores disponíveis de K, o decréscimo foi menor quando comparados aos Latossolos (Figura 1). Em média, a redução na produção de matéria seca do primeiro ao sétimo cultivo do milho foi de 94 % para o LV Ad₂ e o CXtb₁, 93% para o LV Ad₁, 88% para PV Ae₂, 83% para o PV Ae₁ e de 66% para o CXtb₂.

Quadro 3. Equações de produção de matéria seca de plantas de milho (\hat{y} , g/vaso), em função das doses de K adicionadas (x , mg dm⁻³) nos solos de Minas Gerais, 90 % da produção máxima (0,9 \hat{y} máx) e doses recomendáveis (DR) para as amostras superficiais coletadas no primeiro cultivo e para as produções acumuladas do cultivo um ao sete

Solo	Equação de regressão	R ²	0,9 \hat{y} máx	DR
	1° cultivo		g/vaso	mg dm ⁻³
LV Ad ₁	$\hat{y} = 9,9 + 1,224^{**} x^{0,5} - 0,0254^{ns} x$	0,906	22,2	203
LV Ad ₂	$\hat{y} = 3,0 + 1,447^{**} x^{0,5} - 0,0328^{\Delta} x$	0,982	14,5	209
LVd	$\hat{y} = 5,8 + 0,8492^{**} x^{0,5} - 0,0174^{ns} x$	0,925	14,6	218
CXtb ₁	$\hat{y} = 13,3 + 0,0344^{\Delta} x - 0,0328^{\Delta} x^2$	0,873	15,8	87
CXtb ₂	$\hat{y} = 8,8 + 0,5340^{\Delta} x^{0,5} - 0,0112^{ns} x$	0,607	13,7	149
PV Ae ₁	$\hat{y} = \bar{y} = 20,2$	-	20,2	0
PV Ae ₂	$\hat{y} = 17,1 + 0,7977^{\Delta} x^{0,5} - 0,0358^{ns} x$	0,999	19,4	11
	Acumulado do 1° ao 7° cultivo			
LV Ad ₁	$\hat{y} = 36,8 + 1,998^{**} x^{0,5} + 0,0355^{\Delta} x$	0,999	89,3 ⁽¹⁾	381
LV Ad ₂	$\hat{y} = 30,5 + 0,2328^{**} x - 0,0002^{**} x^2$	0,985	88,4	360
LVd	$\hat{y} = 20,9 + 3,299^{**} x^{0,5} - 0,0137^{ns} x$	0,965	79,0 ⁽¹⁾	360
CXtb ₁	$\hat{y} = 40,0 + 1,130^{\Delta} x^{0,5} + 0,0489^{\Delta} x$	0,979	80,7 ⁽¹⁾	382
CXtb ₂	$\hat{y} = 53,4 + 3,174^{**} x^{0,5} - 0,0297^{ns} x$	0,962	98,6 ⁽¹⁾	286
PV Ae ₁	$\hat{y} = 95,3 + 0,7401^{**} x$	0,976	418,8 ⁽¹⁾	467
PV Ae ₂	$\hat{y} = 75,7 + 0,1342^{**} x$	0,984	128,5 ⁽¹⁾	394

^{ns}, ^Δ, ^{*}, ^{**}, não significativo e significativo a 25, 10, 5, 1%, respectivamente; ⁽¹⁾90% da produção estimada com a maior dose de K (0,9 \hat{y} máx).

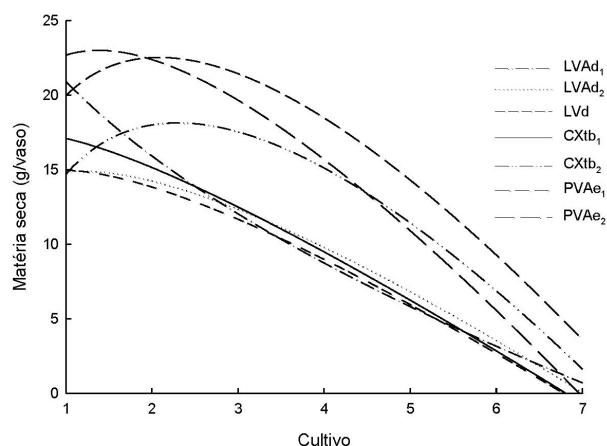


Figura 1. Produção média (para as doses de K) de matéria seca do milho, de acordo com os cultivos sucessivos nos solos de Minas Gerais (Brasil).

