



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M.
MUDANÇAS DA FERTILIDADE DO SOLO E CRESCIMENTO DE UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* FERTILIZADO COM BÍOSSÓLIDO
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 28, núm. 4, julho-agosto, 2004, pp. 623-639
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214040005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

MUDANÇAS DA FERTILIDADE DO SOLO E CRESCIMENTO DE UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* FERTILIZADO COM BIOSSÓLIDO⁽¹⁾

G. N. ROCHA⁽²⁾, J. L. M. GONÇALVES⁽³⁾ & I. M. MOURA⁽⁴⁾

RESUMO

Antes da recomendação em larga escala de biossólido em plantações florestais, é preciso compreender seus efeitos no solo e na planta. Assim, a fertilidade do solo, o estado nutricional e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido foram avaliados em um experimento na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (SP), ESALQ/USP. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro blocos e nove tratamentos: (1) Testemunha; (2) Adubação mineral; (3) 5 t ha⁻¹ de bios. + K; (4) 10 t ha⁻¹ de bios. + K; (5) 10 t ha⁻¹ de bios.; (6) 10 t ha⁻¹ de bios. + K + P; (7) 15 t ha⁻¹ de bios. + K; (8) 20 t ha⁻¹ de bios. + K, e (9) 40 t ha⁻¹ de bios. + K. Foram analisadas quimicamente amostras de solo (camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm) e de folhas. A produção de madeira foi avaliada por meio da colheita e pesagem de árvores. Até 32 meses após a aplicação do biossólido, 36 meses pós-plantio, constataram-se aumentos do pH, dos teores de C orgânico, de P-resina e de Ca trocável nas três camadas, diretamente associados às doses de biossólido aplicadas. Os teores de S-SO₄²⁻ e K trocável diminuíram 13 meses após a aplicação do biossólido e, 19 meses depois, os teores estavam aumentados. O Al trocável diminuiu com o aumento das doses de biossólido, nas três camadas amostradas. A aplicação de biossólido influenciou positivamente na nutrição das plantas, proporcionando uma produção de madeira igual à obtida no tratamento que só recebeu adubação mineral (1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e, em kg ha⁻¹, 98 de N, 79,5 de P₂O₅, 165 de K₂O, 1,3 de B e 1,2 de Zn), quando a dose de biossólido foi equivalente a 12 t ha⁻¹.

Termos de indexação: lodo de esgoto, adubação orgânica, eucalipto, floresta, macronutrientes e micronutrientes.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, Programa de pós-Graduação em Recursos Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Recebido para publicação em abril de 2003 e aprovado em junho de 2004.

⁽²⁾ Mestre em Recursos Florestais, Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: gibaneves@ig.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. E-mail: jlmgonca@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Estudante de Engenharia Florestal, ESALQ/USP. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

SUMMARY: *CHANGES IN SOIL FERTILITY AND GROWTH OF AN Eucalyptus grandis PLANTATION FERTILIZED WITH BIOSOLID*

Before recommending biosolids at large scale for forest plantations it is necessary to have an ample understanding of its effects on soil and plant. Thus, it was evaluated the soil fertility, nutritional status and growth of a Eucalyptus grandis plantation fertilized with biosolid (bios). The trial was established at the Experimental Station of Forest Sciences of Itatinga - ESALQ/USP (São Paulo State, Brazil). The experimental design was in complete randomized blocks, with 4 replicates. There were nine treatments, namely: (1) control; (2) mineral fertilization; (3) 5 t ha⁻¹ bios + K; (4) 10 t ha⁻¹ bios + K; (5) 10 t ha⁻¹ bios; (6) 10 t ha⁻¹ bios + K + P; (7) 15 t ha⁻¹ bios + K; (8) 20 t ha⁻¹ bios + K; and (9) 40 t ha⁻¹ bios + K. Soil samples (layers 0-5, 5-10, and 10-20 cm) and leaves were chemically analyzed. The stem wood production was evaluated at harvest by weighing the trees. The pH, soil organic carbon, resin-P, and exchangeable Ca increased in the three soil layers up to 32 months after the biosolid application (36 months after planting) in direct association with the increasing biosolid rates. The S-SO₄²⁻ and exchangeable K decreased 13 months after the biosolid application and increased again 19 months later. The exchangeable Al in the three sampled soil layers decreased as biosolid dose was increased. The application of 12 t ha⁻¹ of biosolid had a positive influence on plant nutrition and led to a wood yield equivalent to the mineral fertilization treatment (1.5 t ha⁻¹ lime, and in kg ha⁻¹, 98 N, 79.5 P₂O₅, 165 K₂O, 1.3 B, and 1.2 Zn).

Index term: sewage sludge, organic fertilization, eucalypt, forest, macronutrients, and trace elements.

INTRODUÇÃO

O destino das diversas formas de resíduos urbanos e industriais produzidos pela sociedade moderna deixou de ser um problema futuro, para se estabelecer, de forma imperativa, entre as questões prioritárias da administração pública, privada e da própria sociedade. A questão tem abrangência ambiental, sanitária e econômica, porque o destino comum destes resíduos (rios, lagos, aterros, oceano) acarreta riscos ao meio ambiente e à população, além de dispêndios financeiros acentuados com transporte e estocagem dos resíduos em aterros. Assim, nos últimos anos, tem havido grande empenho para o desenvolvimento de novas técnicas de utilização destes resíduos, dentre os quais está o lodo (biossólido) produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

A disposição do biossólido em aterros sanitários, de forma contínua e em grande quantidade, diminui rapidamente a vida útil destes locais. Segundo Rocha (1998), “atualmente, existe uma tendência mundial em se priorizar alternativas que promovam a reciclagem do lodo”. Na região metropolitana da grande São Paulo, vivem cerca de 11,6 milhões de habitantes. Com o crescimento desta população e a ampliação da carga de esgoto tratada pela SABESP em suas ETE's, a previsão de produção de biossólido para o ano de 2005 é de cerca de 566 t dia⁻¹ (base seca) e, até 2015, deverá ser de 784 t dia⁻¹ (Santos et al., 1997). Dentre essas ETE's, está a de Barueri (município de Barueri - SP), considerada a maior da América

Latina, que produz cerca de 200 t dia⁻¹ de biossólido, depositadas no aterro sanitário Bandeirantes.

Uma das utilizações potenciais do biossólido é o seu aproveitamento como recondicionador físico e químico de solos usados em cultivos agrícolas e florestais (SENEPAR, 1997; Melo & Marques, 2000).

O biossólido é usado em cultivos florestais em vários países, principalmente em regiões temperadas (Gonçalves et al., 2000b). Em países tropicais, seu uso ainda é restrito e pouco estudado. No estado de São Paulo, vastas áreas destinadas a florestas poderiam absorver grande parte do biossólido produzido nas ETE's.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de doses crescentes de biossólido na fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média, na nutrição mineral e no crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis*. Esses efeitos, nos primeiros 13 meses após a aplicação do biossólido, foram avaliados por Vaz & Gonçalves (2002). Neste estudo, são apresentadas as avaliações realizadas aos 32 meses da aplicação do biossólido, ocasião em que foram observadas as maiores variações das determinações obtidas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em condições de campo, na Estação Experimental de Ciências

Florestais de Itatinga, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), localizada em Itatinga (23° 00' LS, 48° 52' LO, altitude de 750 m), SP. O solo da área foi caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico psamítico (areia = 830 g kg⁻¹, silte = 50 g kg⁻¹ e argila = 120 g kg⁻¹, na camada de 0-20 cm) (Quadro 1).

O clima na região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, ou seja, mesotérmico de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio (julho) é inferior a 18 °C, e a do mês mais quente (janeiro), superior a 22 °C. A precipitação média anual da área é de aproximadamente 1.579 mm, com 57 % concentrada nos meses de dezembro a março.

O biossólido usado no experimento (Quadro 2) é um resíduo produzido por digestão aeróbica (fase de decantação) e anaeróbica (fase final no biodigestor). Após esta fase, o produto é adensado e higienizado com cal extinta (250 kg t⁻¹ de biossólido) e cloreto férrico (100 kg t⁻¹ de biossólido), e, em seguida, desidratado em prensas hidráulicas.

O biossólido gerado na ETE de Barueri (SP) foi classificado como do tipo B (SENEA, 1999), com teor de matéria orgânica em torno de 300 g kg⁻¹ e relação C:N de 4,3, umidade em torno de 60 % e pH (em H₂O) igual a 12.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com nove tratamentos e quatro repetições. A espécie utilizada no experimento foi o *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden, procedente de Bounville – Coff's Harbour, Austrália. O plantio com mudas formadas a partir de sementes foi realizado em março de 1998. Cada parcela experimental foi composta por 100 plantas (10 linhas com 10 plantas em cada linha), com espaçamento 3,0 x 2,0 m, totalizando 600 m² por parcela. Somente as 36 plantas centrais foram consideradas nas avaliações e, as demais, deixadas como bordadura dupla.

Em meados de julho de 1998, o biossólido foi aplicado com sua umidade original (60 %), em faixas de 2 m, sobre a superfície do solo, a uma distância de 0,5 m de cada lado da linha de plantio do

Quadro 2. Composição química (elementos totais, base seca, 65 °C) do biossólido tipo B da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri, SP

Elemento	Concentração	Elemento	Concentração
	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹
C	114,0	Fe	39.200
N	26,6	Zn	1.500
P	9,5	Mn	300
K	1,3	Cd	21
Ca	95,0	Pb	200
Mg	3,0		
Na	0,5		
S	6,0		

eucalipto. Os tratamentos foram: (1) testemunha – sem fertilização mineral e sem aplicação de biossólido; (2) fertilização mineral – 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total), 110 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo (45 % de P₂O₅; aplicado no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (sulco de plantio), 80 kg ha⁻¹ de 20-0-20 (aplicado 45 dias pós-plantio em meia lua ao redor da muda), 180 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3 % B + 0,5 % de Zn (aplicado seis meses pós-plantio numa faixa de 40 cm na entrelinha de plantio) e 240 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3 % B + 0,5 % de Zn (aplicado 12 meses pós-plantio numa faixa de 40 cm na entrelinha de plantio); (3) 5 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K; (4) 10 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K; (5) 10 t ha⁻¹ de biossólido, sem suplementação de K; (6) 10 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K e P; (7) 15 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K; (8) 20 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K, e (9) 40 t ha⁻¹ de biossólido, com suplementação de K. Todas as doses de biossólido são em base seca.

