

# EFICIÊNCIA RELATIVA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NO CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO CULTIVADO EM SOLOS DO CERRADO<sup>(1)</sup>

J.L. GAVA<sup>(2)</sup>, J.L.M. GONÇALVES<sup>(3)</sup>, F.Y. SHIBATA<sup>(4)</sup> & L. CORRADINI<sup>(5)</sup>

## RESUMO

Tendo como objetivo avaliar a eficiência relativa do superfosfato simples (SS), fosfato parcialmente acidulado (FAPS) e termofosfato magnésiano (TERM) como fonte de P e outros nutrientes para o cultivo de plantações de eucalipto, em dois solos da região dos Cerrados, uma areia quartzosa (50 g kg<sup>-1</sup> de argila) álica e um latossolo vermelho-escuro (230 g kg<sup>-1</sup> de argila) álico, foi realizado este experimento, sob condições de casa de vegetação, na ESALQ/USP, Piracicaba (SP), em 1993. Subamostras do AQ receberam 0, 75, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P e, do LE, 0, 125, 250 e 500 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo. As doses de P foram estimadas com base na solubilidade dos adubos; SS e FAPS, em citrato de amônio, e TERM, em ácido cítrico 20 g L<sup>-1</sup>. Em cada vaso (5 kg de solo), deixou-se uma planta de *Eucalyptus grandis* por 90 dias após a emergência e desbaste das plântulas. Paralelamente ao experimento em casa de vegetação, subamostras de todos os tratamentos, com 2 kg de solo, foram incubadas no interior de sacos plásticos por 0, 10, 20, 40, 60 e 80 dias. Ao término de cada período de incubação, os solos eram amostrados e analisados. Mediante o cálculo de índices de eficiência relativa entre os adubos, verificou-se que o TERM foi superior 64% ao SS e 57% ao FAPS no solo AQ. No LE, o SS foi superior 55% ao TERM e 34% ao FAPS. O TERM foi a fonte de P que promoveu os maiores acréscimos do nível de fertilidade dos solos, com expressiva elevação do pH do solo, redução das concentrações de Al e aumento daquelas de Ca e Mg. Os ganhos de produção das mudas de eucalipto foram altamente correlacionados com a absorção de P, K, Ca, Mg e Zn. O TERM proporcionou as maiores absorções desses nutrientes no solo AQ e, as menores, de P, Ca e Zn no LE. As distintas respostas de crescimento para os adubos avaliados, em ambos os solos, sobretudo para TERM e SS, foram atribuídas, em grande parte, aos efeitos secundários das fontes de P sobre a fertilidade dos solos.

**Termos de indexação:** eucalipto, eficiência de adubos fosfatados, fosfato parcialmente acidulado, superfosfato simples, termofosfato magnésiano e região dos Cerrados.

<sup>(1)</sup> Parte do trabalho de pesquisa do primeiro e do terceiro autores, como bolsistas de iniciação científica da FAPESP, no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ. Recebido para publicação em junho de 1996 e aprovado em junho de 1997.

<sup>(2)</sup> Engenheiro Florestal da Cia Suzano, Caixa Postal 228, CEP 18200-000 Itatinga (SP).

<sup>(3)</sup> Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: jlmgonca@carpa.ciagri.usp.br.

<sup>(4)</sup> Estudante de Engenharia Florestal da ESALQ, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP).

<sup>(5)</sup> Engenheiro Florestal da Consultoria Florestal, Rua Vicente de Carvalho, 364, sala 110, CEP 14020-040 Ribeirão Preto (SP).

**SUMMARY: RELATIVE EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZERS ON THE INITIAL GROWTH OF EUCALYPT IN SOILS FROM CERRADO REGION**

The objective of this study was to assess the relative efficiency of single superphosphate (SS), partially acidulated rock phosphate (PARP) and fused magnesium thermal phosphate (MTP) as sources of P and other nutrients for eucalypt plantations in two soils of the cerrado region: an alic quartz-sand (50 g kg<sup>-1</sup> of clay) and an alic dark-red latosol (230 g kg<sup>-1</sup> of clay). Experiments were carried out under greenhouse conditions at the University of São Paulo, Piracicaba, State of São Paulo, Brazil, in 1993. Sub-samples of quartz-sand received 0, 75, 150 and 300 mg kg<sup>-1</sup> of P in the soil, and dark-red latosol, 0, 125, 250 and 500 mg kg<sup>-1</sup> of P in the soil. The P doses were estimated on the basis of the solubility of the fertilizers SS and PARP in ammonium citrate, and MTP in 20 g L<sup>-1</sup> citric acid. Eucalyptus grandis seedlings were grown, individually, in pots containing 5 kg of soil, for 90 days after emergence. Parallel to the greenhouse experiment, soil sub-samples of each treatment, 2 kg weight, were incubated in plastic bags for periods of 0, 10, 20, 40, 60 and 80 days. At the end of each incubation period, they were sampled and analysed. The relative efficiency indexes between the fertilizers indicated that MTP was superior 64% to SS and 57% to PARP, in the quartz-sand. In the dark-red latosol, SS was superior 55% to MTP and 34% to PARP. The MTP was the P source that induced the higher increase in the soil fertility level, with a significant pH increase, reduction of Al concentration and increase in Ca and Mg concentration. The increasing yield of the eucalypt seedlings was highly correlated to P, K, Ca, Mg and Zn uptake. MTP provided the highest uptake of these nutrients in quartz-sand and the lowest uptake of P, Ca and Zn in dark-red latosol. The distinct growing responses to the fertilizers, particularly to MTP and to SS, in both soils, were largely due to secondary effects of the P sources on the soil fertility.

