

Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação
com a cinética de liberação de macronutrientesProductivity of *Eucalyptus grandis* and its
relationship with the macronutrients release kineticsFrancisco Hélcio Canuto Amaral¹, Antonio Eduardo Furtini Neto², Nilton Curi³,
Alberto Vasconcellos Inda⁴ e Elias Frank de Araújo⁵**Resumo**

A cinética de liberação de nutrientes pode auxiliar no desenvolvimento de manejos de adubações mais eficientes bem como na racionalização do uso de nutrientes em solos. O estudo teve como objetivos avaliar a cinética de liberação de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em solução de ácido cítrico em concentrações distintas e a relação entre cinética de liberação destes nutrientes e o incremento médio anual (IMA) de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, abrangendo solos das províncias geomorfológicas da Depressão Periférica, Escudo Sul-riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul. A cinética de liberação foi avaliada em extrator ácido cítrico, em tempos de equilíbrio que variaram de 2 a 1.808 horas. Os ajustes mais consistentes da cinética de liberação de K, Ca e Mg foram obtidos com as soluções de ácido cítrico de 0,01 e 0,001 mol L⁻¹, nas profundidades de 0 – 0,20 e 0,21 – 0,40 m de todos os solos estudados. A cinética de liberação de K, Ca e Mg variou entre os solos, profundidades e entre as concentrações de ácido cítrico avaliadas, sendo os maiores valores obtidos para o Argissolo Vermelho e o Chernossolo Argilúvico, os quais possuem maior riqueza de minerais fontes destes nutrientes, com o emprego das menores concentrações de ácido cítrico (0,01 e 0,001 mol L⁻¹). O IMA se correlacionou significativamente com a cinética de liberação de K, Ca e Mg, indicando que este atributo compreende um parâmetro informativo da capacidade dos solos fornecerem estes nutrientes às plantas e apresenta potencial para ser incluído no planejamento das adubações dos solos destinadas aos plantios com a espécie.

Palavras-chave: Manejo florestal, *Eucalyptus sp*, Modelos cinéticos, Nutrição florestal.

Abstract

The kinetics of nutrients release can assist in the development of more efficient fertilizer management and rationalization in the use of nutrients in soils cultivated with eucalyptus. The study aimed to evaluate the kinetics of release of potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in citric acid solution in different concentrations and the relationship between the kinetics of release of these nutrients and the mean annual increment (MAI) of eucalyptus at seven years of age, including soils of the geomorphological provinces of Periphery Depression, Rio Grande Shield and Coastal Plain of Rio Grande do Sul State. The release kinetics were evaluated in citric acid extractor, in equilibrium times which ranged from 2 to 1,808 hours. The most consistent adjustments of release kinetics of K, Ca and Mg were obtained with solutions of citric acid of 0.01 and 0.001 mol L⁻¹, at the depths 0 – 0,20 and 0,21 – 0,40 m of all soils. The kinetics of release of K, Ca and Mg varied between soils, the depths and between concentrations of citric acid evaluated, with the highest values of kinetics of release obtained in the Red Argisol and Argiluvic Chernosol that have greater wealth of mineral sources of these nutrients with lower concentrations of citric acid (0.01 and 0.001 mol L⁻¹). The MAI correlated significantly with the kinetics of release K, Ca and Mg, indicating that the kinetics of release comprises an informative parameter of the capacity of these soils to supply nutrients for plants; and should be included in the planning of the fertilization of soils destined for eucalyptus plantations.

Keywords: Forestry management, *Eucalyptus sp.*, Kinetics models, Forest nutrition.

¹Doutorando em Ciência do Solo. UFLA – Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-000 – Lavras, MG. E-mail: helcioagro@gmail.com

²Pesquisador. – ITV DS – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável. Rua Boaventura da Silva – de 415/416 a 1147/1148 – Nazaré – 66055-090 – Belém, PA. E-mail: antonio.furtini@itv.org

³Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo. UFLA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-000 – Lavras, MG. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.br

⁴Professor Associado do Departamento de Solos. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Faculdade de Agronomia. Caixa Postal, 15100 - Av. Bento Gonçalves, 7712 – 90001-970 – Porto Alegre, RS. E-mail: alberto.inda@ufrgs.br

⁵Engenheiro Florestal. CMPC Celulose do Brasil Ltda. E-mail: efaraujo@cmpcrs.com.br

INTRODUÇÃO

Os plantios de eucalipto no Brasil ocupam aproximadamente 5,1 milhões de hectares, apresentam produtividade média de 41 m³ ha⁻¹ e produção de madeira estimada em aproximadamente 210 milhões de m³ no ano de 2012 (ABRAF, 2013). Para manter índices de produtividade satisfatórios o eucalipto requer, dentre outros cuidados, um manejo nutricional adequado, principalmente em K, Ca e Mg, os quais representam os nutrientes mais exigidos pelas diversas espécies e clones desta cultura (ANDRADE et al., 2011). Para produzir 100 toneladas de biomassa, a espécie demanda, em média, 154 kg de K, 270 kg de Ca e 55 kg de Mg, sendo as maiores exigências durante as fases anteriores aos 4,5 anos (SANTANA et al., 2008), em função da maior exigência nutricional das plantas para formação da sua copa (SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001).

A principal forma de suprimento de K, Ca e Mg aos plantios de eucalipto é via adição de fertilizantes minerais (GONÇALVES, 1995; SILVEIRA et al., 2001). No entanto, um percentual considerável das demandas de K, Ca e Mg pode ser disponibilizado naturalmente para as plantas a partir das reservas minerais existentes em solos pedologicamente jovens e ricos em minerais fontes destes nutrientes, já que estas contribuem significativamente para nutrição de espécies florestais (MELO et al., 1995; ALVES et al., 2013). Ao estudarem a caracterização química e mineralógica de áreas cultivadas com eucalipto, Castro et al. (2010) verificaram que os solos que possuem maiores proporções de minerais fontes de K, Ca e Mg também expressaram maior IMA. No entanto, a contribuição das formas minerais de K, Ca e Mg para o crescimento e desenvolvimento dos plantios de eucalipto depende, dentre outros fatores, da cinética de liberação destes nutrientes das reservas minerais presentes nos solos.