Avaliando o conteúdo total de K na parte aérea do milho, nos sete cultivos sucessivos, observam-se incrementos lineares com a aplicação do K em todos os solos (Figura 2). Também, pode-se verificar a capacidade diferenciada dos solos no suprimento de K para as plantas, sendo os Argissolos os mais eficientes, os Cambissolos intermediários e os Latossolos, os menos eficientes.

Nos sete cultivos, sem aplicação do K, o LVd foi o solo que apresentou menor acúmulo do nutriente na matéria seca de parte aérea (140,5 mg/vaso de K), seguido do LVAd₂ (145,3 mg/vaso de K). Já o PVAe₁ apresentou 1 060 mg/vaso de K, na dose 0 do nutriente (Figura 2). A comparação dos solos em relação ao LVd, sem adubação K, mostra por exemplo que no PVAe₁, PVAe₂ e CXtb₂, o milho acumulou 6,5; 4,9 e 1,6 vezes mais K na parte aérea, respectivamente. A maior reserva de K nos Argissolos, seguidos dos Cambissolos propiciou maior suprimento de K para as plantas ao longo dos cultivos quando comparado aos Latossolos.

Por outro lado, quando se avalia o efeito da aplicação de K, verifica-se que entre a dose 0 e a dose 500 mg dm⁻³ de K, doses de menor e maior acúmulo, respectivamente, houve aumento no conteúdo de K de 1 490% para o LVd, de 1 270% para o LVAd₂, de 700% para o

LVAd₁ e, de 161% para o PVAe₁ (Figura 2). As plantas cultivadas nos solos de maior reserva de K, como os Argissolos, apresentaram maior produção de matéria seca (Figura 1) e acúmulo de K, mesmo nas doses baixas de K, incluindo a dose zero e por essa razão a resposta à adubação com K foi menos expressiva nesses solos, comparado aos Latossolos. Com a elevação das doses de K, as diferenças no acúmulo de K na parte aérea das plantas devido aos solos são reduzidas, chegando ao máximo de 34% entre o solo PVAe₂ e o CXtb (Figura 2).

Teores de K no solo

Os solos utilizados apresentavam diferenças mineralógicas, texturais e em seus teores de K total e disponível (Quadro 2). Entre os Latossolos, o LVAd₁ apresentou mica na fração silte, justificando o maior teor de K disponível. O LVAd₂ e o LVd são constituídos principalmente de caulinita e gibbsita e apresentaram baixos teores de K. Os Cambissolos CXtb₁ e CXtb₂ apresentaram nas frações texturais caulinita e gibbsita, além de quartzo, e teores médios de K. Os Argissolos apresentaram minerais ricos em K, como mica e esmectita, tendo maior reserva desse nutriente, justificando os maiores teores de K entre os solos estudados (Quadro 2).

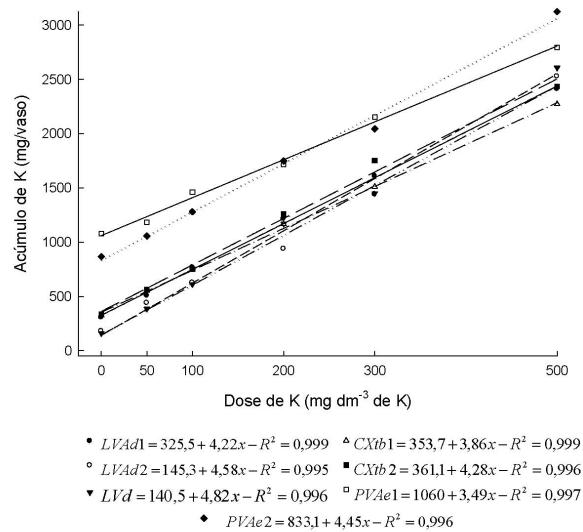


Figura 2. Acúmulo de K em sete cultivos sucessivos de milho, em função das doses de K em sete solos de Minas Gerais (Brasil).

As curvas (**Figura 3**) descrevem a redução dos teores de K disponível (M1 e M3), com o cultivo sucessivo do milho. Avaliando-se os teores de K nos solos LVAd₂, CXtb₁ e PVAe₁, nas doses 0; 200 e 500 mg dm⁻³ de K, verifica-se acentuada redução ao longo dos cultivos com milho. Em geral, os teores de K no solo extraídos por M1 foram menores que por M3, porém com tendências semelhantes.