Os tratamentos 3, 4, 6, 7, 8 e 9 receberam suplementação de K (KCl), até que as quantidades de K contidas no biossólido somadas às do fertilizante potássico ficassem iguais à do tratamento 2 (165 kg ha⁻¹ de K₂O). O tratamento 6 recebeu suplementação de P (superfosfato triplo), de modo que a quantidade de P contida no biossólido somada

Quadro 1. Atributos químicos⁽¹⁾ do Latossolo Vermelho-Amarelo por ocasião da instalação do experimento

Profundidade	pH	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	Al	SB	T ⁽²⁾	V ⁽³⁾	m ⁽⁴⁾	Cu	Zn	Mn	Fe	S-SO ₄ ²⁻	B
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³							%		mg dm ⁻³					
0-5	3,6	56	2	0,9	3	2	92	19	6	98	6	76	0,5	0,5	2,4	123	12,8	0,2
5-10	3,8	18	1	0,9	2	2	53	12	5	58	8	71	0,6	0,3	0,5	76	13,9	0,2
10-20	3,8	15	1	0,9	4	1	45	10	5	51	11	65	0,7	0,3	0,4	67	26,6	0,2

⁽¹⁾ Segundo métodos apresentados por Raij et al. (2001). ⁽²⁾ Capacidade de troca catiônica em pH 7,0. ⁽³⁾ Saturação por bases. ⁽⁴⁾ Saturação por alumínio.

ao do fertilizante fosfatado ficasse igual à do tratamento 2 (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

Os dados de precipitação pluvial, de temperatura máxima, média e mínima e de umidade relativa, durante o período do experimento, foram coletados numa estação meteorológica situada na área experimental.

Os atributos químicos do solo foram determinados para os tratamentos sob efeito de 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ de biofósforo + K, de adubação mineral e de 10 t ha⁻¹ de biofósforo + K + P, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 cm. Foram avaliados: pH, C orgânico, P extraível, S-SO₄²⁻, Ca, Mg, K e Al trocável, segundo métodos descritos por Raij et al. (2001). Foram coletadas dez amostras simples de solo por parcela em um transecto diagonal à área útil da parcela, nas entrelinhas de plantio (onde foi aplicado o biofósforo). Essas amostras deram origem a uma amostra composta.

Para avaliar o estado nutricional das árvores de todos tratamentos, foram coletados de 10 árvores por parcela cerca de 200 g de folhas, retiradas em pontos intermediários de galhos localizados no terço superior das árvores. As amostras de folhas foram pesadas e colocadas em estufa de circulação forçada a 65 °C por 72 h, para posterior determinação dos teores de macro e micronutrientes, com exceção do B, segundo métodos descritos por Sarruge & Haag (1974).

Para estimar a produção de madeira, foi abatida uma árvore média, quanto ao diâmetro à altura do peito, por parcela, em todos os tratamentos. Para isso, adotaram-se os seguintes procedimentos: (a) nas árvores colhidas, pesou-se o fuste (subdividido em pedaços de 2 m) e foram medidos os diâmetros, inferior e superior, com e sem casca, desses pedaços; (b) com esses valores foram calculados os volumes de tronco, com e sem casca, por meio da fórmula de Smalian ($V_t = (T^2 + B^2) \times L \times C$, sendo V_t = volume total da árvore (m³); L = comprimento de cada pedaço de fuste (m); T = raio do topo (cm); B = raio da base (cm); C = 0,0001570796 (constante), e (c) pela diferença entre os volumes, com e sem casca, obteve-se o volume de casca de cada árvore. Por meio do volume de casca e de sua densidade, pôde-se deduzir a massa de casca das árvores, determinando, então, a massa do fuste sem casca.

Os dados foram submetidos, quando conveniente, à análise estatística descritiva, à análise de variância (ANOVA) e à análise de regressão. O programa estatístico usado nas análises foi o SIGMAPLOT (2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Monitoramento das condições climáticas

Durante os estudos, com exceção de dois períodos (março a novembro de 1998 e março a junho de 2000),

não foram registrados significativos déficits hídricos (Figura 1). A primeira e a terceira amostragens de solo foram precedidas por altas precipitações pluviais e temperaturas médias, sendo a segunda precedida por períodos de baixas precipitações e temperaturas médias. As avaliações nutricionais foram realizadas em períodos sem deficiência hídrica. Não foi verificado déficit hídrico nos seis meses que antecederam a primeira e a segunda avaliações nutricionais, bem como nos oito meses que antecederam a terceira avaliação.

Fertilidade do solo

Seis meses depois da aplicação do biofósforo, na camada de 0-5 cm, os teores de C orgânico, nos tratamentos que receberam 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K de biofósforo, foram menores que os valores iniciais (Figura 2). Segundo Vaz & Gonçalves (2002), a adição de biofósforo ao solo estimula a atividade microbiana, a qual, atuando sobre frações orgânicas de fácil decomposição, seria uma das principais causas dessa diminuição nos teores de MO. A baixa relação C:N (4,3) e a boa disponibilidade de nutrientes no biofósforo são fatores intensificadores da atividade microbiana neste resíduo e no solo, logo após sua aplicação. Treze meses depois da aplicação do biofósforo, na mesma camada (0-5 cm), os teores de C orgânico nos tratamentos 20 e 40 t ha⁻¹ + K de biofósforo foram semelhantes aos da testemunha e, aos 32 meses, não houve diferenças estatísticas entre tratamentos. Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, 32 meses após a aplicação, houve aumento dos teores de C orgânico com o aumento da dose de biofósforo, sendo a maior diferença verificada entre o tratamento 40 t ha⁻¹ + K de biofósforo e o que recebeu apenas adubação mineral.

Em relação à testemunha, a diminuição do teor de C orgânico na camada de 0-5 cm, comparado ao teor inicial, observada aos seis e, mais evidente, aos treze meses após a aplicação, pode estar associada à mineralização da matéria orgânica do solo e ao baixo aporte de matéria orgânica após o corte raso dos povoamentos adultos de eucalipto na área (antes da instalação do experimento). Aos 32 meses, o teor de C orgânico na testemunha, assim como nos demais tratamentos, foi superior aos anteriores, provavelmente em decorrência do aporte de húmus oriundo da decomposição de raízes finas e de serapilheira, intensificado após o início da ciclagem biogeoquímica (fase de fechamento de copas).

Houve grande aumento do pH nos tratamentos que receberam 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K de biofósforo, 32 meses após a aplicação, o qual passou de 3,6 (antes da aplicação) para 4,6; 5,8 e 6,1, respectivamente (Figura 3). Entre os tratamentos, houve diferenças significativas de pH, na seguinte ordem: 40 t ha⁻¹ + K de bios. ≥ 20 t ha⁻¹ + K de bios. > 10 t ha⁻¹ + K de bios. ≥ 10 t ha⁻¹ + K + P de bios. > adubação mineral ≥ testemunha. Este aumento de pH pode ter três

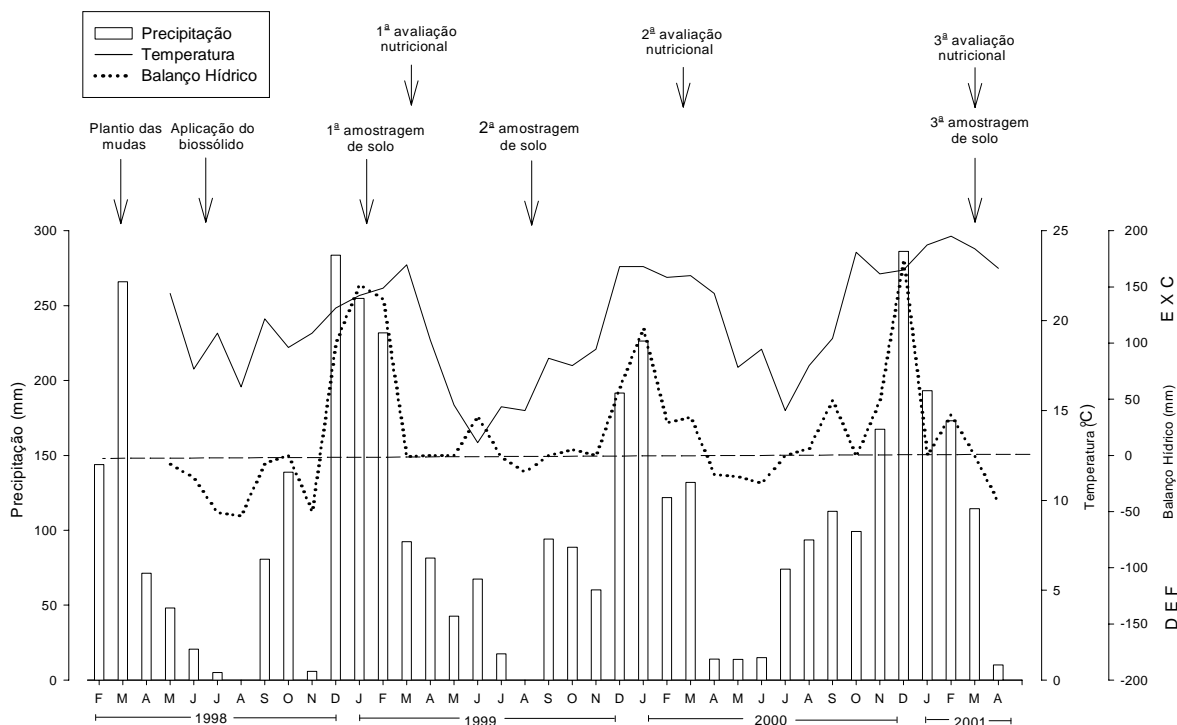


Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura média mensal durante o período experimental (fev./98 a abr./01); balanço hídrico (.....) e limite (---) entre excedente (EXC) e deficiência (DEF); esquema da localização ao longo do tempo do plantio das mudas, aplicação do biofósforo, amostragens de solo e avaliações do estado nutricional das árvores.

causas principais: (a) solubilização da cal extinta (adicionada ao biofósforo durante o processo de adensamento e higienização); (b) aporte no solo de compostos orgânicos, os quais complexam o Al, aumentando o pH, e (c) adição ao solo de produtos do metabolismo microbiano, os quais podem ter efeitos alcalinizantes (Rosato, 1978; Costa, 1983; Maria, 1986).