Diversos autores têm enfatizado a necessidade da realização de pesquisas que quantifiquem a cinética de liberação destes nutrientes em solos (MARTIN; SPARKS, 1985; COMERFORD et al., 1990; SIMARD et al., 1992; CASTRO et al., 2010), pois estudos dessa natureza, podem auxiliar na compreensão da dinâmica de liberação destes nutrientes pelos solos, fornecendo subsídios que permitem realizar adequações no manejo de adubações (CASTILHOS; MEURER, 2001) e maximizar a racionalização do uso de fertilizantes. A avaliação da cinética de liberação de K, Ca e Mg em solos é realizada por meio de estudos de laboratórios que simulam a dinâmica de absorção destes nutrientes pelas plantas em condições de campo (HAVLIN et al., 1985), empregando soluções salinas (SPARKS; JARDINE, 1984; JALALI, 2006; HOSSEINPUR et al., 2012), resinas trocadoras (AGBENIN; RAIJ, 1999; MEURER; ROSSO, 1997) e ácidos orgânicos (CASTILHOS; MEURER, 2001; SILVA et al., 2008; BUSCHLE et al., 2010). No entanto, os ácidos orgânicos são considerados mais adequados (SIMARD et al., 1992) pois além de estarem envolvidos no intemperismo e alteração dos minerais, são sintetizados e exsudados no solo pelas raízes dos vegetais (MELO et al., 2009).

Diante do exposto o presente estudo teve como objetivos avaliar a cinética de liberação de K, Ca e Mg em solução de ácido cítrico em concentrações distintas e a relação entre cinética de liberação destes nutrientes e o IMA de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, abrangendo solos das províncias geomorfológicas da Depressão Periférica, Escudo Sul-riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em solos obtidos de áreas cultivadas com *Eucalyptus grandis* localizadas nos municípios de Guaíba, Butiá, Arroio dos Ratos, Minas do Leão, Santa Margarida do Sul e São Gabriel do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0 – 0,20 e 0,21 – 0,40 m de sete classes de solos, a saber: Argissolo Vermelho distrófico – PVd, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico – PVAd, Argissolo Amarelo distrófico – PAD, Chernossolo Argilúvico órtico – MTo, Cambissolo Háptico eutrófico – CXv, Neossolo Regolítico distrófico – RRd e Neossolo Quartzarênico órtico - RQo. O clima da região é classificado como Cfa, subtropical úmido, com precipitação média de 1.500 mm ano⁻¹, apresentando chuvas durante todos os meses do ano (FEPAGRO, 2012). A caracterização química e textural dos solos (Tabela 1) foi realizada na fração terra fina seca ao ar (TFSA), segundo Embrapa (2009). A análise mineralógica das amostras de cada solo (Tabela 2) foi realizada por difração de raios-X, nas frações areia e silte pelo método

do pó e na argila pelas lâminas orientadas (MOORE; REYNOLDS, 1989). Para cada classe de solo também foi obtido o incremento médio anual (IMA) do *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade. O valor do IMA é uma medida que expressa a média do crescimento total da árvore para uma determinada idade, sendo calculado conforme descrito em Reatto et al. (1998).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.
Table 1. Chemical and physical attributes of soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	T	Al ³⁺	MOS	Areia	Silte	Argila
		mg dm ⁻³	cmol _c kg ⁻¹					%		
----- 0 – 0,20 m -----										
PVd	6,4	42	4,60	1,40	7,40	0,00	2,40	620	200	180
PVAd	6,3	33	3,00	0,70	5,10	0,00	1,60	700	230	70
PAd	5,3	31	2,20	0,60	9,90	1,40	2,00	480	260	260
MTo	5,4	73	10,80	5,10	23,96	1,00	3,14	510	270	220
RRd	5,3	67	0,90	0,40	4,38	0,60	1,52	760	120	120
CXv	5,4	125	2,80	1,00	9,76	0,40	2,36	590	210	200
RQo	5,3	16	0,70	0,40	2,63	0,20	0,75	940	30	30
----- 0,21 – 0,40 m -----										
PVd	5,8	20	1,90	1,20	6,80	0,60	1,60	570	230	200
PVAd	5,7	20	1,70	0,40	5,40	0,70	1,20	680	220	100
PAd	4,9	17	0,50	0,20	14,50	3,60	1,20	450	260	290
MTo	5,9	22	10,60	5,30	24,76	2,40	1,64	440	270	290
RRd	5,3	56	0,80	0,30	5,76	1,20	1,64	720	150	130
CXv	5,4	55	3,00	0,50	8,16	0,60	1,64	600	180	220
RQo	4,9	12	0,30	0,10	1,62	0,30	0,34	940	30	30

pH: potencial hidrogeniônico em água na relação solo/solução de 1:2,5; K⁺: potássio disponível em Mehlich-1; Ca²⁺: cálcio, Mg²⁺: magnésio, Al³⁺: alumínio trocáveis em cloreto de potássio (KCl 1,0 mol L⁻¹); T: capacidade de troca de cátions a pH 7,0; MOS: matéria orgânica do solo.

Tabela 2. Material de origem e mineralogia das frações areia, silte e argila de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.

Table 2. Parent material and mineralogy of sand, silt and clay of soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Materiais de Origem	Frações do solo		
		Areia	Silte	Argila
----- Minerais -----				
----- 0 – 0,20 m -----				
PVd	Granito	Qz(85) ¹ , IL(5), Fp(10)	Qz(85), Hm(5), An(5), Fp(5)	Mi(20), Ct(60), Qz(20)
PVAd	Granito	Qz(90), Fp(5), Hm(5)	Qz(85), Cb(5), Fp(5), Hm(5)	Ct(85), Qz(15)
PAd	Arenito e Siltito	Qz(95), IL(5)	Qz(90), Cb(5), Fp(5)	Ct(80), Qz(20)
MTo	Granito	An(5), Fp(10), Qz(85)	An(5), Fp(15), Qz(80)	Mi(5), Ct(85), Qz(10)
RRd	Argilito	Qz(100)	Ct(5), Fp(5), Qz(90)	Ct(85), Mi(15)
CXv	Granito	IL(5), Fp(5), Qz(90)	Fp(5), Qz(95)	Ct(70), Fp(5), Mi(25)
RQo	Sedimentos Arenosos	IL(5), Qz(95)	Qz(100)	Ct(5), Qz(95)
----- 0,21 – 0,40 m -----				
PVd	Granito	Qz(95), IL(5)	Qz(90), An(5), Fp(5)	Mi(10), Ct(80), Qz(10)
PVAd	Granito	Qz(95), Hm(5)	Qz(95), Hm(5)	Ct(90), Qz(5), Gb(5)
PAd	Arenito e Siltito	Qz(95), IL(5)	Qz(90), IL(5), Cb(5)	Ct(80), Qz(20)
MTo	Granito	An(5), Fp(15), Qz(80)	An(5), Fp(15), Qz(80)	Ct(80), Mi(15), Qz(5)
RRd	Argilito	Qz(100)	Ct(5), Fp(5), Qz(90)	Ct(85), Mi(10), Fp(5)
CXv	Granito	Fp(5), IL(5), Qz(90)	Ct(5), Fp(5), IL(5), Qz(85)	Ct(70), Mi(25), Fp(5)
RQo	Sedimentos Arenosos	IL(5), Qz(95)	Qz(100)	-

