

RESERVA MINERAL DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO CULTIVADO COM *Pinus taeda* L.⁽¹⁾

Michael Jonathan Fernandes Alves⁽²⁾, Vander de Freitas Melo⁽³⁾, Carlos Bruno Reissmann⁽³⁾ & Jéssica Fernandes Kaseker⁽²⁾

RESUMO

No Brasil, aproximadamente 1,87 milhões de hectares são plantados com as espécies de *Pinus*, normalmente em solos pobres quimicamente. Os objetivos deste trabalho foram estudar a mineralogia das frações areia, silte e argila e estimar a reserva mineral de K por diferentes métodos de extrações químicas em solo naturalmente pobre nesse nutriente e cultivado com *Pinus taeda* L., no Segundo Planalto Paranaense. Foram selecionadas cinco árvores com maior diâmetro (árvores dominantes), em uma área de 500 m², para abertura de uma trincheira (1,6 m) na projeção da copa de cada árvore. Todos os perfis foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico e apresentaram similaridade na morfologia e na sequência dos horizontes, cujas profundidades médias foram: O = 0,04 m, A1 = 0-0,09 m, A2 = 0,09-0,24 m, BA = 0,24-0,43 m, B1 = 0,43-0,66 m e B2 = 0,66-1,60⁺ m. As amostras coletadas em cada horizonte foram submetidas a análises físicas (granulometria) e químicas (pH, carbono orgânico, acidez potencial, Al³⁺ e bases trocáveis, P disponível, K total e não trocável), e as frações areia, silte e argila foram estudadas por difratometria de raios-X (DRX). As frações areia e silte dos solos apresentaram mineralogia bastante uniforme, com predomínio absoluto de quartzo e apenas ocorrência de discretas reflexões de mica por DRX. A fração argila também apresentou limitada ocorrência de minerais micáceos. Os tratamentos sequenciais para remoção de óxidos de Fe, gibbsita e caulinita foram eficientes para concentração de mica na fração argila, o que facilitou a identificação de biotita e muscovita por DRX. Os baixos teores de K não trocável obtidos com diferentes concentrações de HNO₃ fervente (máximo de 91 mg kg⁻¹) e de K total extraído com HF concentrado (máximo de 202,7 mg kg⁻¹) foram consistentes com a pobreza das frações do solo em minerais primários, fontes desse nutriente. As correlações positivas e significativas entre os teores não trocáveis de K no solo e os teores e conteúdos do nutriente nas árvores indicaram a importância de formas de reservas do nutriente na nutrição da espécie em solos altamente intemperizados e pobres em K trocável.

Termos de indexação: mica, extração nítrica, K não trocável, K total.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 20 de setembro de 2012 e aprovado em 22 de julho de 2013.

⁽²⁾ Mestre em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná - UFPR. Rua dos Funcionários, 1540, Cabral. CEP 80.035-050 Curitiba (PR). E-mail: michaelagronomia@gmail.com, jessikaseker@hotmail.com

⁽³⁾ Professor, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR. E-mail: vanderfm@ufpr.br, reissman@ufpr.br

SUMMARY: MINERAL RESERVE OF POTASSIUM IN OXISOL UNDER *Pinus taeda* L.

In Brazil, Pinus species are grown on approximately 1.87 million hectares, usually on chemically poor soils. The present study investigated the mineralogy of sand, silt and clay fractions and estimated the mineral reserve of K by different chemical extraction methods in naturally K-poor soil under Pinus taeda L., in the State of Paraná, Brazil. In a 500 m² area, five trees with large diameter (dominant trees) were selected, and trenches opened (depth 1.6 m) under the canopy of each tree. All soil profiles were classified as dystrophic Typic Red-Yellow Latosol and were similar in horizon morphology and sequence. The average horizon depths were O = 0.04 m, A1 = 0-0.09 m, A2 = 0.09-0.24 m, BA = 0.24-0.43 m, B1 = 0.43-0.66 m, and B2 = 0.66-1.60⁺ m. Samples collected from each horizon were subjected to physical (granulometry) and chemical analyses (pH, organic carbon, potential acidity, Al³⁺ and exchangeable bases, available P, total and non-exchangeable K) and sandy, silt and clay fractions were studied by X-ray diffraction (XRD). The mineralogy of the sand and silt fractions was fairly uniform, with total predominance of quartz and occurrence of only discrete XRD reflections of mica. The clay fraction also showed limited occurrence of micaceous minerals. The sequential treatments for removal of Fe oxides, gibbsite and kaolinite effectively determined mica concentrations in the clay fraction, which facilitated the identification of biotite and muscovite by XRD. The low concentrations of non-exchangeable K obtained at different concentrations of boiling HNO₃ (maximum of 91 mg kg⁻¹) and total K extracted with concentrated HF (maximum of 202.7 mg kg⁻¹) were consistent with the poverty of the soil fractions in primary mineral sources of the nutrient. The significant and positive correlations between non-exchangeable soil K and the nutrient concentrations and contents in the trees indicate the importance of making K reserve forms available in the nutrition of this species, when grown in highly weathered soils with low exchangeable K levels.

Index terms: mica, nitric extraction, non-exchangeable K, total K.

INTRODUÇÃO

O K é um elemento vital na nutrição inorgânica, pois participa de vários processos bioquímicos e fisiológicos nas plantas, como: ativador de várias enzimas (Evans & Sorger, 1986), *status* de água da planta e na expansão celular (Mengel & Arneke, 1982), controle estomático (Rascke, 1975), processo fotossintético (Demmig & Gimmler, 1983) e carregamento e transporte de fotoassimilados no floema (Mengel & Haeder, 1977).