Avaliando as condições de maior exaustão do K do solo, a partir do terceiro cultivo, para o solo pobre em K (LVAd₂), verifica-se que os teores do nutriente no solo ao final dos sete cultivos sucessivos foram menores nas doses 200 ou 500 mg dm⁻³ de K do que na dose zero de K (**Figura 3**, gráfico interno). Para o CXtb₁, que apresenta teores médios de K, os teores do nutriente ao final de sete cultivos foram semelhantes nos tratamento sem e com a aplicação de K. O solo PVAe₁, por apresentar maior reserva de K, manteve teores mais elevados nos tratamentos que receberam o K na adubação (**Figura 3**).

Os cultivos sucessivos do milho levaram a exaustão do K nos solos estudados e a participação de formas não trocáveis do nutriente na nutrição do milho como mostrado na dose 0 mg dm⁻³ de K (**Quadro 4**). Avaliando-se o acúmulo

de K nas plantas de milho e as quantidades do nutriente recuperadas pelos extratores M1 e M3, no volume de solo dos vasos, antes do primeiro e do sétimo cultivo, verifica-se que o K absorvido pelas plantas de milho até o sétimo cultivo, em todos os solos, foi maior que o teor de K recuperado no solo por esses extratores.

Os teores de K extraídos por M3 foram superiores ao M1, indicando maior capacidade de extração do primeiro. A contribuição das formas de K não disponíveis pelo método na nutrição do milho, nos sete cultivos, foi de até 97% e 64% utilizando-se os extratores M1 e M3, respectivamente. O LVAd₂, de menor fertilidade natural de K, foi o que apresentou maior contribuição das frações não trocáveis de K e o CXtb₁ e PVAe₁, com maiores reservas de K, os de menores contribuições de tais formas. Em média, a contribuição do K não extraído pelo método foi de 60 e 39%, considerando os extratores M1 e M3, respectivamente. Consequentemente, a disponibilidade de K no solo avaliada pelos extratores M1 representou 40% e M3 61% do K absorvido pelas plantas de milho (**Quadro 4**).