*Index terms: eucalypt, relative efficiency of P fertilizers, single superphosphate (SS), partially acidulate rock phosphate (PARP), magnesium thermal phosphate (MTP), cerrados.*

## INTRODUÇÃO

Os florestamentos com eucalipto e Pinus têm expandido consideravelmente no Brasil, sobretudo em regiões onde os solos apresentam baixa fertilidade, como nos Cerrados. Estima-se que a área atual florestada seja superior a 6,5 milhões de hectares, sendo mais de 75% ocupadas com poucas espécies de eucalipto. A tendência de crescimento da área florestada é grande, em virtude da expansão das indústrias de celulose e papel, chapas e aglomerados, serraria, siderurgia, cerâmica e outras. A maioria das áreas em cultivo e grande parte daquelas que serão agregadas respondem positivamente à adubação, principalmente a fosfatada.

Entre as fontes de P, as solúveis têm sido as mais promissoras, promovendo acréscimos economicamente viáveis de produtividade (Herbert, 1983, Herbert & Schönau, 1989, Barros et al., 1990, Gonçalves, 1995). Com relação às fontes pouco solúveis, indicadas, preferencialmente, para culturas perenes e pastagens (Ballard, 1984, Goedert & Souza, 1984), as pesquisas têm mostrado que as respostas aos fosfatos naturais, como única fonte de P, às vezes são pouco ou não compensadoras para florestamentos com eucalipto (Rezende et al., 1982, Leal et al., 1988). Geralmente, pela magnitude das respostas, particularmente quando as áreas de plantio são distantes das indústrias, as fontes solúveis podem ser mais viáveis. O uso de fosfatos naturais tem sido promissor quando associado com fontes solúveis de P. Em virtude da

alta demanda inicial do eucalipto por P (Novais et al., 1982), deve-se realizar a adubação fosfatada com a aplicação localizada de uma fonte solúvel por ocasião do plantio, antecedida pela adição da fonte natural aplicada a lanço (Barros et al., 1990). A despeito dos poucos trabalhos de pesquisa realizados sobre o tema, sobretudo quando se considera a grande diversidade de condições ambientais onde se encontram os florestamentos, a importância da "adubação de arranque" para *Eucalyptus grandis* foi confirmada pelas pesquisas de Rezende et al. (1982), Dantas (1988) e Leal et al. (1988). A rocha fosfatada tende a apresentar maior eficiência como fonte de P em solos de textura argilosa, acidez elevada, alta capacidade de fixação de fósforo e baixos níveis de P e Ca.

Graças aos baixos preços da madeira (bitola fina) de eucalipto e aos altos custos dos adubos, muito representativos no custo final de implantação e manejo das florestas, as dosagens de adubos, economicamente viáveis, são muito baixas quando comparadas à maioria das culturas agrícolas, mesmo considerando a grande capacidade de adaptação do eucalipto em solos distróficos. Nessas circunstâncias, devem-se escolher as fontes de P com as menores relações (ud de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel/ud monetária de custo), mas que, ao mesmo tempo, disponibilizem às árvores outros nutrientes essenciais, carentes nos solos do Cerrado, e demandados em grande quantidade como, por exemplo, Ca e S.

O benefício de um adubo, portanto, não se deve basear apenas na disponibilidade de seu nutriente

primário, mas nos seus efeitos gerais sobre fertilidade do solo e nutrição das árvores. Nesse sentido, a melhor fonte não é, necessariamente, aquela que forneça as maiores quantidades de P nutricionalmente ativos, mas a que forneça, também, outros nutrientes secundários limitantes no solo, ou que propicie às árvores relações adequadas entre nutrientes essenciais no solo, com efeito sinérgico de um sobre o outro durante a absorção. Segundo Gonçalves (1995), a reposição da maior parte do Ca removido com a madeira em plantações de Pinus seria reposta somente com o uso de fontes de P ricas em Ca.

Desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência relativa de três fertilizantes fosfatados como fonte de P e outros nutrientes secundários para o cultivo do eucalipto, em dois solos da região dos Cerrados.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a instalação do experimento, foram usadas amostras da camada de 0-20 cm de profundidade de dois solos sob vegetação de cerrado, no município de Luiz Antônio (SP). Um deles é uma areia quartzosa (AQ) álica e, o outro, um latossolo vermelho-escuro (LE) álico, textura média. Após a coleta das amostras, os solos foram secos à sombra, peneirados (malha de 2 mm), homogêneos e caracterizados física e quimicamente. Suas características granulométricas são as seguintes: AQ, areia = 930, silte = 20 e argila = 50 g kg<sup>-1</sup> e, do LE, areia = 730, silte = 40 e argila = 230 g kg<sup>-1</sup>. Suas características químicas eram: AQ, matéria orgânica = 19 g kg<sup>-1</sup>; pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (1:2,5) = 3,7; P-resina = 16 mg dm<sup>-3</sup>; K = 0,2; Ca = 1,3; Mg = 0,3; H + Al = 34,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V = 5% e, para o LE, matéria orgânica = 25 g kg<sup>-1</sup>; pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (1:2,5) = 3,8; P-resina = 7 mg dm<sup>-3</sup>; K = 0,3; Ca = 1,2; Mg = 0,4; H + Al = 72,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V = 2%, avaliadas segundo método descrito por Rajj et al. (1987).

### Cultivo de mudas de *Eucalyptus grandis*

Subamostras dos dois solos receberam diferentes dosagens de fósforo, de forma a conseguir níveis crescentes de fósforo disponível nos solos. O AQ

recebeu adições de P correspondentes a 0, 75, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo e o LE, 0, 125, 250 e 500 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo. Como fontes de fósforo, usaram-se três adubos comerciais: superfosfato simples (forma granulada), fosfato natural parcialmente solubilizado (FAPS), obtido a partir do concentrado fosfático de Araxá tratado com 350 kg de ácido sulfúrico por tonelada de concentrado, e termofosfato magnésiano em pó, Yoorin, (Quadro 1). As doses de P aplicadas ao solo foram estimadas a partir do teor de P solúvel dos adubos: em CNA + água, para o SS e FAPS, e em ácido cítrico a 20 g L<sup>-1</sup>, para o TERM. Os adubos foram homogêneos com as amostras de solo. Além das adições de P, os solos receberam uma adubação básica correspondente a 100 mg kg<sup>-1</sup> de N no solo e 100 mg kg<sup>-1</sup> de K no solo, tendo como fontes o sulfato de amônio e o cloreto de potássio.

As subamostras de solo, após receber as adubações mencionadas, foram acondicionadas em vasos plásticos com capacidade de 5 kg de solo, os quais foram irrigados com água destilada, procurando-se manter o teor de água do solo próximo à capacidade de campo. Deixou-se crescer, em cada vaso, uma planta de *Eucalyptus grandis*.

Como adubação de cobertura, aplicou-se, em todos os tratamentos, 45 dias após o plantio da semente, uma solução contendo micronutrientes (4 mg de Zn; 1 mg de B; 1,5 mg de Fe; 1 mg de Mn; 1 mg de Cu e 0,1 mg de Mo kg<sup>-1</sup> de solo). A partir de então, em intervalos de dez dias até o corte das mudas, todos os vasos receberam 25 mg kg<sup>-1</sup> de N, em forma de solução preparada com sulfato de amônio p.a.

Os tratamentos, em quatro repetições, foram dispostos num fatorial 3 x 4 x 2 (três fontes de fósforo, quatro doses de P e dois solos), no delineamento de blocos casualizados, desenvolvendo-se o experimento em casa de vegetação. As plantas foram cultivadas por 90 dias após a emergência.

O material vegetal da parte aérea das plantas foi seco à temperatura de 65°C até peso constante. Determinado seu peso, o material foi moído e mineralizado por via úmida, empregando-se a digestão nitroperclórica, segundo método descrito por Sarruge & Haag (1974). As determinações das concentrações de macro e micronutrientes também seguiram o método apresentado por esses pesquisadores.

**Quadro 1. Características químicas do superfosfato simples (SS), do fosfato parcialmente acidulado (FAPS) e do termofosfato magnésiano (TERM)**

Adubo	Nutrientes totais			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel		
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Mg	Cit. neutro de amônio + água	Ác. cítrico 20 g L <sup>-1</sup> (relação 1:100)	Água (relação 1:250)
	g kg <sup>-1</sup>					
SS	190	111	-	190	160	160
FAPS	260	80	-	110	110	70
TERM	170	-	70	-	140	-

Para comparar os três fertilizantes quanto à produção de matéria seca, foi calculado o índice de eficiência agrônômica (IEA), de acordo com a fórmula seguinte, usando-se como adubo-referência o superfosfato simples:

$$IEA = \frac{P_r - P_o}{P_s - P_o} \times 100,$$

onde:  $P_r$ : produção de matéria seca obtida com o adubo em teste, na dose  $n$ ;  $P_o$ : produção de matéria seca obtida com o superfosfato simples, na dose  $n$ ;  $P_s$ : produção do tratamento sem adubo.