Em razão da importância na nutrição das plantas e sua maior associação com minerais primários nas frações do solo, o estudo da reserva de K tem sido alvo de muitos pesquisadores. Os solos jovens do Brasil, desenvolvidos de materiais de origem ricos em mica e feldspato, podem apresentar teores de K total da ordem de 35 g kg⁻¹ (Melo et al., 1995). Entretanto, os solos altamente intemperizados dos trópicos úmidos apresentam teores de K total muito inferiores, normalmente na ordem de 300 a 2.000 mg kg⁻¹ (Longanathan et al., 1995; Silva et al., 2000). Nesses solos, estudos mineralógicos utilizando métodos e ferramentas tradicionais, destacando-se a difratometria de raios-X, empregada em amostras de terra fina e da fração argila total (sem tratamento prévio para remoção e concentração de minerais), não apresentam sensibilidade suficiente para detectar as possíveis fontes minerais desses baixos teores (máximo 2.000 mg kg⁻¹ em relação aos 35 g kg⁻¹ em solos jovens

reportados por Melo et al., 1995) de K total (Melo et al., 2003).

Na interface solo-planta, os métodos mais utilizados para estimar a contribuição da reserva de K na nutrição de plantas têm sido feitos, em diversos estudos, utilizando cultivos sucessivos, extrações químicas empregando-se HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente, lavagens sucessivas com HCl 0,01 mol L⁻¹, ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico e oxálico) e resinas trocadoras de cátions (Simard et al., 1992; Martins et al., 2004). Esses métodos têm apresentado boa correlação com o K absorvido pelas plantas (Benipal & Pasricha, 2002). De acordo com Martins et al. (2004), a contribuição de formas não trocáveis de K no total absorvido pelo trigo, em um único cultivo, variou de 0 a 54 %; nos solos com maior teor de K, as plantas absorveram apenas formas trocáveis do nutriente.

A participação de formas não trocáveis de K deve ser ainda mais expressiva para espécies florestais, que permanecem em campo por um longo período e modificam intensamente as condições químicas do solo, principalmente na região da rizosfera, por exsudação de prótons e de ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Melo et al. (1995) observaram que as formas não trocáveis de K foram importantes na nutrição do eucalipto (povoamentos de sete anos) ao longo do cultivo, conforme indicado pelos maiores valores de coeficientes de correlação entre o K na planta e seus teores no solo obtidos com soluções diluídas de HNO₃.

No Brasil, aproximadamente 4,8 milhões de hectares são cultivados com espécies florestais de rápido crescimento; desse total, cerca de 1,87 milhão de hectares correspondem a espécies de *Pinus*, geralmente plantadas em áreas cujos solos são pobres quimicamente. Mesmo assim, essa cultura consegue sobressair à carência de nutrientes do solo, e uma das possibilidades é a habilidade das plantas em acelerar o intemperismo de minerais primários fontes de nutrientes (Kaseker, 2012).

A participação das formas de reserva de K na nutrição do *Pinus sylvestris* foi demonstrada no trabalho de Wallander & Wickman (1999), por meio de avaliações de crescimento, de absorção do nutriente e da taxa de intemperização de biotita no solo. Esses dados indicaram que a absorção de formas minerais não trocáveis e estruturais de K pode ser o principal motivo para a falta de resposta do *Pinus* às fertilizações potássicas em solos pobres quimicamente, conforme verificado por Kaseker (2012).

Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram estudar a mineralogia das frações areia, silte e argila, estimar a reserva mineral de K do solo por diferentes métodos de extrações químicas e avaliar a importância desse elemento na nutrição do *Pinus taeda* em Latossolo naturalmente pobre no nutriente, no Segundo Planalto Paranaense.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição geral da área e coleta de amostras

O estudo foi desenvolvido em junho de 2011, no município de Ponta Grossa, PR, nas coordenadas geográficas de 25° 17' 45" S e 49° 55' 54" O, em povoamentos de *Pinus taeda* L. de segunda rotação, com sete anos de idade. A localização geográfica foi tomada no ponto central da área de estudo (cerca de 500 m²). Na primeira rotação, as árvores foram cortadas com 40 anos de idade e houve apenas fertilização fosfatada no plantio. Já na segunda, não houve adição de nutrientes ao solo. Foram selecionadas cinco árvores (repetições) com maior diâmetro, distribuídas na área delimitada para o estudo, de acordo com as considerações de árvores dominantes de Blum & Hildebrand (1997), para abertura de uma trincheira na projeção da copa de cada árvore. A escolha de cinco árvores dominantes em uma área de 500 m² seguiu a proporcionalidade estimada por Blum & Hildebrand (1997). Segundo esses autores, em média, ocorrem 100 árvores dominantes por hectare.

A declividade média da área é de 5 % e para se ter maior homogeneidade pedológica entre as cinco repetições, os perfis foram situados em faixa longitudinal à declividade, no terço médio da encosta. As trincheiras foram abertas até 1,7 m de profundidade, e os solos foram classificados como

Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (Embrapa, 2006). O material de origem dos solos da região é o Arenito da Formação Ponta Grossa (Minerpar, 2001).

Após descrição morfológica dos perfis (Santos et al., 2005), coletaram-se amostras de serapilheira do horizonte O e de solo em cinco horizontes. A coleta de serapilheira foi realizada colocando-se um gabarito de 0,25 x 0,25 m sobre o solo, na mesma face do perfil usada para as descrições morfológicas. Todos os perfis apresentaram morfologia e sequência dos horizontes semelhantes, cujas profundidades médias foram de: O = 0,04 m; A1 = 0-0,09 m; A2 = 0,09-0,24 m; BA = 0,24-0,43 m; B1 = 0,43-0,66 m; e B2 = 0,66-1,60⁺ m. Os resíduos de material vegetal do horizonte O foram secos em estufa a 60 °C e moídos, e as amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Para verificar a distribuição do sistema radicular no perfil, coletou-se um bloco de solo de aproximadamente 2.000 cm³, amostrando toda a espessura de cada horizonte mineral. A única exceção foi para o horizonte B2, que em razão da sua maior espessura, consideraram-se apenas os 20 cm iniciais (66-86 cm) para amostragem. No laboratório, o solo foi destorroado e as raízes separadas manualmente e, após secagem em estufa a 60 °C até peso constante, determinou-se a massa de matéria seca de raízes (Tedesco et al., 1985).