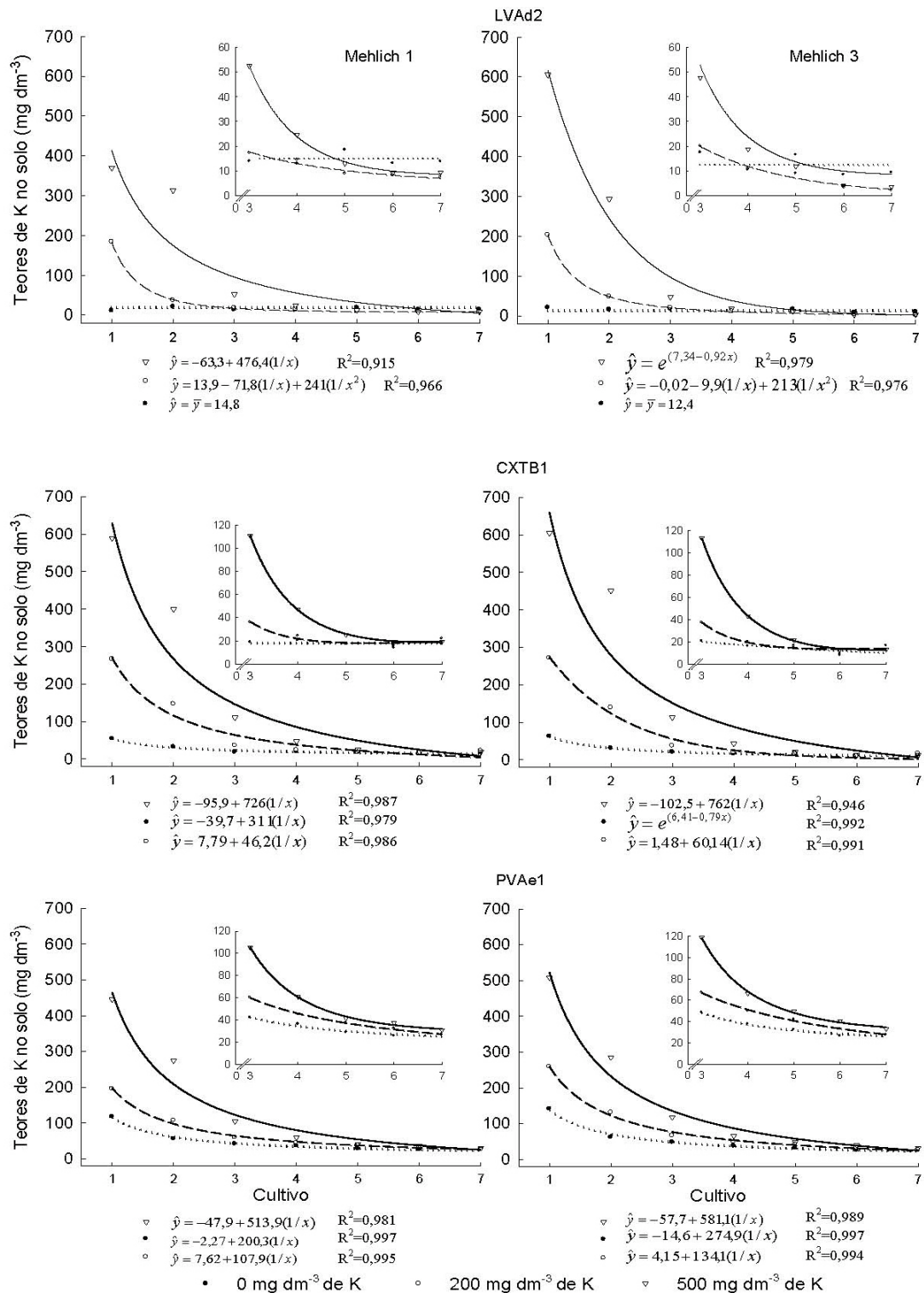


Figura 3. Teores de K no solo extraídos por M1 e M3, em sete cultivos sucessivos de milho, em função das doses de K. O gráfico interno destaca a variação dos teores de K a partir do terceiro cultivo.

Quadro 4. Acúmulo de K no milho, conteúdo de K no solo e contribuições das frações de K não disponível por M1 e M3, nas amostras superficiais de solos de Minas Gerais (Brasil), na dose zero de K

Solo	$\sum AK_i^{(1)}$	$QK_1^{(2)}$		$QK_7^{(3)}$		$CK_{nd}^{(4)}$	
		M1	M3	M1	M3	M1	M3
		-----mg/vaso-----				-----%-----	
LVA _{d1}	298,5	176,9	221,8	49,9	38,7	57,5	38,7
LVA _{d2}	175,3	49,9	92,8	44,4	30,1	96,9	64,2
LV _d	150,6	90,5	129,9	44,8	26,2	69,6	31,1
CX _{tb1}	320,7	244,3	279,7	55,4	41,1	41,0	25,5
CX _{tb2}	306,7	177,2	209,3	44,2	36,5	56,6	43,7
PVA _{e1}	1050,2	533,0	638,5	86,5	89,6	57,5	47,7
PVA _{e2}	851,4	565,6	722,3	63,7	62,5	41,1	22,5
Média	450,4	262,5	327,8	55,6	46,4	60,0	39,0

⁽¹⁾ $\sum AK_i$ = Acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho, nos sete cultivos; ⁽²⁾ QK_1 = conteúdo de K extraídos por M1 e M3 nas amostras superficiais dos sete solos coletadas antes do primeiro cultivo, no volume de 4,0 dm³; ⁽³⁾ QK_7 = conteúdo de K encontrado nas amostras superficiais dos sete solos coletadas antes do sétimo cultivo no volume de 3,24 dm³; ⁽⁴⁾ CK_{nd} = contribuição do K não extraído pelo método.

4. Discussão

A capacidade de suprimento de K deveu-se a reserva de K correspondente de cada solo, sendo maior nos Argissolos e muito menor nos Latossolos. A produção de matéria seca acumulada obtida na dose 0 mg dm⁻³ de K, no LVAd₂ (menor reserva de K), foi 32% da produção obtida no PVAe₁ (maior reserva de K) e mostra a limitação do K neste solo para o crescimento do milho e a necessidade da adubação para obtenção de produtividades satisfatórias em solos naturalmente pobres em K. Avaliando os interceptos dos modelos (Quadro 3, Figura 2), conclui-se que os Argissolos, PVAe₁ e PVAe₂, possuem maior capacidade de suprimento de K, seguido dos Cambissolos e, com limitada capacidade de suprimento de K, estão os Latossolos. Os resultados mostram que os cultivos sucessivos podem reduzir rapidamente os teores de K disponível de solos com boa disponibilidade de K (Quadro 2), como os Argissolos deste estudo, e estes passam a apresentar reposta linear positiva da produção em relação à aplicação do nutriente (Quadro 3).

