

Nitrogênio e metais pesados no solo e em árvores de eucalipto decorrentes da aplicação de biossólido em plantio florestal

Nitrogen and heavy metals in soil and *Eucalyptus* trees due to biosolid applicationMarta Velasco-Molina¹, Maria Emília Mattiazzo², Cristiano Alberto de Andrade³ e Fábio Poggiani⁴**Resumo**

O objetivo do trabalho foi avaliar, no solo e em árvores de eucalipto, os teores de nitrogênio (N) e dos metais pesados cádmio (Cd), crômio (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni) e zinco (Zn), cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólido alcalino em doses de 10, 20 e 40 t ha⁻¹ (base seca) a um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico. O delineamento estatístico utilizado foi de blocos casualizados para tratamentos e repetições. Os resultados obtidos permitiram concluir que a aplicação do biossólido em dose superior a 20 t ha⁻¹ resultou em aumento dos teores de N-total em profundidade no solo, porém este incremento não implicou em riscos ambientais diferentes dos decorrentes da fertilização mineral. As concentrações foliares de N após 55 meses da aplicação do biossólido não foram influenciadas pelo aporte desse nutriente via doses do resíduo, o que foi atribuído à redução da demanda de N pelo eucalipto, bem como ao aumento do suprimento desse nutriente via reciclagem bioquímica na medida em que a idade do povoamento aumentou. Quanto aos metais pesados, para Cd e Cr não foram verificados efeitos do biossólido nos teores no solo, nem evidências de alteração na fitodisponibilidade em função da aplicação do resíduo. No entanto, Cu, Ni e Zn, extraídos por Mehlich 3, aumentaram no solo do tratamento com a dose de 40 t ha⁻¹, indicando a possibilidade de lixiviação e incremento na fitodisponibilidade desses metais quando da aplicação do biossólido na dose de 40 t ha⁻¹ (base seca), embora esse aumento não tenha representado risco para a cultura do eucalipto.

Palavras-Chave: Lodo de esgoto, Nitrato, Lixiviação, Fitodisponibilidade, Latossolo, Extrator, Mehlich

Abstract

In the study, an evaluation on N and Cd, Cr, Cu, Ni and Zn in soil and in *Eucalyptus grandis* leaves was effected in an experimental area where biosolid was applied in levels of 10, 20 and 40 t ha⁻¹ (dry weight basis), 55 months ago. The experimental design adopted was randomized blocks, for treatments and replications. The results obtained, after 55 months of biosolid application, allows the conclusions: there was an increase on nitrogen level in the deepest soil layer that was evaluated (60-90 cm) due to biosolid application in levels of 20 or 40 t ha⁻¹, but the environmental risk of this increase is not different from the one that is caused by the use of mineral fertilizers. The nitrogen level in *Eucalyptus grandis* leaves was not affected by biosolid application. The levels of Cd and Cr did not increase in the soil and no availability of those metals to the trees was observed. There was an increase, over time, in the soil level of Cu, Ni and Zn removed by Mehlich extractant, in the treatment using 40 t ha⁻¹ of biosolids. These increases indicated the possibility of mobility and plant availability of those metals, although these increases did not represent any harm effects to *Eucalyptus grandis* trees.

Keywords: Sewage sludge, Nitrate, Leaching, Plant availability, Extractant, Mehlich

INTRODUÇÃO

Grande parte das áreas florestais no Brasil está localizada em solos de baixa fertilidade, degradados ou em processo de degradação. Muitos desses processos são, de alguma forma, provoca-

dos pela própria atividade florestal (HARRISON *et al.*, 1996).

O uso de resíduos orgânicos em povoamentos de eucaliptos vem sendo praticado por diferentes empresas florestais do Brasil, visando minimizar os aspectos negativos do manejo intensivo

¹Mestre pelo Curso de Solos e Nutrição de Plantas do Departamento de Solos da ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: marvemna@yahoo.es

²Pesquisadora do Biossólido Agricultura e Ambiente - Rua Campos Sales, 1818 - sala 24 - Piracicaba, SP - 13416-310 – E-mail: mila@biossolidos.com.br

³Pesquisador do Centro de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agronômico de Campinas – Caixa Postal 28 – Campinas, SP – 13020-902 - E-mail: andrade@iac.sp.gov.br

⁴Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: fpoggian@esalq.usp.br

das florestas plantadas, melhorando a produtividade e diminuindo os custos de aplicação de fertilizantes minerais (SANTOS e TSUTYA, 1997; MORO, 1994; ZEN *et al.*, 1994). Dentre esses resíduos destaca-se o lodo de esgoto, que após um processo de tratamento é, usualmente, referido como bio sólido.