Como possíveis causas do longo tempo demandado para o aumento do pH no solo, a despeito das altas doses de bases aplicadas e da natureza permeável do solo, podem-se enumerar: (a) a diminuição do efeito tamponante do C orgânico adicionado, à medida que a decomposição do resíduo evoluiu (Kiehl, 1985); (b) a demora na solubilização da cal e na lixiviação e interação do Ca com o complexo de troca iônica do solo – se o biofósforo tivesse sido incorporado, certamente esse efeito teria sido mais rápido –, e (c) a ocorrência de precipitações pluviais insuficientes para rápida solubilização do Ca (Figura 1).

Nas camadas inferiores, entre 5 e 20 cm, somente na amostragem realizada 32 meses após a aplicação do biofósforo, foi constatado considerável aumento do pH nos tratamentos com as maiores doses (20 e 40 t ha⁻¹).

Aos 32 meses da aplicação, nos tratamentos que receberam as maiores doses de biofósforo, observaram-se, nas três camadas monitoradas, elevados teores de P no solo (Figura 4). Por exemplo, os teores de P-resina aumentaram de 12 para 199 e de 25 para 259 mg dm⁻³, na camada de 0-5 cm; de 13 para 108 e de 12 para 224 mg dm⁻³, na camada de 5-10 cm; e de 7 para 35 e de 8 para 96 mg dm⁻³, na camada de 10-20 cm de solo, respectivamente, nos tratamentos 20 e 40 t ha⁻¹ + K, no período de 13 a 32 meses após a aplicação.

A mineralização de P-orgânico, principalmente o oriundo do biofósforo, e a neutralização de sítios de fixação de P em óxidos de Fe e Al por ácidos orgânicos (Novais & Smyth, 1999) são causas prováveis e mais influentes deste rápido aumento dos teores de P-resina. A alta permeabilidade do solo (arenoso) e os índices pluviométricos observados no período (Figura 1) possibilitaram a lixiviação de P da camada superficial do solo, migrando, possivelmente, nas formas: orgânica (talvez em maior proporção; Novais & Smyth, 1999) e inorgânica (Bekunda et al., 1990).

A aplicação do biofósforo levou, inicialmente, a um aumento do teor de S-SO₄²⁻ no solo, observado seis meses depois da aplicação, considerando a

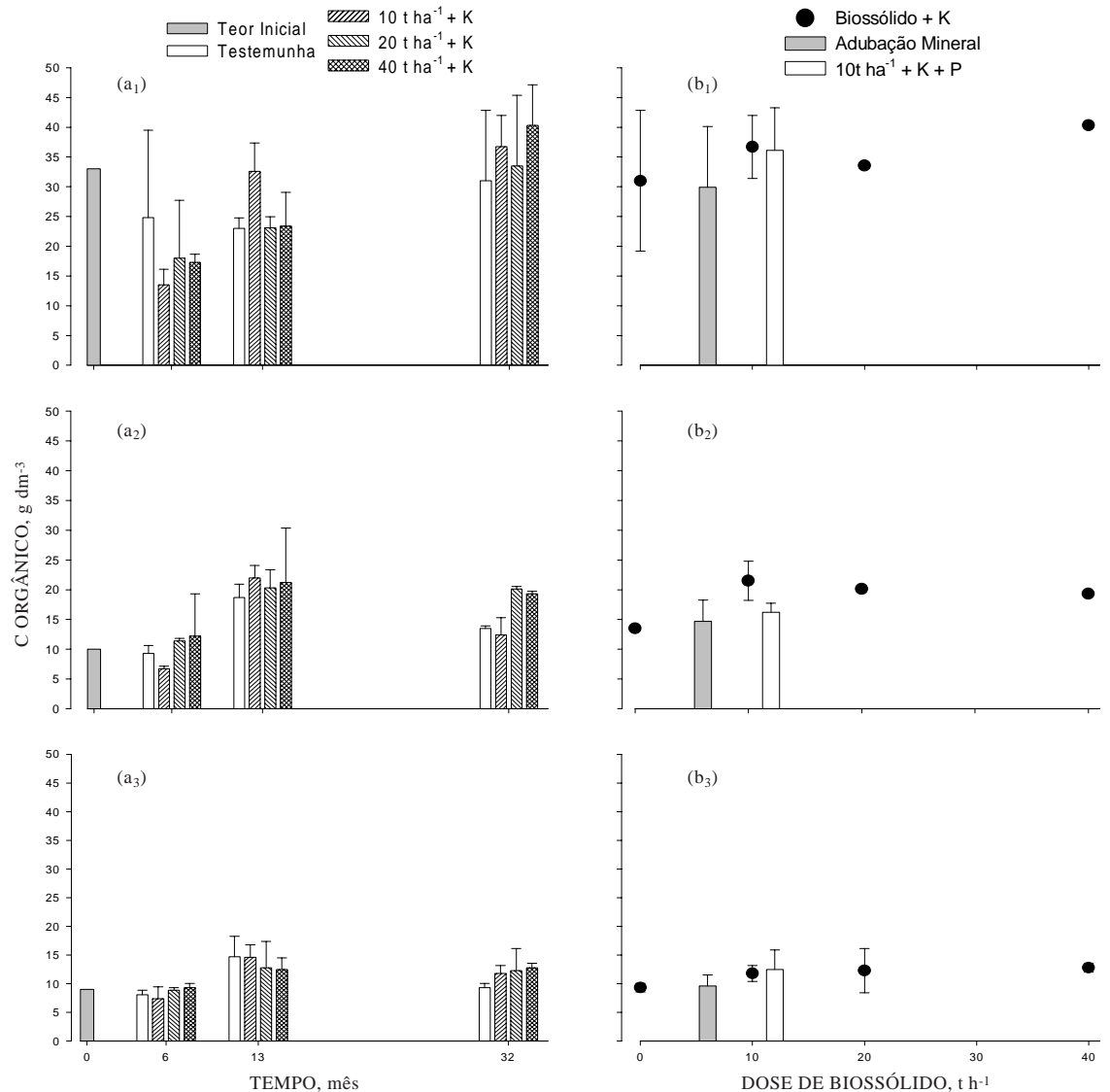


Figura 2. Teores de carbono orgânico (média \pm intervalo de confiança) a 0, 6, 13 e 32 meses pós-aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃) e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃). Quando as barras do intervalo de confiança das médias não aparecem é porque seus valores são menores do que os símbolos.

rápida mineralização de compostos sulfurados facilmente decomponíveis (Vaz & Gonçalves, 2002). Posteriormente, o teor de S-SO₄²⁻ diminuiu de forma acentuada e brusca (Figura 5). A lixiviação pode ter sido a causa mais influente desta diminuição (Figura 1); também pode ter tido alta influência a absorção de S-SO₄²⁻, em virtude da fase de rápido crescimento das árvores. Houve um sensível aumento nos teores de S-SO₄²⁻, observado 32 meses após a aplicação do biossólido, em relação à amostragem anterior, podendo estar associado ao

aumento do pH, com conseqüente disponibilização de S-SO₄²⁻ (Uchôa, 1999), e ao efeito da mineralização da serapilheira. Os teores de S-SO₄²⁻ no solo e as doses de biossólido apresentaram relação linear 32 meses após a aplicação do biossólido, nas camadas de 0-5 e 10-20 cm (Figura 5).

Os teores de Ca nas camadas do solo, passados 32 meses da aplicação do biossólido, foram muito aumentados (Figura 6). O teor subiu de 2 mmol_c dm⁻³ (inicial, na camada de 0-5 cm) para 230 e 300 mmol_c dm⁻³, nos tratamentos de 20 e 40 t ha⁻¹