A depleção do K do solo com o cultivo é demonstrada em diversos trabalhos (Andrist-Rangel et al. 2007; Bell et al. 2009; Öborn et al. 2010). Srinivasa et al. (1994) avaliaram a depleção e o ressurgimento de K do solo em cultivo intensivo com gramínea, em casa de vegetação, e relataram redução de 54% nos teores de K trocável e de 17,8% para o K não trocável. Mittal et al. (1990) observaram redução de 620 para 200 kg ha⁻¹ do K trocável do solo, em 12 meses de cultivo intensivo com milho, em solos do semi árido Indiano.

A absorção do nutriente pelo milho e a não reposição a cada cultivo fez com que os teores no solo se tornassem muito baixos, comprometendo o crescimento das plantas ao longo dos cultivos, mesmo nos solos com maiores reservas de K, como os Argissolos. As adubações com 200 e 500 mg dm⁻³ de K propiciaram incremento na produção de matéria seca acumulada ao longo dos cultivos de 138 e 223% no LVAd₂ (baixo K); de 71 e 128% no CX_{tb1} (médio K) e de 23 e 41% no PVAe₁ (bom K), respectivamente.

Os teores de K disponível (M1 e M3) após sete cultivos sucessivos de milho apresentaram pequena variação entre os solos ou mesmo entre doses do nutriente (Figura 3). Os resultados da Figura 3 sugerem que a adoção de sistemas de cultivo com adubação deficiente em K poderá levar ao empobrecimento ainda maior do solo se comparado a ausência de adubação com o nutriente, como verificado no LVA_{d_2} . Este fato é particularmente importante considerando que a maioria dos solos tropicais apresenta baixa fertilidade natural e necessidade de adubação com K para obtenção de produtividades satisfatórias. Assim, os sistemas de cultivo, principalmente os mais intensivos, devem garantir, pelo menos, a demanda de K das culturas para que não ocorra a exaustão excessiva das reservas de K do solo, comprometendo a sustentabilidade da produção agrícola.

A constatação da maior contribuição do K não extraído pelo método na nutrição das plantas, em média 60%, considerando o extrator M1 (Quadro 4), ressalta o fraco poder de extração do M1 para prever a disponibilidade de K em condições de médio a longo prazo. Mesmo nos solos, PVA_{e_1} e PVA_{e_2} , onde os teores de K disponíveis (M1) foram elevados antes do primeiro cultivo, houve grande contribuição do K não disponível, indicando que a fração disponível sozinha, não foi suficiente para a manutenção da nutrição potássica do milho ao longo dos cultivos. Diversos trabalhos demonstraram a contribuição da fração não trocável de K na nutrição das plantas (Lana e Neves 1994; Andrist-Rangel et al. 2007; Simonsson et al. 2007; Nilawonk et al. 2008; Kaminski et al. 2010; Öborn et al. 2010). Nilawonk et al. (2008) relatam contribuição da fração não trocável maior que 40% do K absorvido pelo milho em solos da Tailândia. No Brasil, Nachtigall e Vahl (1991) encontraram contribuição do K não trocável de até 84,6% na nutrição de plantas de milho e azevém, durante seis cultivos sucessivos em solos do Rio Grande do Sul. Martins et al. (2004), verificaram em plantas de trigo cultivadas durante 130 d em 10 solos do Estado do Paraná que a contribuição do K não trocável chegou a 54% em alguns solos.

O teor de K total do solo não é um bom indicador da disponibilidade do nutriente a curto ou em médio prazo, uma vez que este não está totalmente disponível para as plantas, em quantidade e no tempo do crescimento e desenvolvimento vegetal. Apenas uma pequena fração, correspondente ao K em solução e o trocável, é conceitualmente considerada a disponível para as plantas. Algumas formas de K não trocável poderão tornar-se disponíveis para as plantas ao longo de seu ciclo de vida, dada a elevada capacidade de absorção do K disponível, favorecendo o reequilíbrio das formas não trocáveis e trocáveis de K no solo. No entanto, esse reequilíbrio das formas de K no solo não foi suficiente para a manutenção do crescimento do milho nos solos estudados, havendo expressiva redução na produção matéria seca com os cultivos. Os resultados mostram que solos tropicais e intemperizados a absorção de K pelo milho ocorre em taxas superiores as da transformação das formas não trocáveis para formas trocáveis de K no solo.