Os teores de matéria orgânica e nutrientes em bio sólidos são os principais atrativos para seu uso florestal. No entanto, a presença de metais pesados e a possibilidade de lixiviação de nitrato no perfil do solo em áreas tratadas com esse resíduo merecem especial atenção. Quanto aos primeiros, uma grande vantagem da aplicação desse tipo de resíduo em plantações florestais consiste no fato dos principais produtos destas culturas não serem destinados à alimentação humana ou animal, possibilitando uma maior segurança quanto à dispersão de eventuais contaminações (POGGIANI e BENEDETTI, 2000).

No que se refere ao nitrogênio (N), ele se apresenta nos bio sólidos predominantemente sob forma orgânica e em teores variáveis em função da origem e tratamento dos esgotos e do condicionamento dos lodos adotado pela estação (ETE) (ANDRADE, 2004). Após a aplicação no solo, as reações de mineralização do N orgânico promovem a liberação de formas inorgânicas de N. Sob condições aeróbias de degradação do material orgânico dos bio sólidos, parte significativa do N inorgânico é convertida para nitrato que, se não for absorvido pelas plantas ou imobilizado na biomassa microbiana, torna-se passível de ser perdido por lixiviação no perfil do solo, com a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas.

Diversos trabalhos em solos tropicais com carga variável e com culturas de interesse agrônomo têm sido desenvolvidos, mostrando potencial de contaminação de águas subterrâneas pela lixiviação de nitrato a partir da aplicação de doses de bio sólidos (OLIVEIRA, 1995; ANJOS e MATTIAZZO, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2001). Em áreas florestais, tais informações são ainda escassas e inconsistentes, podendo-se citar nesse sentido os trabalhos de Andrade e Mattiazzo (2000) e de Soares (2003), com resultados contrastantes.

No ano de 1998, um convênio firmado entre o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), iniciou, pioneiramente no Brasil, um experimento de campo com aplicação de doses de um bio sólido alcalino em área cultivada com *Eucalyptus*

grandis. Esse estudo vem sendo conduzido, desde então, com pesquisas em diversas linhas do conhecimento: (i) fertilidade do solo, nutrição, crescimento e produção das árvores; (ii) ciclagem de nutrientes; (iii) fitodisponibilidade e lixiviação de N e metais pesados; (iv) microbiologia do solo; (v) viabilidade econômica; e (vi) impacto sobre a fauna silvestre. A investigação sobre a fitodisponibilidade e lixiviação de N e dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni, e Zn no período inicial (primeiros dois anos) de crescimento do eucalipto evidenciou aumento da disponibilidade de N às árvores e, exceção feita para o Zn, sem indicativos de lixiviação de N, nem dos metais Cd, Cr, Cu e Ni com o aumento das doses do bio sólido até 40 t ha⁻¹ (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000).

Considerando a carência de informações sobre a dinâmica do N e de metais pesados em áreas de produção florestal, bem como a necessidade de estudos de longo prazo quando se considera o ciclo de exploração dessas espécies, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar, no solo e nas árvores, os teores de N e metais pesados decorrentes da aplicação de doses de um bio sólido a um Latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis*.

MATERIAL E MÉTODOS

Local do estudo e caracterização do solo

O estudo foi desenvolvido em área pertencente à Estação Experimental da ESALQ/USP, em Itatinga, SP, a aproximadamente 200 km da cidade de São Paulo.

O clima é tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, isto é, mesotérmico de inverno seco, com temperatura média do mês mais frio (julho) inferior a 18°C e temperatura média do mês mais quente (janeiro) superior a 22°C. Na Figura 1 são apresentados os dados climáticos coletados na estação meteorológica situada na própria estação experimental, cobrindo todo o período de estudo (55 meses).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, A moderado, textura média. As características químicas para fins de fertilidade, determinadas segundo recomendado em Van Raij e Quaggio (1983), e granulométricas e teores de óxidos, determinadas de acordo com Camargo *et al.* (1986), são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Esses resultados referem-se à condição inicial do solo, previamente à instalação do experimento.