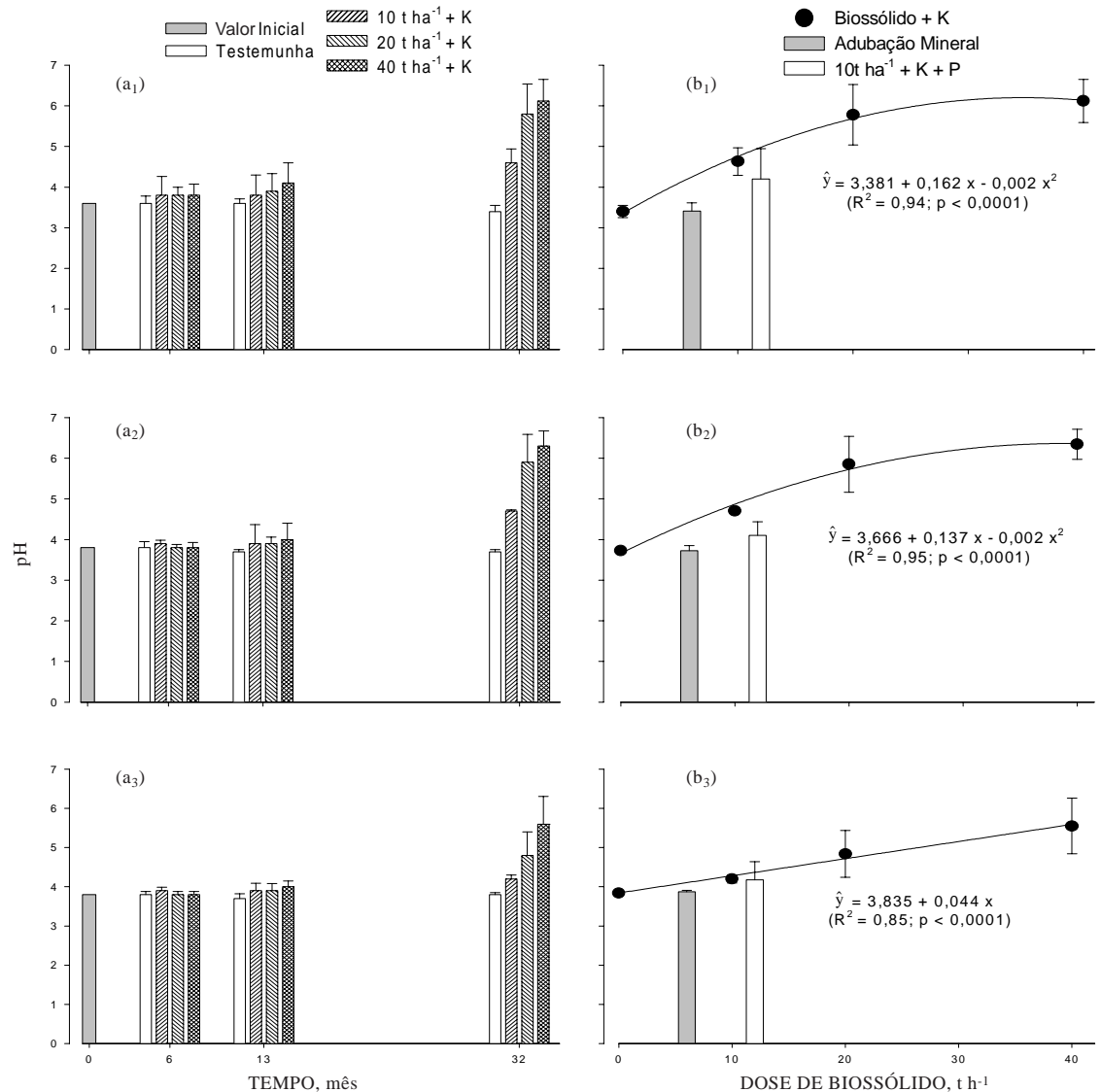


Figura 3. Valores de pH em CaCl_2 (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biofóssido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha^{-1} + K), nas profundidades de 0-5 (a_1), 5-10 (a_2) e 10-20 cm (a_3), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biofóssido, nas camadas 0-5 (b_1), de 5-10 (b_2) e 10-20 cm (b_3).

de biofóssido, aos 32 meses. Comportamento semelhante foi observado em camadas subjacentes. Essa lenta solubilização da cal e lixiviação de Ca são interessantes para o equilíbrio do sistema solo-planta, pois evitam o aumento brusco do pH e, conseqüentemente, reduzem tanto a possibilidade de efeitos antagônicos no processo de absorção de nutrientes como as perdas por lixiviação de nutrientes deslocáveis por competição iônica do complexo sortivo do solo. Não foram constatados sintomas de deficiência ou excesso de Ca nos

tratamentos. Barros & Novais (1996) salientaram a baixa demanda de Ca pelo *E. grandis* na fase inicial de crescimento. Esta demanda só aumenta na fase de intensa síntese de madeira, após o segundo ano de crescimento (Gonçalves et al., 2000a).

As variações dos teores de Mg foram baixas ao longo dos 32 meses da aplicação do biofóssido, nas três camadas do solo (Figura 7). Aumento significativo do teor de Mg só foi observado 32 meses após a aplicação do biofóssido, na camada de 0-5 cm.

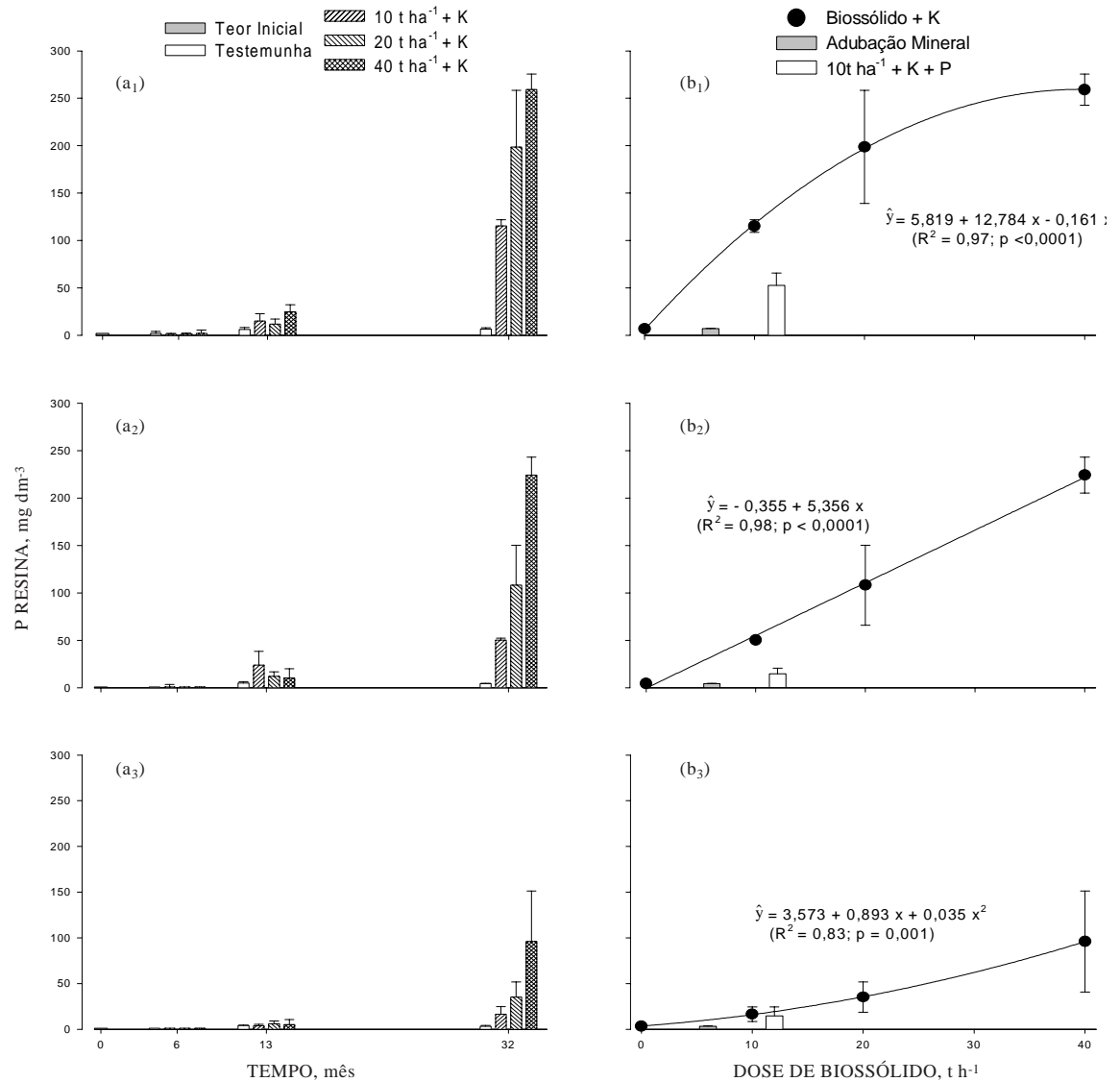


Figura 4. Teores de fósforo (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biofertilizante (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biofertilizante, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

Em virtude da baixa concentração de Mg no biofertilizante, o aporte de Mg no solo, via mineralização da serapilheira (remanescente do povoamento antigo), apresenta-se como uma das principais causas deste efeito. Como evidência desta afirmação, verificou-se que, na testemunha, o teor de Mg aumentou de 1 (aos seis meses) para 2 mmol_c dm⁻³ de solo aos 32 meses da aplicação do biofertilizante.

De modo geral, o K apresentou sensível aumento de seu teor nos primeiros meses da aplicação do biofertilizante, atingindo teores considerados adequados ao crescimento inicial do eucalipto (Vaz & Gonçalves,

2002). Todavia, a baixa concentração de K no biofertilizante e a complementação realizada com K em todos os tratamentos com biofertilizante, com finalidades de reposição e nivelção dos teores entre os tratamentos, deixam dúvidas quanto à contribuição do biofertilizante nas alterações de K no solo (Figura 8). Treze meses após a aplicação, observou-se diminuição de seus teores, em relação aos seis meses, como consequência da absorção deste elemento pelas árvores e, provavelmente, da lixiviação, que pode ter sido intensificada pelo deslocamento catiônico – substituição do K por Ca (Sharpley & Kamprath,