An: anatásio, Ct: caulinita, Cb: cristobalita, Fp: feldspato, Gb: Gibbsita, Hm: hematita, Il: ilmenita, Mi: mica e Qz: quartzo. ¹Números entre parênteses correspondem ao teor semi-quantificado do mineral na fração granulométrica. Adaptado de Castro et al. (2010).

Para avaliação da cinética de liberação de K, Ca e Mg, foram realizadas extrações sequenciais nos solos com solução de ácido cítrico preparadas nas concentrações de 0,1; 0,01 e 0,001 mol L⁻¹, sendo estas as concentrações que têm demonstrado maior precisão em estudos de cinética de liberação destes nutrientes em solos (SIMARD et al., 1992; CASTILHOS; MEURER, 2001; SILVA et al., 2008). As soluções de ácido cítrico foram preparadas em solução de NaCl a 0,015 mol L⁻¹, para manter a sua força iônica em valores similares aos encontrados em condições naturais para solos (CAMPOS

et al., 2006). O pH das soluções de ácido cítrico foi ajustado com NaOH a 0,1 mol L⁻¹ mantendo os seus valores em aproximadamente 5,6.

As extrações de K, Ca e Mg foram realizadas conforme metodologia descrita em Sparks (1989). Inicialmente foram pesados 3 g de TFSA, transferidos para tubos de centrífuga com capacidade para 50 mL e adicionados 30 mL de ácido cítrico, sendo todas as análises realizadas em triplicata. Os tubos de centrífuga com a mistura do solo e da solução de ácido cítrico foram deixados em repouso durante os seguintes tempos de equilíbrio: 2, 8, 20, 55, 90, 148, 245, 403, 655, 1.096 e 1.808 horas. Após atingir cada tempo, as amostras foram centrifugadas a 3.200 g, durante 15 minutos, para separar e coletar o sobrenadante. Os teores de Ca e Mg foram aferidos separadamente no sobrenadante, por espectrometria de absorção atômica e os teores de K foram determinados em fotometria de chama.

A estimação da cinética de liberação de K, Ca e Mg foi realizada por meio de equações matemáticas, empregando os modelos de ordem zero, primeira ordem, de Elovich e parabólica de difusão, detalhadas em Sparks (1989).

$$\text{Equação de ordem zero} \rightarrow K_{\infty} - K_t = a - b t$$

$$\text{Equação de primeira ordem} \rightarrow \ln(K_{\infty} - K_t) = a - b t$$

$$\text{Equação de Elovich} \rightarrow K_t = a - b \ln(t)$$

$$\text{Equação de parabólica de difusão} \rightarrow \left(\frac{K_t}{K_{\infty}}\right) = a - b t^{0,5}$$

Onde:

Kt: quantidade acumulada do nutriente (K, Ca ou Mg) liberada até o tempo t;

K: máximo teor do nutriente (K, Ca ou Mg) liberado;

t: tempo (horas);

a: intercepto no eixo das ordenadas;

b: coeficiente de velocidade de liberação do nutriente (K, Ca ou Mg).

A escolha do modelo que melhor se ajustou aos resultados foi feita com base nos valores de coeficiente de determinação (R²) e do erro padrão da estimativa (EP), empregando a equação abaixo:

$$\text{Erro padrão da estimativa} \rightarrow EP = \frac{\sum (K_t - K_t^*)}{(n - 2)^{0,5}}$$

Onde:

k_t e k_t^{*} são as quantidades de nutrientes (K, Ca ou Mg) observadas e estimadas, respectivamente, no tempo t;

n: número de observações.

A cinética de liberação de K, Ca e Mg obtida pelo modelo que apresentou os maiores valores de R² e menores de EP foi correlacionada com o IMA de *Eucalyptus grandis* (Tabela 3) aos sete anos de idade.

Tabela 3. Médias e desvio padrão do incremento médio anual (IMA) de *Eucalyptus grandis* estimado para os sete anos de idade, em solos do Estado do Rio Grande do Sul.

Table 3. Mean and standard deviations of the mean annual increment (MAI) of *Eucalyptus grandis* estimated at age seven years in soils cultivated with eucalyptus in Rio Grande do Sul State.

Solos	IMA médio (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Desvio Padrão
PVd	49,05	0,56
PVAd	46,58	0,45
PAd	42,58	0,02
MTo	54,94	0,77
RRd	42,60	0,01
CXv	47,59	0,44
RQo	30,72	1,79

Média de quatro repetições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa (EP) variaram entre as concentrações de ácido cítrico e entre os modelos cinéticos testados para o K, Ca e Mg (Tabela 4, 5 e 6). Na concentração de ácido cítrico $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ os melhores ajustes da cinética de liberação foram obtidos pelas equações de Elovich para o K, ordem zero para o Ca e para o Mg, nas duas profundidades dos solos estudados. Para as demais concentrações de ácido cítrico ($0,01$ e $0,001 \text{ mol L}^{-1}$), a equação de Elovich apresentou maior precisão para estimar a cinética de liberação de K, Ca e Mg, nas duas profundidades dos solos estudados.

Tabela 4. Coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão da estimativa (EP) para equações (ordem zero, primeira ordem, parabólica de difusão e Elovich) utilizadas na descrição da cinética de liberação de K de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.