Os teores de K nas acículas das árvores obtidos por Kaseker (2012) foram usados nas análises de correlações com os teores e as formas desse nutriente no solo. Esse autor realizou estudos de fertilização com N, P, K, Ca e Mg (calagem) e micronutrientes na mesma época e área experimental. As cinco árvores dominantes usadas como testemunhas no trabalho de Kaseker (2012) foram as mesmas selecionadas para a abertura das trincheiras neste estudo. Os dados de análise foliar apresentados no quadro 1 foram obtidos por Kaseker (2012), nas seguintes condições: a) coleta de acículas em junho de 2011: coleta de verticilo vivo, com exposição para a fase norte. O ramo foi separado em três lançamentos, da base para a ponta: 2° lançamento do verão de 2009 (dezembro a maio) - 2L09, 1° lançamento da primavera de 2010 (julho a dezembro) - 1L10, 2° lançamento do verão de 2010 - 2L10; b) coleta de acículas em setembro de 2001: coleta de verticilo vivo, com exposição para a fase norte. O ramo foi separado em três lançamentos, da base para a ponta: nova coleta ou repetição (R) do 1° lançamento do verão de 2010 - 1L10R, repetição (R) do 2° lançamento de 2010 - 2L10R, coleta do lançamento da estação (primavera de 2011) - como a coleta foi no meio do período de crescimento (julho a dezembro), as acículas não estavam maduras (fase de pendão - P11); c) o material vegetal foi lavado com água deionizada, seco em estufa a 60 °C e moído; d) os teores de K foram determinados por espectrometria de emissão de

chama, após digestão total do material vegetal a 500 °C em mufla e solubilização com HCl 3 mol L⁻¹; e e) utilizando o teor de K e o peso das 100 acículas de cada amostra, foi calculado o conteúdo do nutriente nas acículas, com exceção do pendão.

Análises textural e química da TFSA dos horizontes minerais e teores de nutrientes no horizonte O

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). Para a caracterização química (fertilidade), foram utilizados os métodos descritos em Embrapa (1997): pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; carbono orgânico (dicromato de Na); acidez potencial (H+Al) (acetato de Ca 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0); Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ (KCl 1 mol L⁻¹); K e P disponíveis (Mehlich-1).

Utilizando-se concentrações crescentes de HNO₃ fervente (0,25; 0,5; 1; 2; e 4 mol L⁻¹), discriminaram-se os teores de K não trocáveis por aquecimento da mistura amostra-solução ácida por 25 min a 113 °C (Pratt & Morse, 1954; Melo et al., 1995). Os teores de K foram determinados nos extratos por espectrometria de emissão de chama. Para definição de teores totais de K, as amostras foram digeridas em forno de micro-ondas, colocando-se aproximadamente 0,4 g de amostra, na presença de 4 mL de HNO₃, 3 mL de HF concentrados e 1 mL de H₂O₂ 30 % (v/v) (Melo et al., 2002). Para avaliar a eficiência de tamponamento e interação entre as formas de K, calculou-se a relação (R) K total/K trocável, pela simples divisão de seus teores em cada amostra.

Análises mineralógicas das frações do solo

As amostras de TFSA foram tratadas com H₂O₂ a 30 % (v/v) para remoção de matéria orgânica e com NaOH 0,2 mol L⁻¹, para dispersão das partículas. Após esses tratamentos prévios, a fração areia foi retida em peneira de 0,05 mm, e as frações argila e silte foram recolhidas em provetas de 1000 mL e separadas por sedimentação com base na lei de Stokes (Melo et al., 2001).

As amostras de areia e silte foram moídas em almofariz e montadas em placas perfuradas (amostras não orientadas), e as de argila foram orientadas em lâminas de vidro (técnica do esfregaço), para a identificação dos minerais por difratometria de raios-X (DRX). Os difratogramas foram obtidos em goniômetro vertical, com velocidade de 1° 2θ min⁻¹ e amplitude de 4 a 65° 2θ. O difratômetro, equipado com tubo de Ni e utilizando radiação CuKα, foi operado a 20 mA e 40 kV.

Para concentrar minerais filossilicatados 2:1 na fração argila, foram utilizadas extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) para remoção dos óxidos de Fe pedogenéticos (hematita e goethita), conforme detalhes apresentados por Melo et al. (2001). O resíduo da extração com DCB foi tratado com NaOH 5 mol L⁻¹ a quente, para a remoção de caulinita e

gibbsita (Kämpf & Schwertmann, 1982). O resíduo final foi analisado por DRX (amostra orientada), em uma amplitude de varredura de 4 a 40° 2θ. Como não foram identificados minerais filossilicatados secundários, não se utilizaram tratamentos adicionais (saturação com K⁺, Mg²⁺, solvatação com glicerol e aquecimento - Whittig & Allardice, 1986) na fração argila.

Análise dos dados

Os teores de K determinados por diferentes métodos de extração foram correlacionados (correlação de Pearson) com os teores e o conteúdo de nutrientes nas árvores (Quadro 1). As análises foram feitas, utilizando-se o Programa SAEG desenvolvido pelo Centro de Processamento de Dados da Universidade Federal de Viçosa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características físicas e químicas do solo

Os baixos teores de fração argila (Quadro 2) são coerentes com o material de origem da região: Arenito da Formação Ponta Grossa (Minerpar, 2001). Para os horizontes minerais, observaram-se baixa fertilidade e teores mais elevados de Al³⁺, em relação à soma das bases (Quadro 2). Os teores de K⁺ foram próximos a zero nos horizontes subsuperficiais.