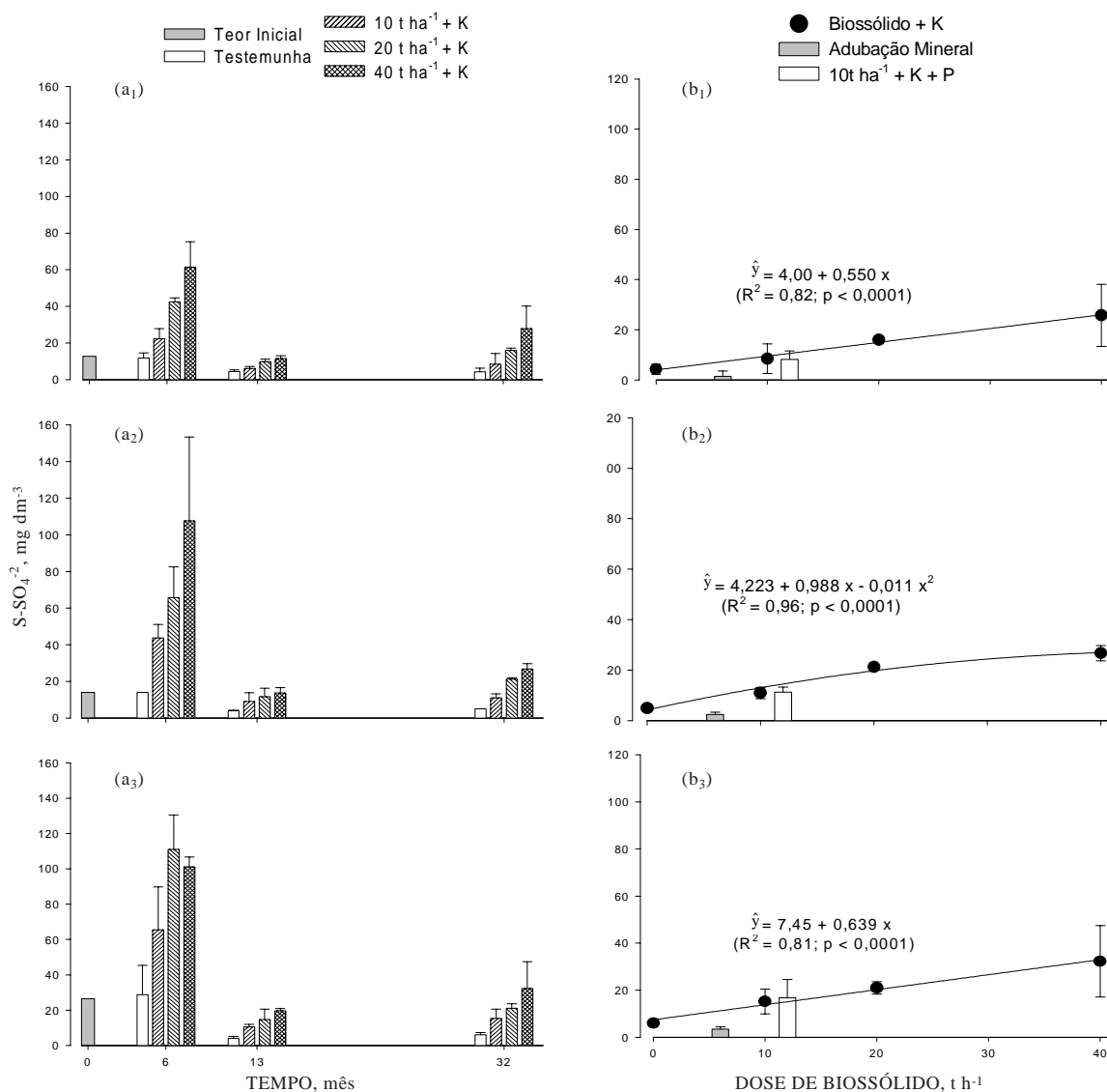


Figura 5. Teores de enxofre (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

1988, apud Duriez, 1994; Chaves & Libardi 1995). Um pequeno aumento do teor de K foi observado 32 meses após a aplicação do biossólido, provavelmente em decorrência da mineralização de serapilheira.

Na camada superficial, o teor de Al trocável decresceu ao longo do tempo, tendo sido os menores valores encontrados 32 meses após a aplicação do biossólido, nos tratamentos que receberam biossólido (40, 20 e 10 t ha⁻¹ + K, ordem decrescente de teor de Al), e os maiores valores, nos tratamentos onde foi feita apenas adubação mineral e na testemunha

(Figura 9). Este comportamento está relacionado com o aumento do pH, possivelmente, também com a complexação do Al pela MO (Miyazawa et al., 1992). Na testemunha, o teor de Al trocável apresentou comportamento oposto, com aumento a partir dos 13 meses. Nas demais camadas estudadas, cujo processo de lixiviação tem importante atuação, o tempo requerido para a neutralização do Al foi maior, fato evidente aos 32 meses da aplicação do biossólido. Comparando os tratamentos neste mesmo período, observou-se uma relação quadrática entre as doses de biossólido e a neutralização do Al em todas as camadas estudadas (Figura 9).

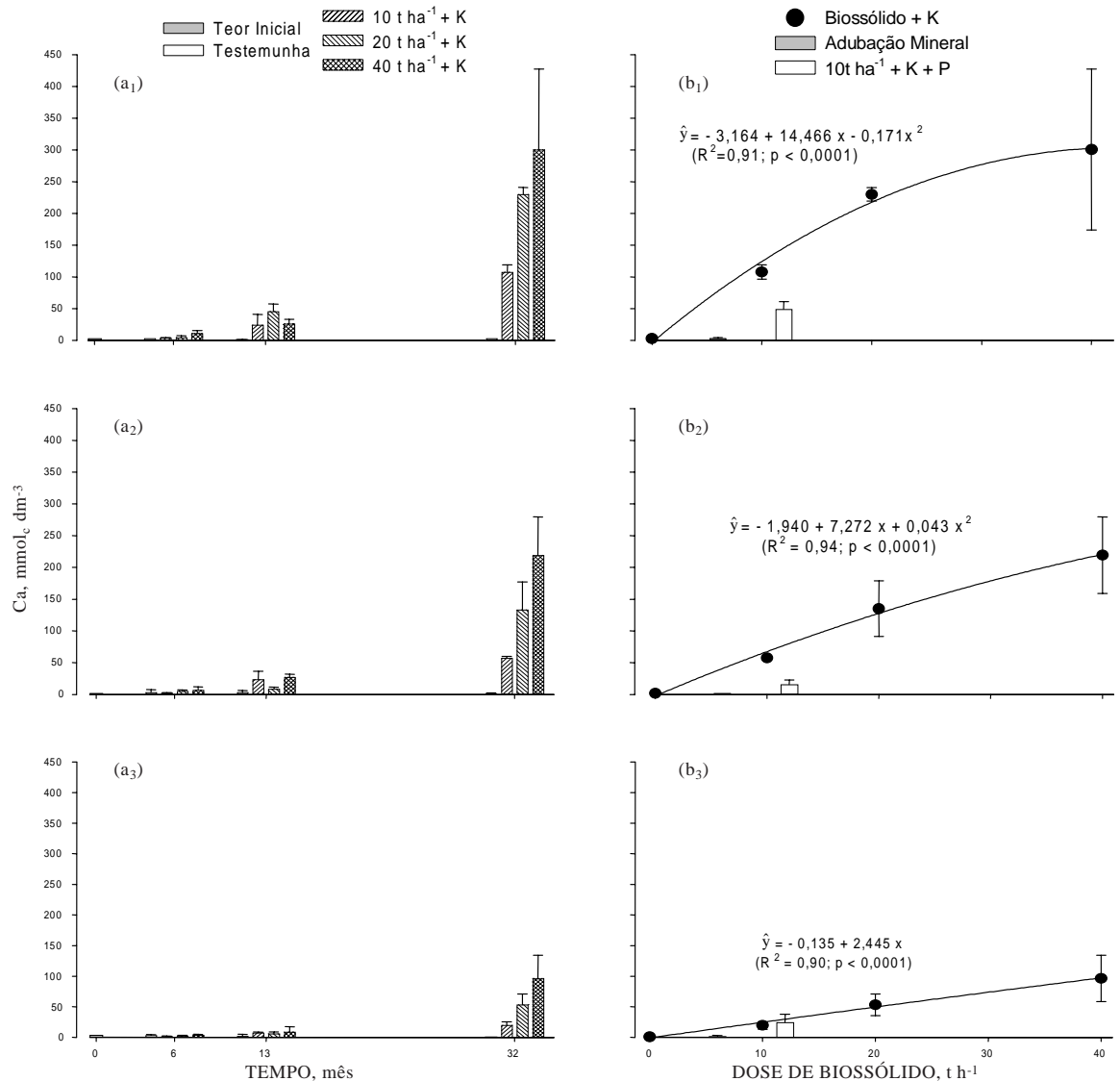


Figura 6. Teores de cálcio (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

Nutrição mineral

Os teores foliares de macro e micronutrientes ficaram dentro da faixa de suficiência em todos os tratamentos que receberam biossólido (Figuras 10 e 11), de acordo com Gonçalves et al. (1996) e Silveira et al. (2000).

A intensa mineralização da MO (do biossólido e do solo) causou aumento dos teores de N foliar (Figura 10). Entretanto, não foi encontrada correlação significativa entre o teor de N e a dose de biossólido aplicada. A maior absorção de N nos

tratamentos que receberam biossólido é aceita como uma das principais causas de resposta em crescimento das árvores observadas neste estudo, conforme os baixos teores de MO e de N (Andrade & Mattiazzo, 2000), resultado do longo período de exploração florestal da área (mais de 50 anos de cultivos sucessivos com plantações mono específicas de eucalipto) sem reposição de N (Vaz & Gonçalves, 2002).

Até o fechamento da copa (aproximadamente 24 meses), a demanda de N é aumentada, graças ao