Table 4. Coefficient of determination (R^2) and standard error of the estimated (EP) for equations (zero order, first order, parabolic diffusion and Elovich) used to describe the kinetics of K release from soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Ordem zero		Primeira ordem		Parabólica		Elovich	
	R^2	EP	R^2	EP	R^2	EP	R^2	EP
----- Acido cítrico $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,49	0,00	0,87	5,51	0,69	0,52	0,94	0,00
PVAd	0,38	0,00	0,75	6,53	0,58	0,41	0,90	0,00
PAd	0,19	0,00	0,41	6,25	0,34	0,23	0,73	0,00
MTo	0,59	0,00	0,95	3,45	0,79	0,69	0,95	0,00
RRd	0,38	0,00	0,82	4,89	0,57	0,40	0,89	0,00
CXv	0,53	0,00	0,93	3,60	0,73	0,59	0,94	0,00
RQo	0,14	0,00	0,20	7,77	0,28	0,21	0,67	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,48	0,00	0,86	5,19	0,69	0,49	0,94	0,00
PVAd	0,35	0,00	0,76	6,12	0,54	0,39	0,88	0,00
PAd	0,24	0,00	0,56	6,93	0,42	0,30	0,80	0,00
MTo	0,60	0,00	0,94	3,56	0,80	0,64	0,95	0,00
RRd	0,30	0,00	0,70	5,63	0,49	0,34	0,84	0,00
CXv	0,43	0,00	0,87	4,14	0,63	0,45	0,91	0,00
RQo	0,14	0,00	0,20	8,45	0,28	0,21	0,67	0,00
----- Acido cítrico $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,55	0,00	0,80	0,90	0,75	0,16	0,97	0,00
PVAd	0,65	0,00	0,93	4,97	0,86	0,75	0,97	0,00
PAd	0,45	0,00	0,74	1,40	0,66	0,17	0,95	0,00
MTo	0,67	0,00	0,97	4,87	0,89	1,39	0,97	0,00
RRd	0,60	0,00	0,95	2,72	0,80	0,73	0,98	0,00
CXv	0,62	0,00	0,96	5,57	0,84	1,11	0,98	0,00
RQo	0,18	0,00	0,33	6,02	0,34	0,20	0,73	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,85	0,00	0,87	0,16	0,95	0,07	0,88	0,00
PVAd	0,78	0,00	0,96	0,48	0,94	0,26	0,93	0,00
PAd	0,72	0,00	0,86	0,03	0,85	0,10	0,89	0,00
MTo	0,51	0,00	0,91	16,53	0,75	1,47	0,99	0,00
RRd	0,52	0,00	0,88	7,45	0,75	0,67	0,98	0,00
CXv	0,62	0,00	0,96	4,43	0,84	1,04	0,98	0,00
RQo	0,16	0,00	0,25	6,39	0,31	0,19	0,71	0,00
----- Acido cítrico $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,65	0,00	0,92	2,33	0,86	0,39	0,98	0,00
PVAd	0,68	0,00	0,96	0,62	0,87	1,04	0,98	0,00
PAd	0,60	0,00	0,94	2,41	0,81	0,47	0,99	0,00
MTo	0,62	0,00	0,96	3,37	0,83	0,82	0,98	0,00
RRd	0,66	0,00	0,97	2,50	0,86	0,76	0,97	0,00
CXv	0,67	0,00	0,97	2,52	0,87	0,98	0,98	0,00
RQo	0,18	0,00	0,27	5,80	0,34	0,16	0,73	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,71	0,00	0,92	1,34	0,89	0,30	0,95	0,00
PVAd	0,52	0,00	0,89	4,25	0,75	0,48	0,98	0,00
PAd	0,65	0,00	0,94	1,45	0,85	0,34	0,98	0,00
MTo	0,46	0,00	0,87	17,93	0,71	1,24	0,98	0,00
RRd	0,58	0,00	0,92	5,17	0,80	0,65	0,98	0,00
CXv	0,64	0,00	0,97	4,42	0,86	1,00	0,98	0,00
RQo	0,19	0,00	0,30	5,83	0,36	0,17	0,75	0,00

Tabela 5. Coeficiente de determinação (R²) e erro padrão da estimativa (EP) para equações (ordem zero, primeira ordem, parabólica de difusão e Elovich) utilizadas na descrição da cinética de liberação de Ca de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.

Table 5. Coefficient of determination (R²) and standard error of the estimated (EP) for equations (zero order, first order, parabolic diffusion and Elovich) used to describe the kinetics of Ca release from soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Ordem zero		Primeira ordem		Parabólica		Elovich	
	R ²	EP	R ²	EP	R ²	EP	R ²	EP
----- Ácido cítrico 0,1 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,91	0,00	0,98	0,23	0,97	0,12	0,80	0,00
PVAd	0,91	0,00	0,95	0,30	0,96	0,86	0,70	0,00
PAd	0,92	0,00	0,96	0,18	0,96	0,22	0,76	0,00
MTo	0,84	0,00	0,96	0,23	0,90	0,28	0,81	0,00
RRd	0,96	0,00	0,96	0,55	0,93	0,23	0,65	0,00
CXv	0,92	0,00	0,97	0,47	0,95	0,26	0,74	0,00
RQo	0,92	0,00	0,97	0,43	0,95	0,27	0,75	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,96	0,00	0,99	0,34	0,97	0,15	0,70	0,00
PVAd	0,94	0,00	0,98	0,27	0,98	0,19	0,75	0,00
PAd	0,95	0,00	0,97	0,53	0,96	0,22	0,72	0,00
MTo	0,98	0,00	0,98	0,85	0,90	0,25	0,57	0,00
RRd	0,87	0,00	0,96	0,32	0,90	0,26	0,76	0,00
CXv	0,93	0,00	0,97	0,47	0,93	0,23	0,70	0,00
RQo	0,97	0,00	0,96	0,61	0,92	0,25	0,60	0,00
----- Ácido cítrico 0,01 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,55	0,00	0,80	0,90	0,75	0,16	0,97	0,00
PVAd	0,65	0,00	0,93	4,97	0,86	0,75	0,97	0,00
PAd	0,45	0,00	0,74	1,40	0,66	0,17	0,95	0,00
MTo	0,41	0,00	0,83	6,17	0,64	0,51	0,96	0,00
RRd	0,66	0,00	0,82	0,06	0,80	0,09	0,93	0,00
CXv	0,39	0,00	0,67	3,62	0,62	0,24	0,96	0,00
RQo	0,69	0,00	0,88	0,40	0,88	0,16	0,96	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,85	0,00	0,87	0,16	0,95	0,07	0,88	0,00
PVAd	0,78	0,00	0,96	0,48	0,94	0,26	0,93	0,00
PAd	0,72	0,00	0,86	0,03	0,85	0,10	0,89	0,00
MTo	0,37	0,00	0,77	7,78	0,59	0,52	0,94	0,00
RRd	0,68	0,00	0,72	0,00	0,86	0,00	0,97	0,00
CXv	0,42	0,00	0,74	2,96	0,64	0,26	0,96	0,00
RQo	0,85	0,00	0,94	0,17	0,95	0,10	0,86	0,00
----- Ácido cítrico 0,001 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,65	0,00	0,92	2,33	0,86	0,39	0,98	0,00
PVAd	0,68	0,00	0,96	0,62	0,87	1,04	0,98	0,00
PAd	0,60	0,00	0,94	2,41	0,81	0,47	0,99	0,00
MTo	0,65	0,00	0,96	2,49	0,86	0,69	0,99	0,00
RRd	0,74	0,00	0,95	4,19	0,93	0,38	0,94	0,00
CXv	0,66	0,00	0,95	2,14	0,87	0,45	0,98	0,00
RQo	0,71	0,00	0,95	1,35	0,91	0,36	0,96	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,71	0,00	0,92	1,34	0,89	0,30	0,95	0,00
PVAd	0,52	0,00	0,89	4,25	0,75	0,48	0,98	0,00
PAd	0,65	0,00	0,94	1,45	0,85	0,34	0,98	0,00
MTo	0,59	0,00	0,93	4,30	0,82	0,66	0,99	0,00
RRd	0,61	0,00	0,92	2,86	0,83	0,45	0,99	0,00
CXv	0,59	0,00	0,93	4,30	0,82	0,66	0,99	0,00
RQo	0,80	0,00	0,94	0,54	0,95	0,25	0,90	0,00