Para comparar os três fertilizantes quanto às quantidades relativas de P recuperado pela resina, calculou-se o índice de eficiência relativa (IER), de acordo com a fórmula seguinte, usando-se como adubo-referência o superfosfato simples:

$$IER = \frac{P - \text{resina fonte X} - P - \text{resina testemunha}}{P - \text{resina SS} - P - \text{resina testemunha}} \times 100,$$

onde: P-resina fonte X: P recuperado pela resina com o adubo em teste, na dose  $n$ ; P-resina testemunha: P recuperado pela resina no tratamento testemunha; P-resina SS: P recuperado pela resina com o adubo superfosfato simples, na dose  $n$ .

### **Incubação de amostras de solo com níveis crescentes de P**

Paralelamente ao experimento em casa de vegetação, subamostras de todos os tratamentos, com 2 kg de solo, foram incubadas em sacos plásticos por 0, 10, 20, 40, 60 e 80 dias, com o teor de água próximo à capacidade de campo. Ao término de cada período de incubação, os solos eram amostrados e os teores de C-orgânico, P-resina, pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$  (relação 1:2,5), K, Ca e Mg trocáveis e Al trocável + H titulável determinados segundo método proposto por Raij et al. (1987).

### **Análise estatística**

Para a determinação dos níveis críticos de fósforo no solo para a máxima produção de matéria seca, avaliaram-se vários modelos de regressão, tendo, como variável dependente, a produção de matéria seca da parte aérea das mudas aos 90 dias pós-emergência, em grama por vaso, e, como variável independente, o teor de P-resina no solo 40 dias após a aplicação dos adubos, em  $\text{mg dm}^{-3}$ . Com base no coeficiente de determinação, verificou-se que o melhor modelo foi o quadrático. A comparação entre médias foi feita pelo teste de Tukey.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Efeito das fontes de P sobre a composição química dos solos**

As fontes de P afetaram a composição química dos solos de forma bastante distinta, havendo pronunciados efeitos do tempo de incubação sobre a disponibilidade de P e, de modo geral, pequenos efeitos

sobre os teores dos demais nutrientes analisados, que se mantiveram praticamente estáveis desde os períodos iniciais de incubação (Quadro 2).

As porcentagens de fósforo recuperado pelo extrator resina, relativamente às quantidades de P aplicadas, foram, em média, cerca de 10% menores no LE comparativamente ao AQ (Quadro 3), o que certamente está relacionado com a maior capacidade de fixação de P do LE (Gonçalves et al., 1989, Silva & Braga, 1993). Cerca de 28 a 60% das doses de P aplicadas foram recuperadas pela resina no AQ e, 27 a 49%, no LE. Ao longo do tempo de incubação, para as diferentes fontes e doses, houve oscilações nas quantidades de P extraídas (Quadros 2 e 3), atribuídas à capacidade de solubilização das fontes, às reações de adsorção e precipitação de P e à atividade microbiológica do solo (mineralização e imobilização). Contudo, observa-se uma tendência de menor fixação de P quando a fonte é o superfosfato simples, particularmente no solo AQ. Neste caso, a fixação de P foi mais de 10% inferior às demais fontes, que apresentaram entre si níveis de fixação de P no solo de mesma grandeza.

Quando se compara o índice de eficiência relativa (IER) entre o TERM e o FAPS com o SS, nos diferentes tempos de incubação, verifica-se que a disponibilidade de P cai drasticamente com o tempo de incubação no solo AQ para TERM e FAPS (Quadro 4). As quedas do IER com o tempo de incubação são muito maiores para o FAPS, provavelmente em função da sua menor capacidade de solubilização (relativa à porção de fosfato natural não tratado com ácido sulfúrico) comparativamente ao TERM. A situação é inversa no LE, em que o IER do FAPS se elevou com o tempo de incubação, chegando a disponibilidade de P a ser ligeiramente superior à das amostras que receberam aplicações de SS. Isso reflete a maior solubilização dessa fonte em solos mais argilosos, com maior superfície de adsorção e nível de acidez, por conseguinte, maior remoção da solução do solo dos constituintes do adubo liberados durante sua solubilização, o que intensifica as taxas de dissolução das partículas do adubo.