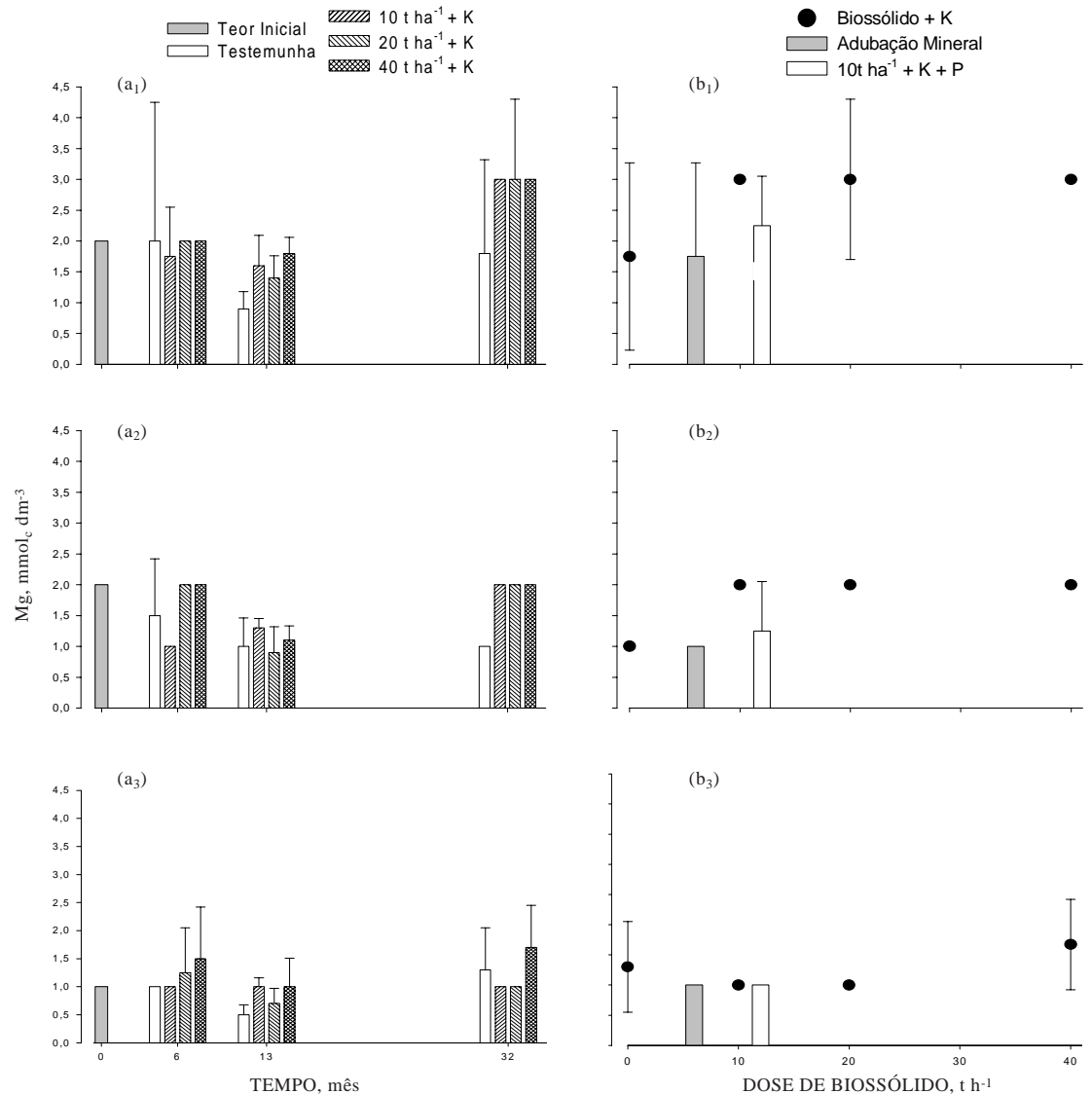


Figura 7. Teores de magnésio (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

estádio de rápida síntese de folhas e galhos (Gonçalves et al., 2000a). Observou-se que, aos 24 e 36 meses de idade, os teores foliares de N foram menores que os iniciais, nos tratamentos com biossólido, em decorrência de uma ou mais dessas causas: (a) diluição das quantidades de N numa maior biomassa foliar, ou seja, a assimilação de N não se manteve proporcional à formação de folhas ao longo do tempo, decorrente da velocidade de crescimento foliar maior do que a absorção de N ou da queda da disponibilidade de N no solo com o tempo (causa mais provável); (b) diminuição da

demanda de N pela árvore, graças ao fechamento de copas e à queda do metabolismo foliar, ocasionada por maior auto e intercompetição foliar por luz e água, sobretudo nas porções mais velhas das copas, e (c) retranslocação interna de N.

O aumento dos teores de P-resina verificado nos últimos meses (Figura 4) não resultou em aumento de teores de P no tecido foliar (Figura 10); os teores de P apresentaram baixa variação ao longo do tempo e sem correlação com as doses de biossólido. No tratamento que recebeu adubação mineral, o teor

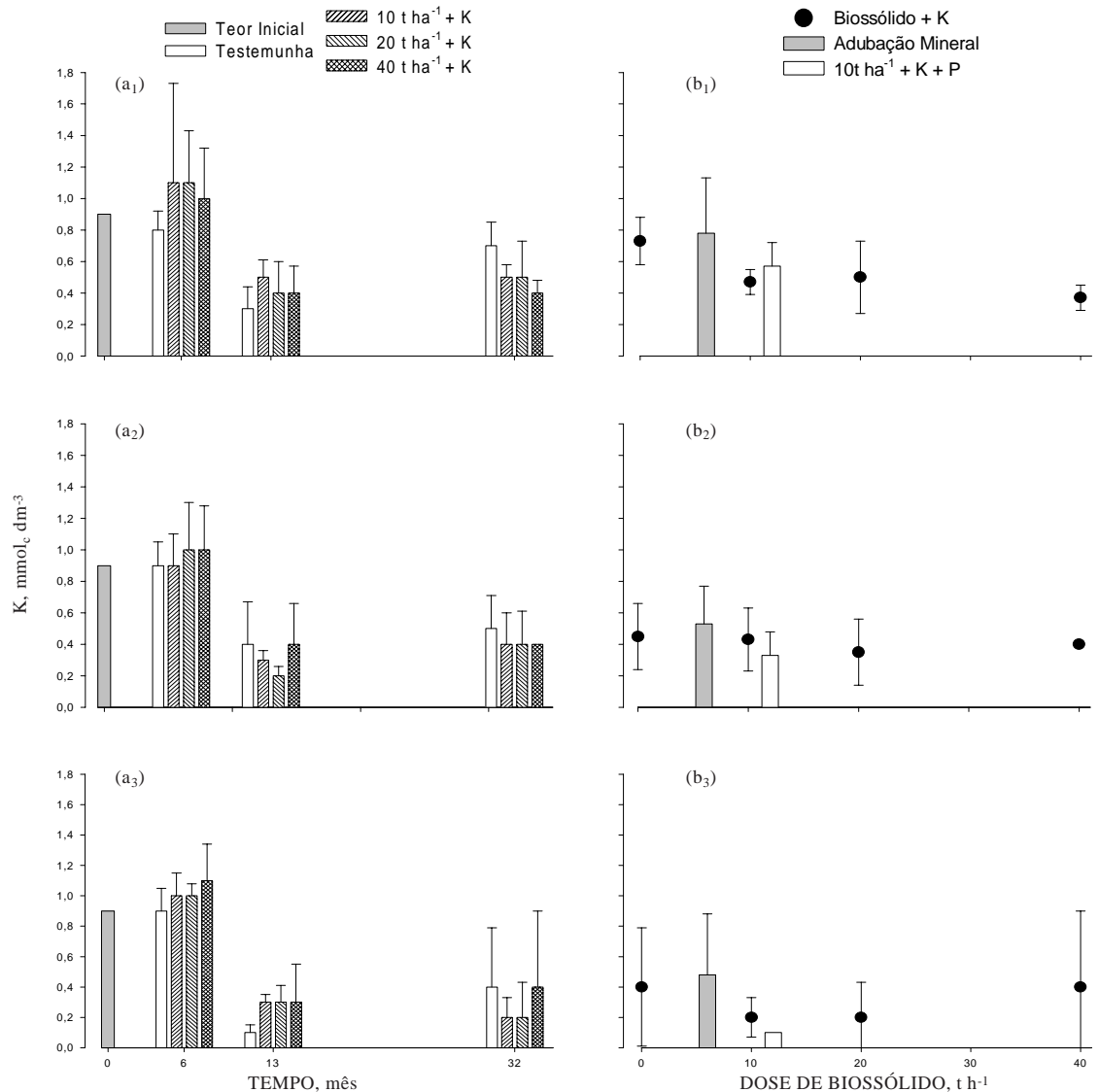


Figura 8. Teores de potássio (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

de P foi bem maior do que nos demais tratamentos, aos 12 meses de idade (Figura 10), graças à rápida assimilação do P solúvel aplicado. Com o passar do tempo, o teor de P neste tratamento caiu, em decorrência do efeito de diluição foliar e da diminuição do teor de P no solo.

Nos tratamentos, cujas doses aplicadas foram de 15, 20 e 40 t ha⁻¹ + K e 10 t ha⁻¹ + K + P, o aumento do teor de P foi verificado aos 24 meses, seguido de diminuição aos 36 meses de idade. A não-resposta ao aumento do teor de P no solo, nesta idade, pode estar mascarada: (a) pelo pouco tempo decorrido

entre a maior taxa de disponibilização de P e a amostragem realizada, e (b) pelo retranslocamento de P das folhas para outras partes, como a casca, em estágio de maior crescimento (dreno forte). A alocação de P para a casca pode atingir 90 % do P das folhas (Bellote & Silva, 2000). A diferença entre os teores, aos 24 e 36 meses de idade, sustenta este argumento. Outra possibilidade para a não-resposta relaciona-se com a baixa absorção de P nesta fase de desenvolvimento. Segundo Barros et al. (1982), os níveis críticos de P para o crescimento inicial de mudas de eucalipto são elevados, demonstrando que,