Mesmo sendo superior em relação aos horizontes minerais, a soma de bases média do horizonte orgânico foi de apenas 2 cmol_c dm⁻³. Uma evidência do processo de formação de fração húmica nesse horizonte é a elevada acidez potencial (H+Al), com valor médio de 11,7 cmol_c dm⁻³. A relação direta entre H e compostos húmicos foi amplamente discutida por Motta & Melo (2009). Dessa forma, além de contribuir para a liberação de nutrientes para as plantas pelo processo de ciclagem, o horizonte O apresenta maior potencial adsortivo de cátions do perfil (maior CTC_{pH 7}). Foi possível identificar em campo no horizonte O as porções Ln ("litter" novo formado pela deposição recente de acículas), Lv ("litter" velho, em estágio inicial de decomposição) e Fr (porção em contato com o solo, rica em compostos humificados), de acordo com a classificação de Babel (1971).

Com a ausência de adubação com bases trocáveis durante o primeiro e segundo ciclos de *Pinus taeda* na área de estudo (aproximadamente 47 anos), a fonte primária de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ acumulados no Horizonte O foi o intemperismo lento e paulatino de minerais primários, fontes de nutrientes (reserva mineral). Portanto, os sistemas orgânico e mineral nesse ambiente quimicamente pobre estão intimamente integrados no tamponamento de formas trocáveis de nutrientes.

Quadro 1. Teor e conteúdo de K em 100 acículas nas cinco árvores selecionadas para a abertura dos perfis de solo nas projeções de suas copas⁽¹⁾

Árvore	Teor/Conteúdo					
	2L09	1L10	2L10	1L10R	2L10R	P11
	g kg ⁻¹ /mg/100 acículas					
1	2,8/14,1	4,0/16,5	4,9/29,8	2,7/17,0	2,6/13,5	4,6/-
2	2,4/17,9	3,5/14,6	3,1/17,7	2,5/23,1	2,4/10,7	3,9/-
3	4,3/21,1	3,6/13,8	3,6/14,2	1,9/10,9	2,4/6,3	4,1/-
4	4,0/19,7	3,8/15,3	3,5/14,0	2,7/17,2	2,1/2,8	5,2/-
5	3,3/16,1	3,8/26,0	3,2/16,4	2,4/13,5	2,2/8,3	3,7/-
Média	3,4/17,8	3,7/17,3	3,7/18,4	2,5/16,4	2,4/8,3	4,3/-

⁽¹⁾ 2L09: segundo lançamento de 2009; 1L10 e 2L10: primeiro e segundo lançamentos de 2010; 1L10R e 2L10R: nova coleta após três meses do primeiro e segundo lançamentos de 2010; e P11: pendão de crescimento em 2011, em razão do reduzido tamanho das acículas no pendão não foi possível obter a massa de 100 acículas e o conteúdo de K.

Fonte: Kaseker (2012).

Quadro 2. Análise granulométrica e química dos solos

Horiz.	pH(CaCl ₂)	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC _{pH7}
					cmol _c dm ⁻³			
O	3,0	2,3	14,0	1,68	0,20	0,284	2,16	16,2
A1	3,6	1,8	8,1	0,64	0,07	0,018	0,72	8,8
A2	3,9	1,2	4,4	0,65	0,05	0,013	0,71	5,1
BA	4,0	0,9	3,2	0,74	0,04	0,008	0,78	4,0
B1	4,1	0,9	3,1	0,81	0,03	0,008	0,84	4,0
B2	4,1	0,9	2,9	0,84	0,02	0,005	0,86	3,8
	P	C.O.	V	m	Ca/Mg	Areia	Silte	Argila
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%	%		g kg ⁻¹		
O	10,8	136,9	12	52	8,6	-	-	-
A1	5,0	22,7	8	71	10,2	814	18	168
A2	2,2	12,3	14	62	14,8	817	14	169
BA	0,6	10,2	20	52	18,5	795	24	181
B1	0,1	8,4	21	52	27,8	733	30	237
B2	0,4	6,7	23	50	27,8	689	35	276

Valores médios de cinco repetições; SB: soma de bases; CO: carbono orgânico; V: saturação por bases [V = (SB/CTC_{pH 7,0} × 100)]; e m: saturação por Al³⁺ [m = (Al³⁺/CTC pH do solo × 100)].

Mineralogia das frações areia, silte e argila do solo

Em razão da grande similaridade entre os difratogramas dos horizontes A, BA e B dos cinco perfis, foi selecionado apenas o primeiro horizonte (A1) para representar a mineralogia das frações areia e argila dos solos (Figuras 1 e 2, respectivamente). As amostras das frações areia e silte dos solos apresentaram mineralogia bastante uniforme, com predomínio absoluto de quartzo e ocorrência apenas de discretas reflexões basais de primeira ordem de mica e de caulinita (Figura 1). Mesmo sendo uma análise qualitativa, as intensidades das reflexões nos difratogramas refletem a quantidade e a cristalinidade dos minerais (Whittig & Allardice,

1986). Por esse motivo, as reflexões de baixa intensidade de mica e caulinita, formando apenas pequeno ombro acima da linha de base, foram usadas para classificar a ocorrência desses minerais como fase residual na figura 1. Resíduos de mica nas frações mais grosseiras de solos originados de arenito também foram observados por DRX no estudo de Melo et al. (1995).

Mesmo em pequena quantidade, a ocorrência de minerais micáceos pode ser importante para o tamponamento de K⁺ no solo, embora a taxa de liberação do nutriente das frações grosseiras seja menor em relação a partículas de mica com menor diâmetro. Simard et al. (1992), em estudos de cinética de liberação de K⁺ (3.200 h) com ácido cítrico