O TERM foi a única fonte de P que causou expressiva elevação do pH do solo, redução das concentrações de H + Al e aumento das concentrações de Mg, em ambos os solos (Quadro 2). Esses efeitos foram diretamente proporcionais às doses aplicadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Guerrini et al. (1994) e Büll et al. (1995). O SS e o FAPS não alteraram o pH do solo nem a concentração de H + Al. Todas as fontes tiveram efeitos similares em relação aos teores de Ca, que teve suas concentrações elevadas de níveis médios equivalentes a 5,0 e 3,0  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  para 20,0 e 30,0  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente, nos solos AQ e LE. A saturação de bases (V%) elevou-se de níveis médios equivalentes a 20 e 10% para 40%, respectivamente, para ambos os solos, com a aplicação de SS e FAPS (Quadro 2). Todavia, quando o TERM foi aplicado, o V% subiu para níveis superiores a 70%, nos dois solos. Esses resultados evidenciam o grande efeito do TERM como corretivo da acidez do solo e fonte de Ca e Mg. É

**Quadro 2. Efeito do tempo de incubação do superfosfato simples (SS), fosfato parcialmente acidulado (FAPS) e termofosfato magnésiano (TERM) sobre algumas características químicas das amostras de areia quartzosa (AQ) e latossolo vermelho-escuro (LE). Na AQ, foram aplicados 150 mg dm<sup>-3</sup> de P no solo e, no LE, 250 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo**

Solo	Fonte de P	Tempo de incubação (dias)							
		0	10	40	80	0	10	40	80
		<b>pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup></b>				<b>P-resina (mg dm<sup>-3</sup>)</b>			
AQ	TERM	5,4	5,6	5,8	5,5	93	60	68	75
	FAPS	3,6	3,9	3,8	3,8	85	90	56	62
	SS	3,6	3,9	3,8	3,8	94	77	103	101
	Testemunha	3,6	3,9	3,8	3,9	13	18	13	12
LE	TERM	5,4	5,8	5,7	5,0	96	83	85	72
	FAPS	3,7	4,1	4,0	4,0	100	79	115	91
	SS	3,7	4,0	4,0	4,0	126	98	111	91
	Testemunha	3,8	4,0	4,0	3,9	6	6	7	6
		<b>K (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>				<b>Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>			
AQ	TERM	3,7	5,0	4,8	4,0	18,4	17,4	21,2	20,0
	FAPS	3,6	5,3	4,2	4,0	22,8	20,7	22,6	17,0
	SS	3,7	4,8	3,8	3,4	19,2	16,9	22,0	21,0
	Testemunha	4,0	5,2	3,8	3,0	5,5	4,2	8,4	2,0
LE	TERM	3,8	4,7	4,1	3,2	31,0	31,8	32,0	32,0
	FAPS	4,9	4,7	3,7	4,4	31,2	27,1	35,4	27,0
	SS	4,3	5,2	4,6	3,2	33,1	28,2	34,3	31,0
	Testemunha	3,7	4,7	4,8	4,4	2,3	2,3	2,8	3,0
		<b>Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>				<b>H + Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>			
AQ	TERM	18,2	12,9	17,2	17,4	20,0	16,0	13,0	15,0
	FAPS	0,9	1,1	0,9	1,2	42,0	34,0	31,0	34,0
	SS	1,5	1,4	6,1	1,7	42,0	34,0	31,0	38,0
	Testemunha	0,9	0,8	1,1	0,7	38,0	34,0	31,0	31,0
LE	TERM	24,1	23,7	26,3	25,6	28,0	22,0	18,0	28,0
	FAPS	1,5	1,2	1,6	1,2	64,0	52,0	52,0	52,0
	SS	1,9	2,3	1,9	2,1	64,0	58,0	52,0	52,0
	Testemunha	0,9	0,6	0,7	0,6	64,0	58,0	52,0	52,0

**Quadro 3. Percentagem média de fósforo recuperado<sup>(1)</sup> pela resina, após diferentes períodos de incubação das amostras de solo. Na AQ, foram aplicados 150 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo e, no LE, 250 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo**

Fonte de P <sup>(2)</sup>	Período de incubação (dias)						Médias	S <sup>(3)</sup>
	0	10	20	40	60	80		
%								
<b>Areia quartzosa</b>								
TERM	53	28	38	36	32	42	40	10
FAPS	47	48	31	29	44	33	39	10
SS	53	39	31	60	57	60	53	10
<b>Latossolo vermelho-escuro</b>								
TERM	36	31	42	31	31	27	32	4
FAPS	38	30	26	43	29	34	36	6
SS	49	37	24	42	31	34	41	7

<sup>(1)</sup> % de P recuperado =  $\frac{(P - \text{resina} - P - \text{resina testemunha})}{P - \text{aplicado}} \times 100$

<sup>(2)</sup> TERM: termofosfato magnésiano; FAPS: fosfato parcialmente acidulado; SS: superfosfato simples. <sup>(3)</sup> s = desvio-padrão.

importante destacar que a maioria das espécies de eucalipto usadas no Brasil são plenamente adaptadas a solos distróficos, sendo pouco sensíveis à acidez do solo e a altas saturações de Al (Novais et al., 1982, Gonçalves et al., 1997). O eucalipto responde à calagem somente quando os níveis de Ca e Mg no solo são limitantes para o crescimento das plantas (Gonçalves et al., 1996). Por conseguinte, suprimidas as deficiências de P, esperam-se efeitos pronunciados das fontes fosfatadas, que elevam os teores de Ca e Mg quando os níveis desses nutrientes no solo são baixos, seja pelo suprimento adicional de Ca e Mg, seja pelos efeitos benéficos que tais nutrientes poderiam ter sobre a absorção de outros nutrientes essenciais para as plantas, sob níveis de pH menos ácidos (quando a fonte for o termofosfato).