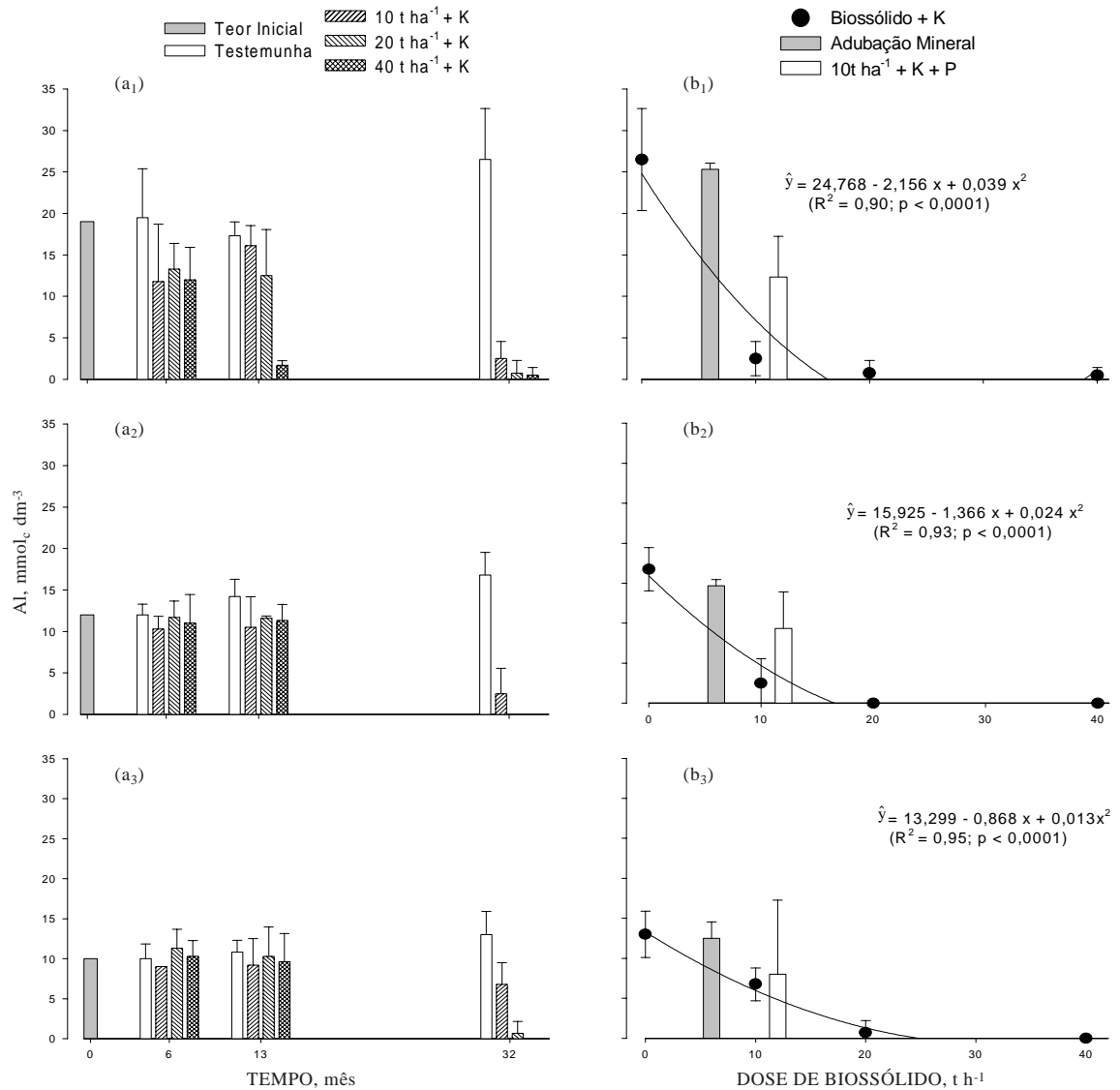


Figura 9. Teores de alumínio (média \pm intervalo de confiança) aos 0, 6, 13 e 32 meses da aplicação do biossólido (doses 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ + K), nas profundidades de 0-5 (a₁), 5-10 (a₂) e 10-20 cm (a₃), e comparação entre tratamentos, aos 32 meses da aplicação do biossólido, nas camadas 0-5 (b₁), 5-10 (b₂) e 10-20 cm (b₃).

no estágio muito jovem (menos de seis meses pós-plantio), o eucalipto é pouco efetivo na sua absorção de P (principalmente, em razão do sistema radicular restrito). Após o fechamento das copas, fase caracterizada pela maior taxa de acúmulo de nutrientes na biomassa vegetal, maior ciclagem e maior eficiência de uso de nutrientes (Gonçalves et al., 2000a), o povoamento mostra-se mais independente de fontes extras de nutrientes, diminuindo a resposta ao biossólido.

Os teores foliares de K e Mg não apresentaram diferenças entre os tratamentos com biossólido, ao

longo do tempo (Figura 10). A diminuição dos teores de K até os 32 meses de idade, para todos tratamentos que receberam biossólido, predominantemente, deve ser resultado da retranslocação interna desse nutriente ou então da absorção antagônica do Ca em relação ao K. Segundo Vaz & Gonçalves (2002), o maior teor de K na testemunha (aos 12 meses de idade) em relação aos demais tratamentos deve-se ao efeito de concentração, causado pelo menor crescimento da área foliar. Interpretação semelhante pode ser dada aos resultados obtidos para o Mg.

A elevada disponibilidade de Ca ocorrida nos últimos meses não influenciou na concentração foliar aos 32 meses de idade, a qual permaneceu inalterada em relação à amostra anterior (Figura 10). Um possível aumento na taxa de absorção de Ca, não refletida nos teores foliares, pode ser atribuída, em parte, ao direcionamento deste nutriente para a síntese de casca e de lenho (Gonçalves et al., 2000a).

O aumento do teor foliar de S foi evidente apenas na idade de 24 meses (Figura 10). Após esta idade, uma possível diminuição na absorção, o efeito diluição e as perdas por lixiviação são potenciais causas para a diminuição dos teores foliares deste nutriente.

Em relação aos micronutrientes estudados (Figura 11), apenas o Mn mostrou sensível relação com as doses de biofósforo aplicadas, diminuindo seu teor foliar com o aumento das doses. O Fe, Cu e Zn, aos 32 meses, apresentaram menores teores que nas amostragens anteriores, não apresentando diferenças entre os tratamentos. Vaz & Gonçalves (2002) chamam a atenção para o menor teor foliar de Zn, aos 12 meses de idade, no tratamento que recebeu adubação mineral, podendo estar implícito o antagonismo entre este nutriente e o P aplicado na fertilização de base. A diminuição dos teores de micronutrientes, constatada 32 meses após a

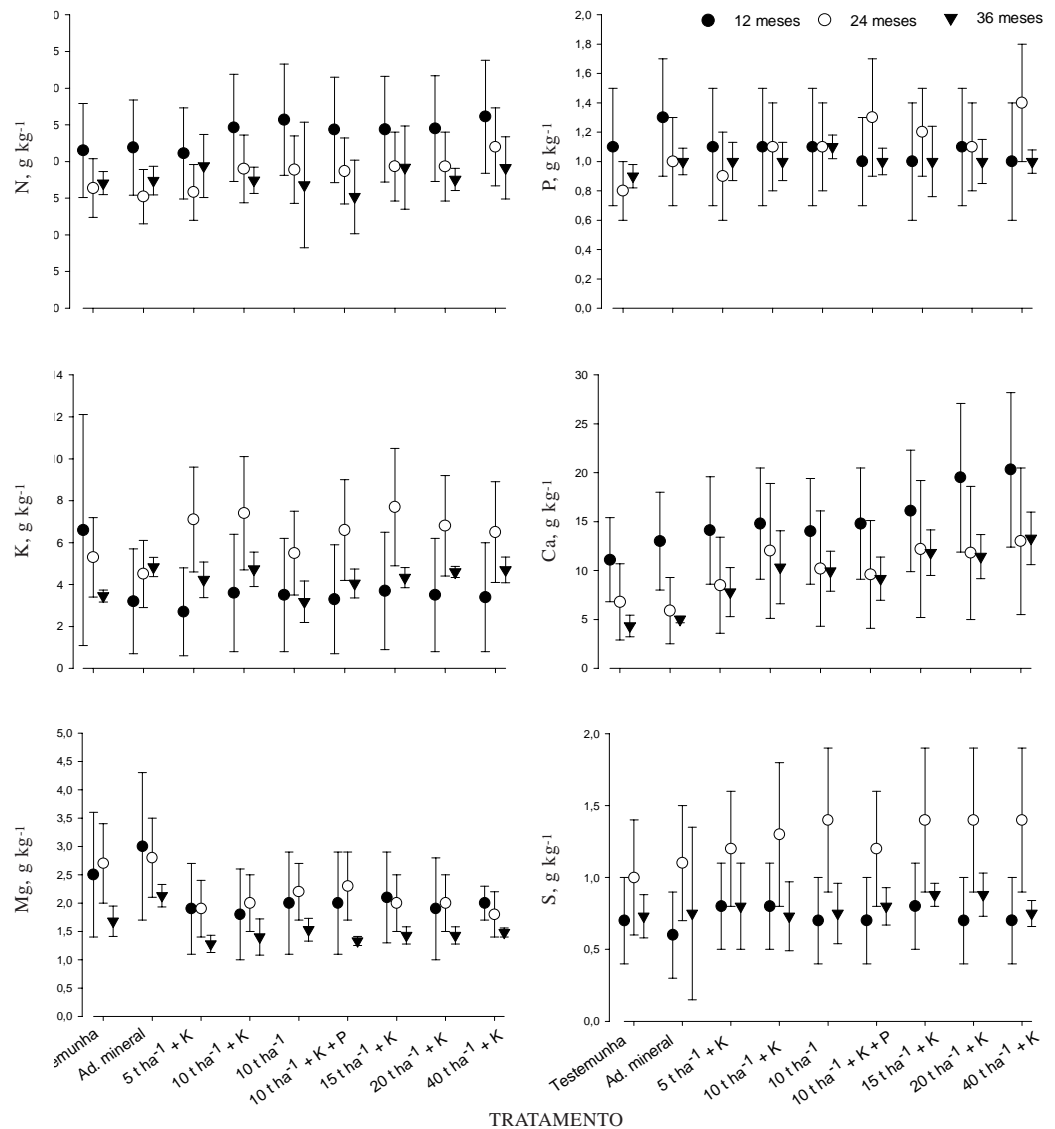


Figura 10. Concentração foliar de macronutrientes (média \pm intervalo de confiança) aos 12, 24 e 36 meses de idade das plantas, 8, 20 e 32 meses depois da aplicação do biofósforo, respectivamente, nos diferentes tratamentos.

aplicação de biossólido, pode ser atribuída em parte ao efeito diluição, decorrente do aumento da biomassa e da taxa de absorção igual ou inferior ao das épocas anteriores.

Produção de madeira

O aumento das doses de biossólido, de 0 a 40 t ha⁻¹, resultou numa resposta quadrática em termos de produtividade de madeira sem casca, aos 12, 24 e 36 meses de idade (Figura 12). A aplicação do biossólido aumentou a produção de madeira acima da adubação convencional, mais evidente aos 36 meses de idade. Nesta idade, a produção média do tratamento sob adubação mineral foi de 35,9 t ha⁻¹. Pela equação de regressão ajustada, esta produção seria conseguida com a aplicação de 12 t ha⁻¹ de biossólido, e a produção máxima de madeira (45,5 t ha⁻¹), 27 % maior do que a obtida com adubação mineral, seria conseguida com a aplicação de 37 t ha⁻¹ de biossólido.