Quadro 3. Teores trocáveis e totais de K dos solos⁽¹⁾

Perfil	Horiz.	K trocável ⁽¹⁾	K total ⁽²⁾	R ⁽³⁾
1	O	110,8	170,9	1,5
	A1	24,0	134,0	5,6
	A2	5,0	135,1	27,2
	BA	3,0	146,1	48,7
	B1	3,0	145,8	48,3
	B2	3,0	173,0	57,3
2	O	129,0	196,2	1,5
	A1	7,00	157,8	22,4
	A2	4,0	126,1	31,5
	BA	2,0	202,7	101,5
	B1	3,0	189,2	63,0
	B2	2,0	184,6	92,0
3	O	107,0	187,4	1,7
	A1	10,0	148,0	14,8
	A2	4,0	111,0	27,5
	BA	3,0	111,2	37,0
	B1	3,0	170,2	56,7
	B2	2,0	186,3	93,0
4	O	84,0	168,0	2,0
	A1	6,0	140,5	23,3
	A2	5,0	136,2	27,2
	BA	3,0	130,3	43,3
	B1	3,0	199,6	66,3
	B2	2,0	178,0	89,0
5	O	120,0	202,7	1,7
	A1	7,0	134,3	19,1
	A2	5,0	139,0	27,8
	BA	3,0	156,9	52,3
	B1	3,0	177,6	59,3
	B2	2,0	175,2	87,5

⁽¹⁾ K trocável: extração com Mehlich-1; ⁽²⁾ K total: extração com HNO₃ e HF concentrados H₂O₂ 30 % (v/v); ⁽³⁾ R: relação entre teores de K total e trocável.

minerais (formas trocáveis e de reserva) pelas árvores durante o tempo total de cultivo (47 anos) e por acúmulo de resíduos vegetais, principalmente acículas na superfície do solo; o nutriente foi transferido para o horizonte O. Como a área não recebeu fertilização potássica, tem-se a comprovação que a fonte primária do K acumulado no horizonte O foram os minerais primários e secundários do solo (reserva mineral).

A reserva total de K (extração com HF e HNO₃ concentrados) em todos os perfis foi muito reduzida (K total inferior a 200 mg kg⁻¹), mesmo quando comparada com outros solos altamente intemperizados dos trópicos úmidos (Longanathan et al., 1995; Silva et al., 2000). Melo et al. (2003) também encontraram maiores teores totais de K de Latossolos desenvolvidos de arenito da Formação Adamantina no Triângulo Mineiro (354 a 1.717 mg kg⁻¹), o que evidencia a maior

pobreza do arenito Ponta Grossa, rocha de origem dos solos em estudo, em minerais primários, fontes do nutriente. Os baixos teores de K total (Quadro 3) foram coerentes com as discretas reflexões de minerais micáceos por DRX, nas frações areia e silte (Figura 1) e argila sem tratamento (Figura 2a).

Os teores de K⁺ oscilaram entre 2 e 24 mg kg⁻¹ nos horizontes minerais A, BA e B, com a maioria desses horizontes apresentando teores inferiores a 3 mg kg⁻¹ (Quadro 3), o que indicaria dificuldades de crescimento das árvores. Contudo, no estudo de Kaseker (2012), conduzido na mesma área, não houve resposta nutricional no crescimento das árvores à fertilização potássica. Esse comportamento pode ser atribuído ao tamponamento, mesmo em níveis baixos, do K⁺ pelas formas de reserva orgânica e mineral do nutriente.

Essa reduzida disponibilidade de K⁺ para as plantas resultou em altos valores para relação (R), entre teores totais/trocáveis, nos horizontes A1, A2, AB, B1 e B2. Apenas no horizonte O os valores de R foram mais próximos de 1,0 (1,5 a 2,0), o que indicou alta solubilidade e facilidade de extração do K⁺ dos compostos orgânicos, como observado por Osono & Takeda (2004). Em relação aos horizontes minerais, houve tendência dos valores de R aumentarem em profundidade. Esse comportamento pode ser atribuído às melhores condições de preservação dos minerais micáceos nos horizontes mais profundos dos perfis de solo.

Os teores de K extraídos com soluções crescentes de HNO₃ fervente também foram baixos (máximo de 91 mg kg⁻¹) (Figura 3) e similares aos obtidos em solos originados de rochas sedimentares no Rio Grande do Sul, por Melo et al. (1995). Já em Cambissolo originado de granito, esses autores observaram teores mais elevados de K extraídos com HNO₃ 4 mol L⁻¹, chegando a 1.522 mg kg⁻¹. O aumento nos teores de K com o emprego de soluções mais concentradas de HNO₃ (Figura 3) refletiu o efeito de acidificação do meio pela produção de H⁺, que atacou com maior energia as estruturas dos minerais micáceos presente nas frações dos solos (Figuras 1 e 2). No perfil 3, por exemplo, a maior inclinação da curva de extração do horizonte B2 com HNO₃ (Figura 3) é consequência da maior taxa de liberação de K e pode indicar maior relação entre biotita/muscovita nas frações do solo, uma vez que a mica ferromagnésiana é muito menos resistente ao intemperismo e às extrações ácidas em laboratório (Arkcoll et al., 1985; Melo et al., 2002).

Relação entre formas de K no solo e absorção do nutriente pelas árvores

Os teores de K nas acículas de todos os lançamentos (Quadro 1) estão abaixo do requeridos para o bom desenvolvimento das árvores, que segundo Switzer & Nelson (1972) é de 6,0 g kg⁻¹ em plantio de *Pinus taeda*.

Como, em média nos cinco perfis, 83 % da massa de raiz encontravam-se nos três primeiros horizontes (massa total média de 54,9 g até horizonte B2 - coleta