Tabela 6. Coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão da estimativa (EP) para equações (ordem zero, primeira ordem, parabólica de difusão e Elovich) utilizadas na descrição da cinética de liberação de Mg de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.

Table 6. Coefficient of determination (R^2) and estimated standard error (EP) for equations (zero order, first order, parabolic diffusion and Elovich) used to describe the kinetics of Mg release from soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Ordem zero		Primeira ordem		Parabólica		Elovich	
	R^2	EP	R^2	EP	R^2	EP	R^2	EP
----- Ácido cítrico 0,1 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,91	0,00	0,98	0,23	0,97	0,12	0,80	0,00
PVAd	0,91	0,00	0,95	0,30	0,96	0,86	0,70	0,00
PAd	0,92	0,00	0,96	0,18	0,96	0,22	0,76	0,00
MTo	0,93	0,00	0,94	1,28	0,97	0,42	0,78	0,00
RRd	0,79	0,00	0,86	0,09	0,92	0,08	0,91	0,00
CXv	0,87	0,00	0,98	0,01	0,99	0,20	0,86	0,00
RQo	0,78	0,00	0,46	0,22	0,95	0,05	0,89	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,96	0,00	0,99	0,34	0,97	0,15	0,70	0,00
PVAd	0,94	0,00	0,98	0,27	0,98	0,19	0,75	0,00
PAd	0,95	0,00	0,97	0,53	0,96	0,22	0,72	0,00
MTo	0,92	0,00	0,94	0,95	0,95	0,36	0,76	0,00
RRd	0,78	0,00	0,71	0,00	0,94	0,06	0,93	0,00
CXv	0,86	0,00	0,93	0,08	0,98	0,11	0,86	0,00
RQo	0,81	0,00	0,43	0,35	0,96	0,06	0,84	0,00
----- Ácido cítrico 0,01 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,55	0,00	0,80	0,90	0,75	0,16	0,97	0,00
PVAd	0,65	0,00	0,93	4,97	0,86	0,75	0,97	0,00
PAd	0,45	0,00	0,74	1,40	0,66	0,17	0,95	0,00
MTo	0,70	0,00	0,97	2,83	0,90	0,72	0,96	0,00
RRd	0,63	0,00	0,60	0,59	0,84	0,09	0,99	0,00
CXv	0,65	0,00	0,80	1,06	0,86	0,17	0,98	0,00
RQo	0,14	0,00	0,10	7,58	0,29	0,18	0,65	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,85	0,00	0,87	0,16	0,95	0,07	0,88	0,00
PVAd	0,78	0,00	0,96	0,48	0,94	0,26	0,93	0,00
PAd	0,72	0,00	0,86	0,03	0,85	0,10	0,89	0,00
MTo	0,39	0,00	0,84	11,49	0,61	0,81	0,94	0,00
RRd	0,59	0,00	0,50	0,36	0,81	0,07	0,99	0,00
CXv	0,63	0,00	0,80	0,78	0,84	0,15	0,99	0,00
RQo	0,66	0,00	0,04	0,06	0,85	0,02	0,97	0,00
----- Ácido cítrico 0,001 mol L ⁻¹ -----								
0 – 0,20 m								
PVd	0,65	0,00	0,92	2,33	0,86	0,39	0,98	0,00
PVAd	0,68	0,00	0,96	0,62	0,87	1,04	0,98	0,00
PAd	0,60	0,00	0,94	2,41	0,81	0,47	0,99	0,00
MTo	0,75	0,00	0,97	1,72	0,93	0,59	0,93	0,00
RRd	0,71	0,00	0,75	1,15	0,92	0,16	0,93	0,00
CXv	0,77	0,00	0,95	0,54	0,95	0,25	0,93	0,00
RQo	0,68	0,00	0,31	0,23	0,89	0,04	0,97	0,00
0,21 – 0,40 m								
PVd	0,71	0,00	0,92	1,34	0,89	0,30	0,95	0,00
PVAd	0,52	0,00	0,89	4,25	0,75	0,48	0,98	0,00
PAd	0,65	0,00	0,94	1,45	0,85	0,34	0,98	0,00
MTo	0,53	0,00	0,89	8,97	0,78	0,81	0,98	0,00
RRd	0,71	0,00	0,69	0,98	0,92	0,13	0,90	0,00
CXv	0,74	0,00	0,86	0,87	0,93	0,18	0,94	0,00
RQo	0,79	0,00	0,39	0,06	0,96	0,04	0,92	0,00