**Eficiência relativa das fontes de P avaliada pela produção de biomassa**

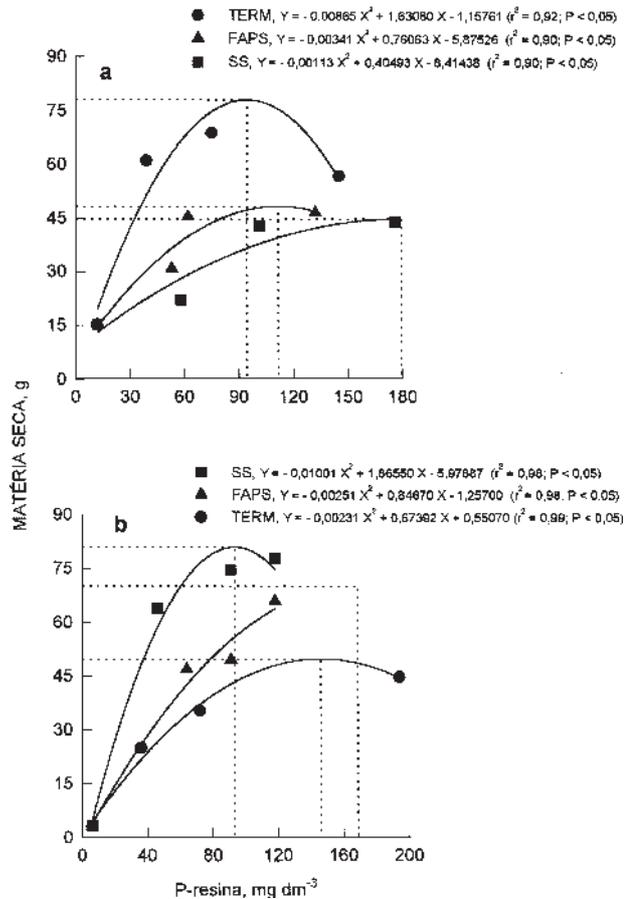
A resposta das plantas à aplicação de P foi generalizada, sendo significativa mesmo nas suas

**Quadro 4. Índice de eficiência relativa (IER) entre o termofosfato magnésiano (TERM) e o fosfato parcialmente acidulado (FAPS) relativamente ao superfosfato simples (SS), para diferentes tempos de incubação**

Fonte de P	Dose de P mg dm <sup>3</sup>	Tempo de incubação (dias)			
		0	10	40	80
<b>Areia quartzosa</b>					
TERM	150	99	71	61	71
FAPS	150	89	122	48	56
<b>Latossolo vermelho-escuro</b>					
TERM	250	75	84	75	76
FAPS	250	78	79	104	700

menores doses. O TERM foi o adubo que proporcionou o maior crescimento das mudas de *E. grandis* no solo AQ. Por outro lado, foi a pior fonte no LE (Figura 1). Neste, a melhor fonte foi o SS. O FAPS teve comportamento semelhante ao SS no AQ e intermediário entre as demais fontes no LE. Utilizando o SS como fonte de referência para o cálculo do índice de eficiência agrônômica (IEA), verificou-se que o TERM foi superior 64% ao SS e 57% ao FAPS no solo AQ. No solo LE, o SS foi superior 55% ao TERM e 34% ao FAPS. É importante destacar que, independentemente da resposta aos adubos aplicados, os níveis de produção de matéria seca do LE foram, em média, muito superiores ao AQ, apesar de os teores de P, K e Ca não serem muito diferentes entre esses solos, após a aplicação das fontes de P. Por outro lado, os maiores ganhos relativos de produção de matéria seca, quando se compara a melhor fonte de P com as demais, foram conseguidos no solo AQ.

De modo geral, as doses de P aplicadas foram altamente correlacionadas com as concentrações de nutrientes na parte aérea das mudas de eucalipto (Quadro 5). Considerando que as quantidades de biomassa produzidas nos diferentes tratamentos foram altamente relacionadas com as quantidades aplicadas e recuperadas de P (Figura 1), conclui-se que as diferenças de crescimento observadas entre os tratamentos estão altamente relacionadas com as quantidades de P, K, Ca, Mg e Zn absorvidas. O TERM proporcionou as maiores absorções desses nutrientes no solo AQ e as menores absorções de P, Ca e Zn no LE (Quadro 6). Esses efeitos sobre o crescimento não devem ter relação direta com a disponibilidade de P no solo, por si só, pois os teores de P no solo resultantes da aplicação das duas doses mais elevadas de adubo atingiram níveis adequados para o crescimento das mudas em ambos os solos, para todas as fontes de P usadas. Nessa linha de raciocínio, a maior resposta ao TERM no AQ está relacionada com a melhoria global do nível de fertilidade do solo, como já discutido.