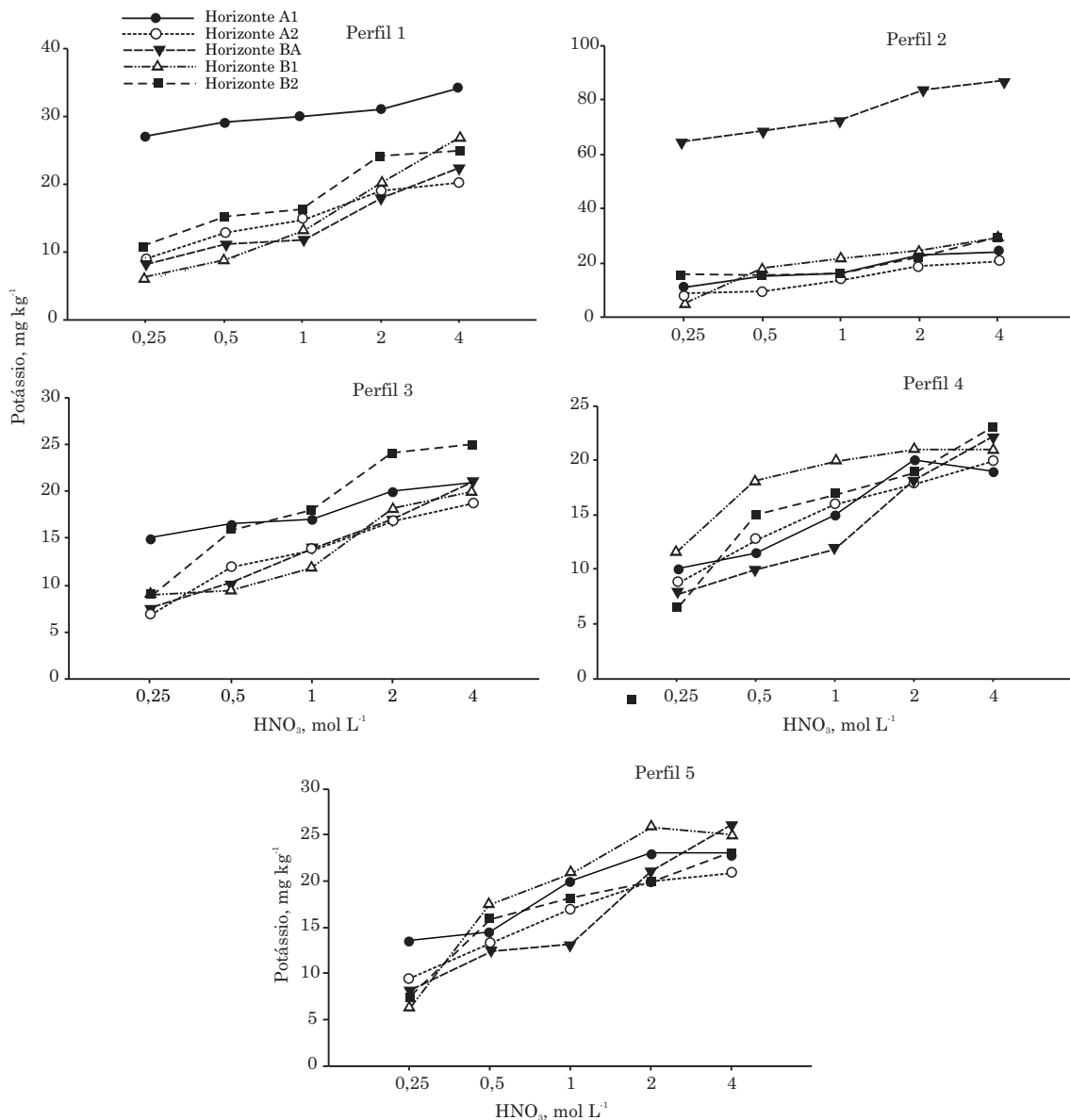


Figura 3. Teores de K nos horizontes A1, A2, BA, B1, B2 dos perfis de solos extraídos com diferentes concentrações de HNO₃ fervente: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; e 4,0 mol L⁻¹.

de um monólito de 2.000 cm³ de solo em cada horizonte), foram consideradas apenas as correlações entre os teores de K no solo e os teores e os conteúdos na planta nos horizontes O, A1 e A2 (Quadro 4).

A senescência e translocação do K⁺ das acículas mais velhas em direção aos lançamentos mais novos dificultam o estabelecimento direto de causa-efeito entre os teores do nutriente no solo e na planta. Essa dinâmica de K⁺ na planta pode ter sido a principal razão do reduzido número de coeficientes de correlação (r) significativos entre os teores no solo e os teores e os conteúdos nas acículas (Quadro 4). O lançamento em plena formação no momento da última amostragem (pendão - setembro de 2011) apresentou os maiores teores de K⁺, fortemente influenciado por processos de

translocação das acículas mais velhas, e os menores valores de r com as diferentes formas de K⁺ no solo.

No horizonte O, as correlações foram inexpressivas e aquelas significativas apresentaram relação inversa entre o K no solo e na planta. Os métodos de extração usados não foram desenvolvidos para camada de resíduos vegetais depositada sobre o solo, o que limita a interpretação operacional das formas trocáveis e não trocáveis de K e suas correlações com a absorção pelas plantas. Em razão da alta solubilidade do K associado aos horizontes orgânicos em plantio de pinus (Osono & Takeda, 2004), torna-se difícil separar formas distintas do nutriente com os métodos de extração utilizados. Os menores teores de K obtidos nas maiores concentrações nítricas em relação aos teores trocáveis devem ser por

Quadro 4. Coeficientes de correlação (r) entre teores de K trocável extraídos do solo por diferentes métodos e os teores e os conteúdos do nutriente em diferentes lançamentos das árvores