A suplementação da dose de 10 t ha⁻¹ com K e P resultou em uma produção de madeira equivalente à dose de 40 t ha⁻¹ + K. Este fato, considerando os resultados de 12, 24 e 36 meses de idade, faz com que a tomada de decisão quanto à melhor dose a ser aplicada considere, além de aspectos econômicos, o

efeito residual. Dos 12 aos 24 meses, o incremento de biomassa de madeira foi de 46 e, de 24 %, dos 24 aos 36 meses de idade, ou seja, houve diminuição na taxa de incremento médio mensal. Esta queda pode estar, nestes tratamentos, associada à menor disponibilidade de nutrientes, como N, P, S, Ca e Mg, aos 36 meses (Figuras 2, 4, 5, 6 e 7). Comportamento semelhante foi observado para a adubação com 10 t ha⁻¹, sem suplementação com K, o qual apresentou, para estes dois períodos, incremento de 57 e 22 %, respectivamente. A deficiência de K no solo também pode estar influenciando este comportamento.

Para os demais tratamentos com biossólido, foram observadas quedas neste incremento até os 36 meses de idade, com exceção das doses de 5 e 10 t ha⁻¹ + K, cujos incrementos médios permaneceram em ascensão (58 e 71 %, para a primeira dose, e 42 e 71 %, para a segunda dose, respectivamente). Embora tenha havido queda no incremento médio de madeira, para estes dois períodos, os tratamentos que receberam biossólido atuaram de forma a aumentar o patamar de produtividade de madeira nestes períodos, ou seja, mesmo havendo esta queda, a produtividade permaneceu alta em relação à adubação mineral. O esgotamento de K pode ser a

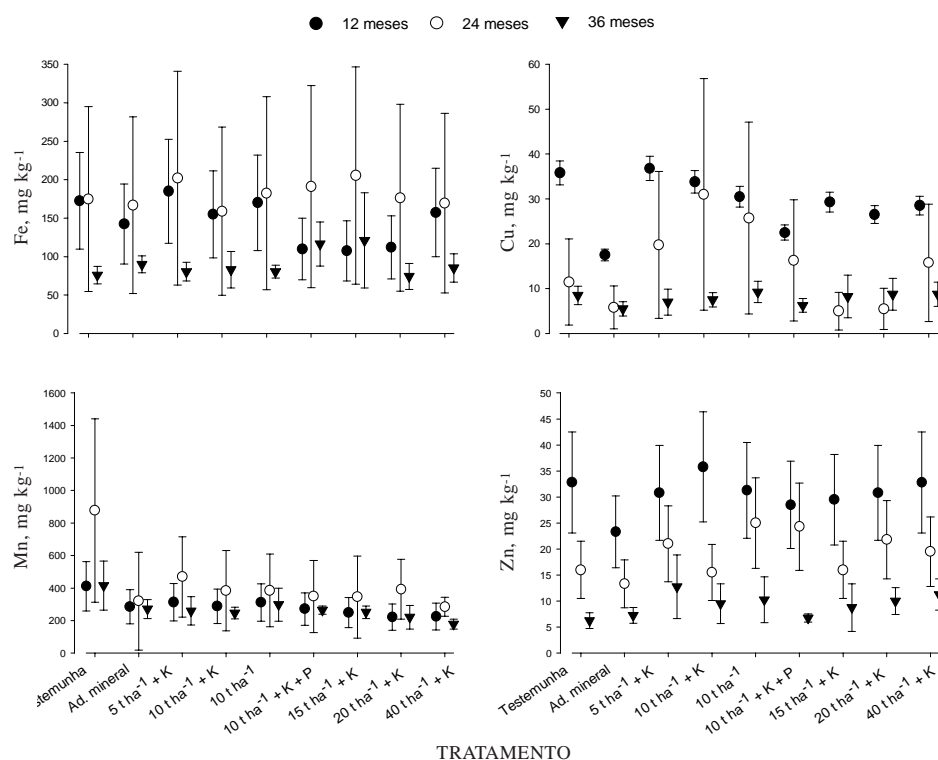


Figura 11. Concentração foliar de micronutrientes (média \pm intervalo de confiança) aos 12, 24 e 36 meses de idade das plantas, 8, 20 e 32 meses depois da aplicação do biossólido, respectivamente, nos diferentes tratamentos.

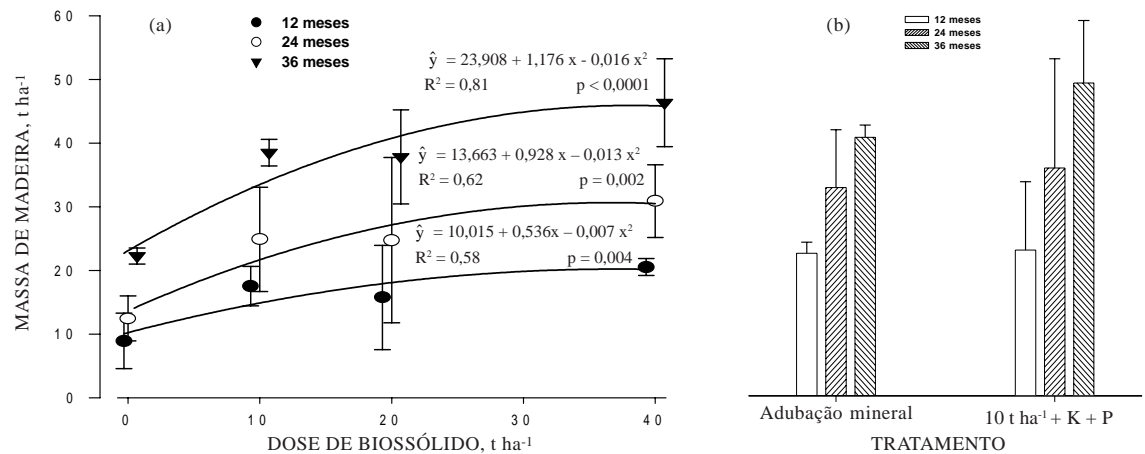


Figura 12. Biomassa seca de madeira sem casca (média ± intervalo de confiança) em resposta às doses crescentes de biossólido, com suplementação de K (a) e resposta à adubação mineral e à aplicação de 10 t ha⁻¹ + K + P (b), aos 12, 24 e 36 meses de idade (8, 20 e 32 meses depois da aplicação do biossólido).

causa. Para o tratamento com 40 t ha⁻¹ + K não houve diminuição ou aumento de produtividade média (50 e 50 %, respectivamente).

CONCLUSÕES

1. A fertilidade do solo aumentou gradualmente após a aplicação do biossólido. Houve aumento dos teores de matéria orgânica, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, de P-resina e de Ca trocável, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

2. O biossólido influenciou positivamente a nutrição das plantas, gerando uma produção de madeira semelhante à obtida no tratamento que só recebeu adubação mineral com uma dose de 12 t ha⁻¹ de biossólido (estimada por regressão). A produção máxima estimada de madeira (45,5 t ha⁻¹) seria conseguida com a aplicação de 37 t ha⁻¹ de biossólido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), pelo apoio financeiro às pesquisas, e ao CNPq, pelas bolsas de produtividade em pesquisa e iniciação científica.

LITERATURA CITADA

- ANDRADE, C.A. & MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. Sci. For., 58:59-72, 2000.
- BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M. & ADAMS, M.A., eds. Nutrition of eucalypt. Melbourne, CSIRO, 1996. p.342-343.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & GOMES, J.M. Interpretação de análises químicas de solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. R. Árvore, 6:38-44, 1982.
- BEKUNDA, M.A.; SMETHURST, P.J.; KHANNA, P.K. & WILLET, I.R. Effects of post-harvest residue management on labile soil phosphorus in a *Pinus radiata* plantation. For. Ecol. Manag., 38:13-25, 1990.
- BELLOTE, A.F.J. & SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. p.105-133.
- CHAVES, L.H.G. & LIBARDI, P.L. Lixiviação de K e Ca + Mg influenciada pelo pH. R. Bras. Ci. Solo, 19:145-148, 1995.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR. Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná. Curitiba, 1997. 96p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SANEAM. Aplicação de biossólido de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999. 33p. (Manual Técnico)
- COSTA, M.P. Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1983. 137p. (Tese de Mestrado)
- DURIEZ, M.M. Movimentação e lixiviação de Ca e K em resposta à calagem e adubação potássica em colunas de solos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 102p. (Tese de Mestrado)
- GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B. van; GONÇALVES, J.C. Florestais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. p.247-259.

- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G. & GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000a. p.1-57.
- GONÇALVES, J.L.M.; VAZ, L.M.S.; AMARAL, T.M. & POGGIANI, F. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: II Efeito na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. São Paulo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2000b. p.179-196.
- KIEHL, E.J. Fertilizantes orgânicos. Piracicaba: Agronômica "Ceres", 1985. p.26-84.
- MARIA, I.C. Influência da matéria orgânica sobre o calcário aplicado sobre o solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1986. 90p. (Tese de Mestrado)
- MELO, W.J. & MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.109-141.
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O. & PAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. R. Bras. Ci. Solo, 16:209-215, 1992.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 300p.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- ROCHA, M.T. Utilização de lodo de esgoto na agricultura: um estudo de caso para as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 140p. (Tese de Mestrado)
- ROSATO, F.M. Efeito da calagem e da matéria orgânica sobre a acidez de cinco solos do município de Piracicaba. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1978. 43p. (Tese de Mestrado)
- SANTOS, H.F.; GUIMARÃES, M.O. & GIUSTI, E.A. Uso do lodo de ETES em reflorestamentos. In: ENCONTRO TÉCNICO DA ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS DA SABESP, São Paulo, 1997. Anais. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1997. p. 1-23.
- SARRUGE, J.R. & HAAG, H. P. Análise química em plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1974. 56p.
- SIGMAPLOT software. Version 8 ed. SPSS Inc., Chicago, 2002.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N. & MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. p.79-104.
- UCHÔA, S.C.P. Dinâmica de formas lábeis e não-lábeis de enxofre no solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 105p. (Tese de Doutorado)
- VAZ, L.M.S. & GONÇALVES, J.L.M. Uso de biossólidos em povoamento de *Eucalyptus grandis*: Efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. R. Bras. Ci. Solo, 26:747-758, 2002.