Apesar da cinética de liberação de K, Ca e Mg ter sido calculada pelas equações de ordem zero, primeira ordem, parabólica de difusão e equação de Elovich, foram apresentados apenas os resultados obtidos pelo modelo de Elovich (Tabela 7), o qual se ajustou de forma mais precisa aos resultados, conforme indicado pelos maiores valores de R^2 e menores valores de EP. Estudos sobre cinética de liberação de K, Ca e Mg pelos solos e seus constituintes têm demonstrado ajustes mais adequados quando se utiliza a equação de Elovich (SIMARD et al., 1989; AGBENIN; RAIJ, 1999; SILVA et al., 2008; HOSSEINPUR et al., 2012), o que justifica o emprego deste modelo na descrição de processos cinéticos em sistemas heterogêneos. Em estudo realizado por Silva et al. (2008), ao respeito da cinética de liberação de potássio em solos, os autores obtiveram melhores ajustes com a equação de Elovich ($R^2 = 0,93$ e $EP = 3,75$) quando a extração foi realizada com ácido cítrico $0,001 \text{ mol L}^{-1}$. Essa equação apresenta maior eficiência na descrição de processos cinéticos que ocorrem em sistemas constituídos por partículas heterogêneas (SPARKS, 1989). Tanto em solos quanto em sedimentos, os processos cinéticos tendem a ocorrer de forma mais lenta, em função da mistura complexa de superfícies de adsorção, da composição e do tamanho de partículas.

Contudo, vale ressaltar que o mérito das equações empregadas na descrição da cinética de liberação de nutrientes em solos não deve ser fundamentado apenas no melhor ajuste da modelagem matemática, mas também na utilidade e na significância da informação que o modelo representa (SPARKS; JARDINE, 1984). Dessa forma, a escolha do modelo mais adequado para estimar corretamente a cinética de liberação de nutrientes pelos solos deve ser estabelecida também pelas relações entre as quantidades estimadas e as absorvidas pelas plantas.

A cinética de liberação de K seguiu a mesma tendência para as três concentrações de ácido cítrico empregadas como extratores ($0,1$, $0,01$ e $0,001 \text{ mol L}^{-1}$), nas duas profundidades dos solos estudados (Tabela 7). Os maiores valores da cinética de liberação deste nutriente foram obtidos no solo MTo com o extrator ácido cítrico $0,01$ em ambas profundidades e $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ para a profundidade de $0,21 - 0,40 \text{ m}$. Em estudos desenvolvidos por Silva et al. (2008) e Melo et al. (2005) os autores também observaram maior cinética de liberação de K no extrator ácido cítrico, em concentrações similares às utilizadas neste estudo ($0,001 \text{ mol L}^{-1}$). Provavelmente, os maiores valores de cinética de liberação de K na profundidade de $0,21 - 0,40 \text{ m}$ podem estar associadas à maior riqueza de feldspatos e micas (Tabela 2), os quais constituem reservas de K em longo prazo (REATTO et al., 1998) e são mais frequentemente encontradas em solos (KÄMPF et al., 2009).

As maiores cinéticas de liberação de Ca foram observadas na profundidade de $0 - 0,20 \text{ m}$ de todos os solos estudados, sendo os maiores valores observados no solo PVd para soluções de ácido cítrico $0,1$, $0,01$ e $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ (Tabela 7). Este resultado pode ser resultante da dissolução dos minerais de feldspatos e micas, os quais estão presentes em maiores proporções na profundidade mais superficial destes solos (Tabela 2) e constituem importantes fontes de Ca (CURI et al., 2005). Os menores valores da cinética de liberação do Ca verificada no extrator ácido cítrico $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Tabela 7) podem ser resultantes da interação química entre o ácido cítrico e o Ca, o que pode ter promovido a precipitação do nutriente na forma de quelatos, devido ao efeito complexante dos radicais orgânicos presentes neste ácido. Segundo Freitas et al. (2009), o ácido cítrico é um composto orgânico tricarbóxico onde a elevada funcionalidade dos seus radicais é capaz de promover complexação do Ca, formando moléculas facilmente precipitadas na solução, o que pode ter reduzido os teores do nutriente nos extratos analisados.

Para o Mg, a cinética de liberação foi mais elevada na profundidade de $0 - 0,20 \text{ m}$ para o solo PVd, na solução de ácido cítrico de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Tabela 7). Ao estudarem a cinética de liberação de nutrientes pelos solos empregando solução de ácido cítrico, Simard et al. (1989) encontraram resultados similares aos obtidas para o Mg neste estudo. A maior concentração de ácido cítrico, de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, pode ter potencializado a solubilização das micas e dos feldspatos, os quais constituem importantes fontes de Mg (MELO et al., 2000) e estão presentes em maiores proporções nos solos PVd e MTo (Tabela 2), o que proporcionou uma maior cinética de liberação deste nutriente. Além disso, é necessário considerar que o Mg presente na estrutura de minerais é facilmente solubilizado e liberado para a solução do solo, mesmo quando submetido a extrações sucessivas com soluções diluídas de ácidos orgânicos (MELO et al., 2009).

Tabela 7. Coeficientes de velocidade (b) da equação de Elovich para cinética de liberação de K, Ca e Mg extraídos por diferentes concentrações de ácido cítrico de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.