Hor.	Material vegetal ⁽¹⁾	Extrator						
		Mehlich-1 (trocável)	Ácido nítrico (mol L ⁻¹)					HF (total)
			0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	
Teores								
O	2L09	-0,72	0,39	-0,04	-0,04	-0,07	0,07	-0,25
	1L10	-0,38	-0,16	-0,73	-0,79	-0,98 **	-0,88*	-0,58
	2L10	-0,20	0,37	-0,13	-0,22	-0,65	-0,66	-0,66
	1L10R	-0,23	-0,67	-0,66	-0,48	-0,64	-0,25	-0,52
	2L10R	0,44	0,49	0,36	0,20	-0,10	-0,41	-0,13
	P11	-0,90*	-0,06	-0,45	-0,24	-0,63	-0,06	-0,95*
A1	2L09	-0,31	-0,28	-0,40	-0,40	-0,65	-0,63	-0,17
	1L10	0,68	0,69	0,60	0,77	0,65	0,58	-0,92*
	2L10	0,97**	0,94*	0,92*	0,88*	0,81	0,82	-0,52
	1L10R	0,28	0,20	0,24	0,34	0,50	0,39	-0,34
	2L10R	0,89*	0,88*	0,94*	0,82	0,84	0,91*	-0,07
	P11	0,19	0,10	0,06	0,05	0,02	-0,03	-0,31
A2	2L09	0,01	-0,14	0,51	0,13	-0,45	-0,88*	-0,38
	1L10	0,88*	0,78	0,72	0,54	0,56	0,29	0,65
	2L10	0,38	0,23	0,23	-0,12	0,11	0,10	0,15
	1L10R	0,66	0,66	0,12	0,36	0,44	0,66	0,82
	2L10R	-0,13	-0,17	-0,29	-0,49	0,06	0,26	-0,16
	P11	0,48	0,29	0,33	0,13	-0,23	-0,24	0,27
Conteúdo								
O	2L09	-0,41	0,37	0,43	0,55	0,55	0,73	-0,00
	1L10	0,30	-0,55	-0,60	-0,77	-0,31	-0,58	0,53
	2L10	0,23	0,09	-0,13	-0,22	-0,52	-0,64	-0,35
	1L10R	0,30	-0,48	0,06	0,27	0,18	0,43	-0,04
	2L10R	0,72	0,09	0,21	0,05	-0,04	-0,39	0,17
A1	2L09	-0,65	-0,68	-0,69	-0,84	-0,90*	-0,85	0,54
	1L10	-0,14	-0,01	-0,09	0,19	0,12	0,04	-0,60
	2L10	0,94*	0,92*	0,95*	0,95*	0,99**	0,99**	-0,40
	1L10R	-0,04	-0,15	-0,00	-0,07	0,23	0,20	0,48
	2L10R	0,71	0,71	0,80	0,76	0,87	0,90*	-0,04
A2	2L09	-0,56	-0,63	-0,17	-0,33	-0,81	-0,86	-0,68
	1L10	0,55	0,70	0,59	0,83	0,89*	0,49	0,60
	2L10	0,34	0,30	-0,01	-0,10	0,39	0,55	0,34
	1L10R	-0,13	-0,03	-0,67	-0,26	0,02	0,61	0,29
	2L10R	-0,05	0,02	-0,35	-0,28	0,38	0,65	0,12

⁽¹⁾ 2L09: segundo lançamento de 2009; 1L10 e 2L10: primeiro e segundo lançamentos de 2010; 1L10R e 2L10R: nova coleta após três meses do primeiro e segundo lançamentos de 2010; P11: pendão de crescimento em 2011 - em razão do reduzido tamanho das acículas no pendão não foi possível obter a massa de 100 acículas e o conteúdo de K; * e **: significativos a p<0,05 e p<0,01, respectivamente.

causa da solubilização de compostos orgânicos pelo HNO₃, que possui alto poder oxidante, o que facilitaria a redistribuição do nutriente previamente extraído nesses compostos (readsorção à fração orgânica solubilizada). Esse processo de readsorção ou redistribuição de elementos previamente extraídos tem sido relatado, por exemplo, em trabalhos envolvendo extrações sequenciais de metais pesados (Shan & Chen, 1993).

Para o horizonte mineral A1, houve estreita relação entre algumas formas de K⁺ no solo e a absorção e o acúmulo do nutriente na planta (altos valores de r no quadro 4). As correlações entre os próprios métodos de extração de K nesse horizonte do solo foram expressivas (Quadro 5). Segundo Benipal & Pasricha (2002), as plantas absorvem primeiramente o K⁺ da solução do solo, cuja concentração depende daquela

Quadro 5. Matriz de correlação de Pearson entre teores de K trocável obtidos por diferentes métodos de extração nos solos

Hor.		Mehlich 1 (trocável)	Ácido nítrico (mol L ⁻¹)				
			0,25	0,50	1,00	2,00	4,00
O	0,25	-0,04					
	0,50	0,43	0,72				
	1,00	0,26	0,58	0,95*			
	2,00	0,52	0,28	0,83	0,83		
	4,00	0,03	0,05	0,58	0,77	0,79	
	HF (total)	0,79	-0,15	0,29	0,14	0,63	0,17
A1	0,25	0,99**					
	0,50	0,99**	0,99**				
	1,00	0,94*	0,97**	0,96*			
	2,00	0,90*	0,89*	0,93*	0,95*		
	4,00	0,93*	0,92*	0,96**	0,95*	0,99**	
	HF (total)	0,44	-0,51	-0,38	-0,62	-0,44	-0,36
A2	0,25	0,97**					
	0,50	0,81	0,74				
	1,00	0,84	0,90*	0,82			
	2,00	0,72	0,85	0,50	0,77		
	4,00	0,41	0,57	-0,08	0,34	0,78	
	HF (total)	0,88*	0,95*	0,50	0,79	0,83	0,74

* e **: significativos a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

mantida pelo K⁺, adsorvido nos sítios de troca. Uma vez o K⁺ é esgotado, dá-se a liberação do K⁺ contido nas entrecamadas dos argilominerais e acelera-se a intemperização dos minerais primários potássicos (tamponamento das formas disponíveis do nutriente). Dessa forma, as correlações positivas e significativas no horizonte A1 entre os teores de K no solo extraídos por diferentes concentrações de HNO₃ e o teor nas acículas das amostras 2L10 e 2L10R (Quadro 4) sugerem a participação de formas não trocáveis do nutriente na nutrição das árvores. Outros autores verificaram expressiva contribuição de formas não trocáveis de K extraídas com HNO₃ na nutrição de plantas e estreita associação entre K trocável e não trocável (Melo et al., 1995; Benipal & Pasricha, 2002; Martins et al., 2004).

Em razão da maior estabilidade e menor participação no tamponamento de K disponível no solo, as correlações positivas entre os teores totais do nutriente no solo e teores e conteúdos nas acículas foram baixas e não significativas (Quadro 4).