5. Conclusões

Os solos estudados apresentam capacidade distinta no fornecimento de K para as plantas devido às diferenças mineralógicas, sendo maior nos Argissolos e muito menor nos Latossolos.

Ao longo dos cultivos sucessivos, as diferenças entre os solos nos teores disponíveis de K e no crescimento das plantas tendem a serem menores devido ao rápido esgotamento da reserva prontamente disponível de K.

Existe reversibilidade entre as formas de K nos solos estudados, porém insuficiente a demanda de K das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez V. VH, Novais RF, Barros NF, Cantarutti RB, Lopes AS. 1999. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez V. VH, editores. Recomendação para o uso de corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. 5th ed. Viçosa. p. 25-32.
- Alvarez V. VH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. Soc. Bras.Ci. Solo 52:27-32.
- Andersson S, Simonsson M, Mattsson L, Edwards AC, Öborn I. 2007. Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. Soil Use Manage. 23:10-19.
- Andrist-Rangel Y, Edwards AC, Hillier S, Öborn I. 2007. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. Agric. Ecosyst. Environ. 122:413-426.
- Andrist-Rangel Y, Hillier S, Öborn I, Lilly A, Towers W, Edwards AC, Paterson E. 2010. Assessing potassium reserves in northern temperate grassland soils: A perspective based on quantitative mineralogical analysis and aqua-regia extractable potassium. Geoderma 158:303-314.
- Bell MJ, Moody PW, Harch, GR, Compton, B, Want PS. 2009. Fate of potassium fertilisers applied to clay soils under rainfed grain cropping in south-east Queensland, Australia. Aust. J. Soil Res. 47:60-73.
- Bortoluzzi EC, Santos DR dos, Kaminski J, Gatiboni LC, Tessier D. 2005. Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. R. Bras. Ci. Solo 29:327-335.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro. 306 p.
- Huang PM. 2005. Chemistry of potassium in soils. In: Tabatabai MA, Sparks DL, Al-Amoodi L, Dick WA, editors. Chemical processes in soils. Madison: Soil Science Society of America Inc. p. 227-292.
- Kaminski J, Moterle DF, Rheinheimer DS, Gatiboni LC, Brunetto G. 2010. Potassium availability in a hapludalf soil under long term fertilization. R. Bras. Ci. Solo 34:783-791.
- Lana MC, Neves JCL. 1994. Capacidade de suprimento de potássio em solos sob reflorestamento com eucalipto do Estado de São Paulo. Revista Arvore 18:115-122.
- Martins R, Melo VF, Serrat BM. 2004. Métodos de determinação da disponibilidade de potássio para a cultura do trigo em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná. Revista Ceres 51:787-801.
- Meurer EJ, Kampf N, Anghinoni I. 1996. Fontes potenciais de potássio em alguns solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo 20:41-47.
- Mittal SB, Singh R, Mehta SC, Singh M. 1990. Potassium depletion under long-term fertilization in a semi-arid soil in India. J. Agri. Sci. 115:173-178.
- Nachtigall GR, Vahal LC. 1991. Dinâmica da liberação de potássio dos solos da Região Sul do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo 15:43-47.
- Nilawonk WA, Phonphoem T, Yost A, Shuai R. 2008. Potassium release in representative maize-producing soils of Thailand. Soil Sci. Soc. Am. J. 72:791-797.
- Öborn I, Edwards AC, Hillier S. 2010. Quantifying uptake rate of potassium from soil in a long-term grass rotation experiment. Plant Soil 335:3-19.
- Silva DN, Meurer EJ, Kampf N, Borkert CM. 1995. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. R. Bras. Ci. Solo 19:433-439.
- Simonsson M, Andersson S, Andrist-Rangel Y, Hillier S, Mattsson L, Öborn I. 2007. Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. Geoderma 140:188-198.
- Simonsson M, Hillier S, Öborn I. 2009. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. Geoderma 151:109-120.
- Song SK, Huang PM. 1988. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acid. Soil Sci. 52:383-390.
- Srinivasa Rao RC, Khera MS, Subba Rao A. 1994. Soil potassium depletion and K replenishment capacity of soils under intensive cropping. J. Potassium Res. 10:229-235.
- Syers JK. 2003. Potassium in soils: current concepts. In: Johnston AE, editor. Proceedings of the IPI Golden Jubilee Congress 1952-2002. Basel: International Potash Institute. p. 301-310.