**Figura 1. Crescimento das mudas de eucalipto aos 90 dias pós-emergência em função das concentrações de P recuperadas pela resina. As linhas descontinuas destacam os níveis críticos de P, para as diferentes fontes de P e solos (a) areia quartzosa e (b) latossolo vermelho-escuro, responsáveis pelas produções máximas de matéria seca da parte aérea. O AQ recebeu 0, 75, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P e, o LE, 0, 125, 250 e 500 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo. Essas doses foram estimadas com base no teor de P solúvel dos adubos.**

**Quadro 5. Correlação entre as doses de P aplicadas e as concentrações de nutrientes na parte aérea de mudas de *Eucalyptus grandis* aos 90 dias pós-emergência, para os diferentes tipos de solo e fontes de P<sup>(1)</sup>**

Solo	Fonte de P	P	K	Ca	Mg	Zn
AQ	TERM	0,82**	-0,32 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,81**	-0,51 <sup>ns</sup>
	FAPS	0,90**	-0,12 <sup>ns</sup>	0,57*	-0,56*	0,54*
	SS	0,73**	-0,04 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	-0,25 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>
LE	TERM	0,77**	-0,72**	0,40 <sup>ns</sup>	0,87**	-0,89**
	FAPS	0,59*	-0,73**	0,67**	-0,52 <sup>ns</sup>	-0,77**
	SS	0,91**	-0,78**	0,79**	-0,61*	-0,43 <sup>ns</sup>

<sup>(1)</sup> TERM: termofosfato magnésiano; FAPS: fosfato parcialmente acidulado; SS: superfosfato simples. <sup>ns</sup> = não significativo; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

**Quadro 6. Quantidades totais de P, K, Ca, Mg e Zn contidas na matéria seca da parte aérea das mudas de *Eucalyptus grandis* aos 90 dias de idade, em função do tipo de solo e fonte, quando aplicados 150 e 250 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo. Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P = 0,05)**

	P	K	Ca	Mg	Zn
mg/vaso					
<b>Areia quartzosa</b>					
TERM	96 a	344 a	440 a	234 a	4,8 a
FAPS	59 b	226 b	285 b	50 b	2,3 b
SS	81 c	124 c	559 c	85 c	4,1 c
<b>Latosolo vermelho-escuro</b>					
TERM	56 b	201 b	321 b	120 d	1,7 a
FAPS	59 b	213 b	544 c	74 c	2,6 b
SS	82 c	320 a	677 d	97 c	3,9 c

<sup>(1)</sup> TERM: termofosfato magnesiano; FAPS: fosfato parcialmente acidulado; SS: superfosfato simples.

Os maiores valores de nível crítico encontrados no LE (Figura 1), para TERM e FAPS, estão relacionados com o maior potencial produtivo e com a maior superfície de adsorção de P, relativamente ao AQ. Observa-se na figura 1 que, para as melhores fontes de P nos dois solos em estudo (TERM no AQ e SS no LE), os ganhos máximos de produção, em relação ao tratamento sem adubo, foram maiores no LE, apesar de o nível crítico de P ter sido idêntico em ambos para essas fontes.

Por fim, sabendo-se que, para os três adubos avaliados, aplicaram-se doses semelhantes de P solúvel e que os níveis de P disponível encontrados no solo para as maiores doses aplicadas são adequados para o crescimento de mudas de eucalipto (Novais et al., 1990), conclui-se que as distintas respostas de crescimento para os adubos avaliados em ambos os solos, sobretudo para o TERM e o SS, são devidas, em grande parte, aos efeitos secundários das fontes de P sobre a fertilidade dos solos. Além disso, sabendo-se que significativa fração das formas de P encontradas no FAPS e TERM são de lenta a moderada solubilização, os efeitos observados nesta pesquisa poderiam ser bastante diferentes se o período de experimentação fosse maior, principalmente se as condições de trabalho fossem as de campo. Contudo, considerando que as fontes solúveis de P se aplicam de forma localizada no campo (na cova ou sulco de plantio) e que um dos períodos mais críticos para o estabelecimento de plantações de eucalipto são os três a seis meses iniciais de crescimento, deduz-se que as informações obtidas nesta pesquisa (sob condições de casa de vegetação) devem ter grande relação com o crescimento das mudas em resposta aos adubos avaliados sob condições de campo.

## CONCLUSÕES

1. As porcentagens de P recuperadas pelo extrator resina relativamente às quantidades de P aplicadas foram, em média, cerca de 10% menores no LE, comparativamente ao AQ.