Table 7. Rate coefficients (b) of the Elovich equation for kinetics of release of K, Ca and Mg extracted by different concentrations of citric acid in soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Ácido cítrico (mol L ⁻¹)			Média de cada solo
	0,1	0,01	0,001	
K (mg kg⁻¹ h⁻¹)				
----- 0 – 0,20 m -----				
PVd	3,69	5,71	5,58	4,99
PVAd	4,33	7,08	7,36	6,26
PAd	2,45	2,63	2,43	2,50
MTo	5,42	10,28	6,32	7,34
RRd	3,59	5,70	5,71	5,00
CXv	4,74	8,49	7,35	6,86
RQo	2,28	2,10	1,71	2,03
----- 0,21 – 0,40 m -----				
PVd	3,62	5,76	6,38	5,25
PVAd	4,06	7,88	9,36	7,10
PAd	2,97	3,57	3,69	3,41
MTo	4,99	11,97	10,35	9,10
RLd	3,17	5,43	5,11	4,57
CXv	3,82	8,03	7,58	6,48
RQo	2,27	2,05	1,78	2,03
Ca (mg kg⁻¹ h⁻¹)				
----- 0 – 0,20 m -----				
PVd	5,27	5,68	7,88	6,28
PVAd	0,82	1,25	3,00	1,69
PAd	1,40	1,45	3,69	2,18
MTo	1,91	4,44	4,48	3,61
RRd	1,34	0,72	2,71	1,59
CXv	1,63	2,15	3,36	2,38
RQo	1,72	1,22	2,63	1,86
----- 0,21 – 0,40 m -----				
PVd	1,18	1,84	3,88	2,30
PVAd	0,93	0,45	2,21	1,20
PAd	1,35	0,77	2,64	1,59
MTo	1,69	4,66	5,15	3,83
RRd	1,39	0,56	2,45	1,47
CXv	1,44	2,24	3,48	2,39
RQo	1,40	0,67	1,70	1,26
Mg (mg kg⁻¹ h⁻¹)				
----- 0 – 0,20 m -----				
PVd	8,50	6,61	4,31	6,47
PVAd	0,87	1,31	2,34	1,51
PAd	0,97	0,91	0,87	0,92
MTo	2,65	5,29	4,20	4,05
RRd	0,54	0,70	1,12	0,79
CXv	1,34	1,29	1,74	1,46
RQo	0,37	1,91	0,31	0,86
----- 0,21 – 0,40 m -----				
PVd	1,37	2,33	2,64	2,11
PVAd	0,62	2,13	2,50	1,75
PAd	0,64	0,51	1,17	0,77
MTo	2,30	7,17	6,45	5,31
RRd	0,45	0,53	0,91	0,63
CXv	0,71	1,14	1,31	1,05
RQo	0,37	0,13	0,28	0,26

Tabela 8. Coeficientes de correlação (r) de Person entre o incremento médio anual (IMA) de eucalipto aos sete anos de idade e cinética de liberação de K, Ca e Mg, estimada pela equação de Elovich, em três concentrações de ácido cítrico de solos cultivados com *Eucalyptus grandis* no Estado do Rio Grande do Sul.**Table 8.** Correlation coefficients (r) between the mean annual increment (MAI) of eucalyptus at seven-years of age and rate of release of K, Ca and Mg, estimated by the Elovich equation in three concentrations of citric acid in soils cultivated with *Eucalyptus grandis* in Rio Grande do Sul State.

Solos	Incremento Médio Anual (IMA)					
	0 – 0,20 m			0,21 – 0,40 m		
	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
Ácido cítrico 0,1 mol L⁻¹						
PVd	0,97*	0,99**	0,91 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,88 ^{ns}
PVAd	0,94 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,96*	0,90 ^{ns}	0,98*	0,98*
PAd	0,99**	0,91 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,99**	0,93 ^{ns}	0,92 ^{ns}
MTo	0,99*	0,99**	0,95*	0,97*	0,92 ^{ns}	0,98*
RRd	0,99**	0,96*	0,94 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,96*	0,99**
CXv	0,89 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,96*	0,99**	0,99*	0,98*
RQo	0,78 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,86 ^{ns}
Ácido cítrico 0,01 mol L⁻¹						
PVd	0,87 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,98*	0,98*	0,87 ^{ns}
PVAd	0,99**	0,99**	0,99**	0,90 ^{ns}	0,99**	0,98*
PAd	0,98*	0,99**	0,94 ^{ns}	0,97*	0,98*	0,97*
MTo	0,97*	0,95*	0,89 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,90 ^{ns}
RRd	0,99**	0,98*	0,99**	0,99**	0,99**	0,90 ^{ns}
CXv	0,96*	0,99**	0,99**	0,99**	0,92 ^{ns}	0,90 ^{ns}
RQo	0,76 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,73 ^{ns}
Ácido cítrico 0,001 mol L⁻¹						
PVd	0,97*	0,95*	0,99**	0,89 ^{ns}	0,95*	0,93 ^{ns}
PVAd	0,98*	0,88 ^{ns}	0,96*	0,99**	0,87 ^{ns}	0,94 ^{ns}
PAd	0,97*	0,99**	0,97*	0,97*	0,87 ^{ns}	0,98*
MTo	0,97*	0,97*	0,98*	0,96*	0,96*	0,92 ^{ns}
RRd	0,99**	0,99**	0,94 ^{ns}	0,99**	0,98*	0,98*
CXv	0,91 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,98*	0,93 ^{ns}	0,99**	0,87 ^{ns}
RQo	0,87 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,98*	0,91 ^{ns}	0,97*	0,94 ^{ns}

ns (não-significativo); * e ** (significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente).

A cinética de liberação de K, Ca e Mg pelos compartimentos de reserva dos solos, ao longo do tempo pode ser importante para o estabelecimento de plantios florestais, pois a partir do conhecimento deste atributo permitirá uma elaboração mais eficiente do planejamento das atividades florestais de modo a reduzir os custos com adubações. Solos que possuem maior cinética de liberação destes nutrientes apresentam maior potencial para o suprimento K, Ca e Mg aos plantios de eucalipto a partir das suas reservas minerais, podendo esta contribuição ser mais efetiva para as fases de menor demanda nutricional da cultura, que ocorrem por volta dos 4,5 anos de idade (SANTANA et al., 2008).

O IMA do eucalipto se correlacionou positivamente com a cinética de liberação de K, Ca e Mg nas três concentrações de ácido cítrico e nas duas profundidades dos solos estudados (Tabela 8). Os elevados valores das correlações entre cinética de liberação destes nutrientes e o IMA demonstram que a produtividade do eucalipto também apresenta uma dependência da cinética de liberação de K, Ca e Mg pelas reservas minerais dos solos, pois o IMA é um índice que representa o crescimento médio anual de espécies florestais, em volume de madeira, por determinado período de tempo. Em estudo realizado por Hosseinpur et al. (2012), investigando o grau de correlação entre os parâmetros de produção de plantas e a cinética de liberação de K em solos, os autores verificaram que a absorção de nutrientes e a produtividade das culturas se apresentaram fortemente correlacionadas com cinética de liberação de K, estimada pela equação de Elovich.