Por fim, trabalhos específicos, em nível de rizosfera, devem ser realizados para avaliar a eficiência e entender os mecanismos das raízes dessa espécie em acelerar o intemperismo de minerais primários, fontes de nutrientes em solos altamente intemperizados. Esses dados ajudariam a responder a seguinte questão: qual o nível mínimo de reserva mineral de nutrientes dos solos para que as árvores de pinus cresçam satisfatoriamente? Mesmo sendo muito pobre quimicamente, esse nível ainda não foi atingido para K na área em estudo.

CONCLUSÕES

1. A limitada ocorrência de minerais micáceos (resíduos de muscovita e biotita) nas frações argila, silte e areia e os baixos teores de K total foram coerentes com o intenso grau de intemperismo do Latossolo e a pobreza mineralógica do arenito de origem.

2. Os maiores teores de formas de reserva de K no horizonte O foram atribuídos à transferência contínua do nutriente associado à fração mineral (intemperismo de minerais primários e liberação de K) para formas orgânicas durante os 47 anos de cultivo de pinus na área.

3. As correlações positivas e significativas entre os teores não trocáveis de K extraídos com HNO₃ fervente e teores e conteúdos do nutriente nas árvores ajudaram a explicar a falta de resposta do pinus à fertilização potássica em solos altamente intemperizados e pobres em formas trocáveis do nutriente.

LITERATURA CITADA

- ARKCOLL, D.B.; GOULDING, K.W.T. & HUGHES, J.C. Traces of 2:1 layer-silicate clays in Oxisols from Brazil, and their significance for potassium nutrition. *J. Soil Sci.*, 36:123-128, 1985.
- BABEL, U. Gliederung und beschreibung des humusprofils in mitteleuropäischen Wäldern. *Geoderma*, 5:297-324, 1971.

- BENIPAL, D.S. & PASRICHA, N.S. Non exchangeable K release and supplying power of Indo - Gangetic alluvial soils. *Geoderma*, 108:197-206, 2002.
- BLUM, W.E.H. & HILDEBRAND, E.E. Naerelementversorgung und wachstum von *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., auf zwei toposequenzen in Paraná/Suedbrasilien. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, 25:357-366, 1997.
- DEMMIG, B. & GIMMLER, H. Properties of the isolated intact chloroplast at cytoplasmatic K⁺ concentrations. I - Light induced cation uptake into intact chloroplast is driven by an electrical potential difference. *Plant Physiol.*, 73:169-174, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- EVANS, H.J. & SORGER, G.J. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 17:47-77, 1986.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5 M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Miner.*, 30:401-408, 1982.
- KASEKER, J.F. Composição química de acículas, serapilheira, solos rizosféricos e não rizosféricos e variabilidade espacial em ensaio de omissão de nutrientes em *Pinus taeda* L. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2012. 95p. (Dissertação de Mestrado)
- LONGANATHAN, P.; DICKSON, A.A. & ISIRIMAH, N.O. Potassium supplying capacity of soils formed on different geological deposits in the Niger Delta region of Nigeria. *Geoderma*, 65:109-120, 1995.
- MARTINS, R.; MELO, V.F. & MONTE SERRAT, B. Métodos de determinação da disponibilidade de potássio para a cultura do trigo em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná. *R. Ceres*, 51:787-801, 2004.
- MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & SCHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:19-32, 2001.
- MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:165-171, 1995.
- MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; MASCHIO, P.A.; RIBEIRO, A.N. & LIMA, V.C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:807-819, 2003.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & FONTES, M.P.F. Potassium and magnesium in clay minerals of some Brazilian soil as indicated by a sequential extraction procedure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:2203-2225, 2002.
- MENGEL, K. & ARNEKE, W.W. Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Physiol. Plant.*, 54:402-408, 1982.
- MENGEL, K. & HAEDER, H.E. Effect of potassium supply on the rate of phloem sap exudation and the composition of phloem sap of *Rizinus communis*. *Plant Physiol.*, 59:282-248, 1977.
- MINEROPAR. Minerais do Paraná S/A - Mineraopar. Atlas Geológico do Estado do Paraná. Curitiba, Secretaria de Estado da Indústria, Comércio e Turismo, 2001. 125p. CD-ROM
- MOTTA, A.C.V. & MELO, V.F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo: Aplicações, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. Parte 2, p.313-380.
- OSONO, T. & TAKEDA, H. Potassium, calcium, and magnesium dynamics during litter decomposition in a cool temperate forest. *J. For. Res.*, 9:23-31, 2004.
- PAL, D.K.; SRIVASTAVA, P.; DURGE, S.L. & BHATTACHARYYA, T. Role of weathering of fine-grained micas in potassium management of Indian soils. *Appl. Clay Sci.*, 20:39-52, 2001.
- PRATT, P.F. & MORSE, H.H. Potassium release from exchangeable and non exchangeable forms in Ohio soils. Ohio, Ohio Agricultural Experiment Station Research Bulletin, 1954. 747p.
- RASCHE, R. Stomatal action. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 26:309-340, 1975.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.
- SHAN, X.Q. & CHEN, B. Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid. *Anal. Chem.*, 65:802-807, 1993.
- SILVA, I.R.; FURTINI NETO, A.E.; FERNANDES, L.A.; CURI, N. & VALE, F.R. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2065-2073, 2000.
- SIMARD, R.R.; KIMPE, C.R. & ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1421-1428, 1992.
- SINGH, B. & GILKES, R.J. Properties of soil kaolinites from South-Western. *Aust. J. Soil Sci.*, 43:645-667, 1992.

- SWITZER, G.L. & NELSON, L.E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: The first twenty years. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 26:143-147, 1972.
- TEDESCO, M.J.; VOLWEISS, S.J. & BOHRNEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. Não paginado. (Boletim Técnico, 5)
- WALLANDER, H. & WICKMAN, T. Biotite and microcline as potassium sources in ectomycorrhizal and non-ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. *Mycorrhiza*, 9:25-32, 1999.
- WHITTIG, L.D. & ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.331-362.