2. O termofosfato foi o adubo que proporcionou o maior crescimento das mudas de *E. grandis* no solo AQ. Por outro lado, foi a pior fonte no LE. Neste, a melhor fonte foi o superfosfato simples. Por meio do cálculo de índices de eficiência relativa entre os adubos, verificou-se que o termofosfato foi superior 64% ao superfosfato simples e 57% ao FAPS no solo AQ. No LE, o superfosfato simples foi superior 55% ao termofosfato e 34% ao FAPS.

3. O termofosfato magnesiano foi a fonte de P que causou os maiores acréscimos do nível de fertilidade dos solos, com expressiva elevação do pH do solo, redução das concentrações de Al e aumento das concentrações de Ca e Mg. Esses resultados evidenciam o grande efeito do termofosfato magnesiano como corretivo da acidez do solo e fonte de Ca e Mg para eucalipto, sobretudo em solos mais arenosos e de baixa fertilidade.

4. Os ganhos de produção das mudas de eucalipto foram altamente correlacionados com a absorção de P, K, Ca, Mg e Zn. O termofosfato proporcionou as maiores absorções desses nutrientes no solo AQ e as menores absorções de P, Ca e Zn no LE.

5. Os maiores níveis críticos de P no LE para as fontes TERM e FAPS foram atribuídos a seu maior potencial produtivo, a maior acidez e superfície de adsorção de P, relativamente ao AQ.

6. As distintas respostas de crescimento para os adubos avaliados, em ambos os solos, sobretudo para o TERM e o SS, foram atribuídas, em grande parte, aos efeitos secundários das fontes de P sobre a fertilidade dos solos.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela bolsa de iniciação científica concedida ao primeiro autor desta pesquisa, que muito contribuiu para seu aprimoramento profissional.

## LITERATURA CITADA

- BALLARD, R. Fertilization of plantations. In: BOWEN, G.D. & NAMBIAR, E.K.S. Nutrition of plantation forests. London, Academic Press, 1984. p.327-60.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F., eds., Relação solo-eucalipto. Viçosa, Editora Folha de Viçosa, 1990. p.127-186.
- BÜLL, L.T.; LACERDA, S. & NAKAGAWA, J. Alterações em propriedades químicas no solo e eficiência agrônômica de termofosfatos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Resumos Expandidos. Viçosa, SBCS, 1995. p. 2217-2219.

- DANTAS, S.V. Avaliação da eficiência de fosfatos em plantios de *Eucalyptus grandis*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 141p. (Tese de Doutorado)
- GOEDERT, W.J. & SOUZA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. Anais. Brasília, EMBRAPA, 1984. p.255-289.
- GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. Documentos Florestais, Piracicaba, 15:1-23, 1995.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & NOVAIS, R.F. Níveis críticos de fósforo no solo e na parte aérea de eucalipto na presença e ausência de calagem. Rev. Árv., Viçosa, 10:91-104, 1996.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S. & NOVAIS, R.F. Soil and stand management for intensive short-rotation plantations. In: NAMBIAR, S. & BROWN, A., eds. Management of soil, water and nutrients in tropical plantation forests. Canberra, CSIRO/ACIAR/CIFOR, 1997. cap.11. (no prelo)
- GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo lábil em não lábil, em solos de Cerrado. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 13:13-224, 1989.
- GUERRINI, I.A.; VILLAS BÔAS, R.L.; KORMAN, V. & YASUDA, M. Efeito de fontes de fósforo sobre o desenvolvimento inicial de *Eucalyptus grandis*. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., Petrolina, 1994. Anais. Petrolina, SBSC, 1994. p.10-11.
- HERBERT, M.A. The response of *Eucalyptus grandis* to fertilising with nitrogen, phosphorus, potassium and dolomitic lime on a Mispah soil series. South Afr. For. J., Pretoria, 124:4-12, 1983.
- HERBERT, M.A. & SCHÖNAU, A.P.G. Fertilising commercial forest species in Southern Africa: research progress and problems. Pt.1. South Afr. For. J., Pretoria, 151:58-70, 1989.
- LEAL, P.G.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & TEXEIRA, J.L. Biomassa e conteúdo de nutrientes em *Eucalyptus grandis* influenciados pela aplicação de fosfatos naturais em solos de cerrado. Rev. Árv., Viçosa, 12:165-182, 1988.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F., eds. Relação solo-eucalipto. Viçosa, Editora Folha de Viçosa, 1990. 330p.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & COUTO, C. Níveis críticos de fósforo para o eucalipto. Rev. Árv., Viçosa, 6: 29-37, 1982.
- RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- REZENDE, G.V.; BARROS, N.F.; MORAES, T.S.A.; MENDES, C.J. & SUITER FILHO, W. Aplicação de fosfatos naturais em plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Rev. Árv., Viçosa, 6:74-83, 1982.
- SARRUGE, J.R. & HAAG, H.P. Análise química em plantas. Piracicaba, ESALQ, 1974. 56p.