A forte correlação entre os valores de cinética de liberação de K, Ca e Mg e o IMA do eucalipto é de grande importância para a realização de adequações no manejo das adubações de áreas cultivadas com esta cultura, pois a correlação é uma ferramenta empregada na calibração de métodos analíticos utilizados para avaliação da disponibilidade de nutrientes em solos. Este resultado é

ainda mais relevante quando se refere ao Ca, que é um dos nutrientes mais requeridos (SANTANA et al., 2008) e ao K, o mais limitante (BARROS et al., 1981) ao eucalipto no Brasil. Segundo Zaia e Gama-Rodrigues (2004), a maior demanda de Ca pelas plantas de eucalipto se deve principalmente ao fato de que este nutriente não é redistribuído nos tecidos vegetais, o que resulta em acúmulo nos órgãos das plantas.

A inclusão da cinética de K, Ca e Mg como uma das formas de avaliação da capacidade dos solos fornecerem estes nutrientes às plantas permite a realização de adequações nos programas de recomendação destes nutrientes e contribui para a racionalização do uso de fertilizantes minerais, o que maximiza a eficiência do manejo das adubações de áreas cultivadas e os custos de produção do eucalipto. Adequações na recomendação de fertilizantes que permitem reduções nas doses dos nutrientes a serem aplicadas são de grande interesse para as atividades silvicultoras, principalmente quando se refere às adubações com K, o que reduziria o custo de produção, uma vez que o Brasil importa mais de 90% das fontes deste nutriente (IBRAM, 2012).

CONCLUSÕES

A cinética de liberação de K, Ca e Mg variou entre os solos, as profundidades e entre as concentrações de ácido cítrico avaliadas, sendo os maiores valores obtidos para o Argissolo Vermelho e o Chernossolo Argilúvico, os quais possuem maior riqueza de minerais fontes destes nutrientes, com o emprego das menores concentrações de ácido cítrico (0,01 e 0,001 mol L⁻¹).

O incremento médio anual (IMA) se correlacionou significativamente com a cinética de liberação de K, Ca e Mg, indicando que este atributo compreende um parâmetro informativo da capacidade dos solos fornecerem estes nutrientes às plantas, apresentando potencial para ser incluído no planejamento do manejo nutricional da cultura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília, 2012. 148 p. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013.

AGBENIN, J. O.; RAIJ, B. V. Rate process of calcium, magnesium and potassium desorption from variable charge soils by mixed ion exchange resins. *Geoderma*, Amsterdam, v. 93, n. 1/2, p. 141-157, 1999.

ALVES, M. J. F.; MELO, V. F.; REISSMANN, C. B.; KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1599-1610, 2013.

ANDRADE, M. C. N.; MINHON, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C.; SALES-CAMPOS, C. Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de espécies e clones de eucalipto visando o cultivo de shiitake em toras. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 183-192, 2011.

BARROS, N. F.; BRAGA, J. M.; BRANDI, R. M.; DEFELIPO, B. V. Produção de eucalipto em solos de cerrado em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 90-103, 1981.

BUSCHLE, B. N.; PALMEIRO, J. K.; YOUSSEF BACILA SADE, Y. B.; MELO, V. F.; ANDRADE, M. G.; BATISTA, A. H. Cinética de liberação de chumbo de solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1865-1874, 2010.

CAMPOS, M. L.; GUILHERME, L. R. G.; VISIOLLI, E.; ANTUNES, A. S.; CURI, N.; MARQUES, J. J.; SILVA, M. L. N. Força iônica da solução de equilíbrio na adsorção de arsênio em Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 457-460, 2006.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 979-983, 2001.

CASTRO, P. P.; CURI, N.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F.; FREITAS, D. A. F.; MELLO, C. R.; SILVA, S. H. G. Química e mineralogia de solos cultivados com eucalipto (*Eucalyptus* sp.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, 2010.

COMERFORD, N. B.; HARRIS, W. G.; LUCAS, D. Release of nonexchangeable potassium from a highly weathered forest Quartzipsamment. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1421-1426, 1990.

CURI, N.; KAMPE, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: Yamada, T.; Roberts, T. L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 71-91.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2009. 628 p.

FEPAGRO - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas climático**: Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

FREITAS, E. V. S. NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, A. J.; DUDA, G. P. Indução da fitoextração de chumbo por ácido cítrico em solo contaminado por baterias automotivas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 467-473, 2009.

GONÇALVES, J. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e Espécies Típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 15, p. 1-23, 1995.

HAVLIN, J. L.; WESTFALL, D. G.; OLSEN, S. R. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 371-376, 1985.

HOSSEINPUR, A. R.; MOTAGHIAN, H. R.; SALEHI, M. H. Potassium release kinetics and its correlation with pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) plant indices. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 58, n. 7, p. 328-333, 2012.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7.ed., Brasília, 2012. 64 p.

JALALI, M. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 63-71, 2006.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 573-610.

MARTIN, H. W.; SPARKS, D. L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, n. 2, p. 133-162, 1985.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 165-171, 1995.

- MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 251-332.
- MELO, V. F.; CORREA, G. F.; RIBEIRO, A. N.; MASCHIO, P. A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 533-545, 2005.
- MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 269-284, 2000.
- MEURER, E. J.; ROSSO, J. I. Cinética de liberação de potássio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 553-558, 1997.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. Oxford: Oxford University Press, 1989. 332 p.
- REATTO, A.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RESENDE, M.; KER, J. C.; COSTA, L. M. Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do Vale do Rio Doce (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 255-266, 1998.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2723-2733, 2008.
- SCHUMACHER, M.; CALDEIRA, M. V. M. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.
- SILVA, V. A.; MARCHI, G.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Kinetics of k release from soils of Brazilian coffee regions: effect of organic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 533-540, 2008.
- SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M. R. A. **Seja o Doutor do seu Eucalipto**. Piracicaba: Potafos, 2001. 32 p. (Informações Agronômicas, 93).
- SIMARD, R. R.; KIMPE, C. R.; ZIZKA, J. The kinetics of nonexchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 69, n. 3, p. 663-675, 1989.
- SIMARD, R. R.; KIMPE, C. R.; ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 5, p. 1421-1428, 1992.
- SPARKS, D. L. **Kinetics of soil chemical processes**. Davis: Academic, 1989. 210 p.
- SPARKS, D. L.; JARDINE, P. M. Comparison of kinetic equations to describe potassium-calcium exchange in pure and mixed systems. **Soil Science**, Baltimore, v. 138, n. 2, p. 115-122, 1984.
- ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 843-852, 2004.

Recebido em 11/08/2014

Aceito para publicação em 15/06/2015