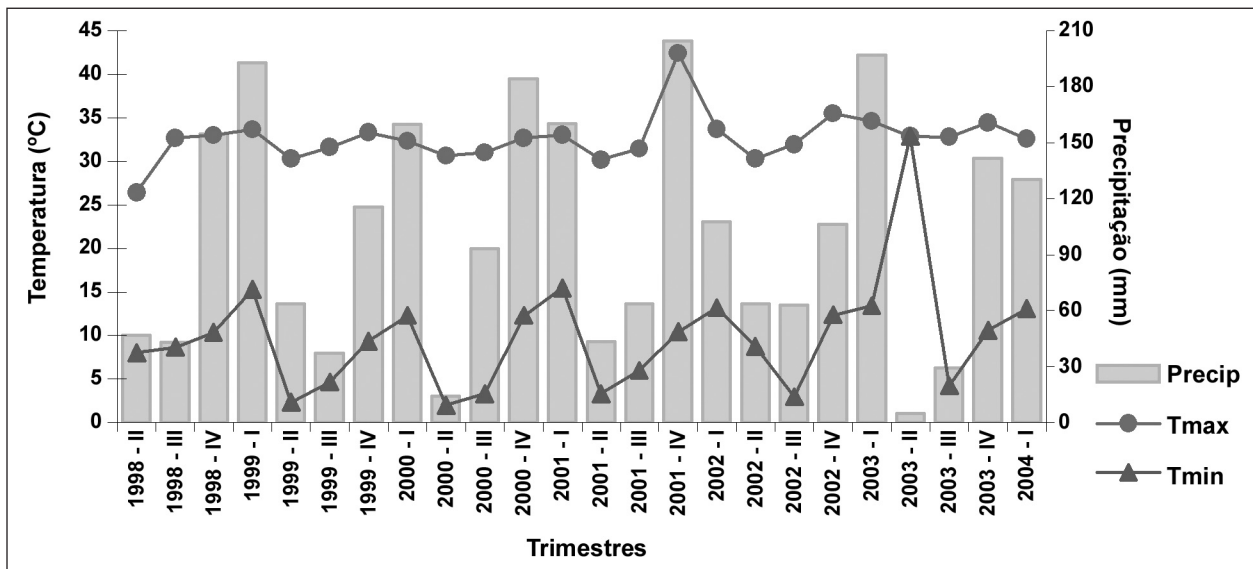


Figura 1. Médias trimestrais da temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) precipitação pluviométrica acumulados no trimestre, durante o período de estudo (Quarterly means of the maxima (T max) and mínima (T min) temperatures. Precipitation (Precip) accumulated in the quarters, during the experimental period)

Tabela 1. Características químicas do solo (camadas 0-30, 30-60 e 60-90 cm) utilizado no experimento (Chemical attributes of the soil (0-30, 30-60, 60-90 layers) in the experimental plots)

Profundidade	pH	C	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmolC dm ⁻³				%	%
0-30	4,0	9,3	1	1,2	1	1	34,0	7	3	37	9	69
30-60	4,0	8,7	1	0,5	1	1	31,0	6	3	34	7	71
60-90	4,1	8,1	1	0,3	1	1	28,0	5	2	30	8	68

Tabela 2. Granulometria e teores de óxidos de ferro, alumínio e silício no solo (camadas 0-30, 30-60 e 60-90 cm) (Soil texture and concentrations of iron, aluminum, and silicon oxides (0-30, 30-60, 60-90 layers))

Profundidade	Argila	Areia grossa	Areia fina	Silte	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
cm	g kg ⁻¹						
0-30	168	532	241	59	25,0	64,0	45,0
30-60	190	495	266	49	27,4	64,0	47,0
60-90	197	496	278	29	28,8	76,0	48,0

Espécie florestal e bio sólido

A espécie florestal empregada neste estudo, *Eucalyptus grandis*, foi escolhida pela importância econômica que representa no Estado de São Paulo para a produção de celulose, papel e madeira. Nesta região, é geralmente cultivada em solos de baixa fertilidade natural, porém mostra respostas significativas quando fertilizadas com N, P e K (NOVAIS *et al.*, 1990), aspecto este também considerado para a escolha da espécie. As mudas de *Eucalyptus grandis* utilizadas no ensaio foram obtidas por meio de propagação de sementes.

O bio sólido utilizado foi gerado pela ETE-Barueri (SABESP), e foi proveniente do processo conhecido como lodo ativado convencional com aeração por ar difuso e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários, com posterior estabilização química do resíduo com cal hidratada e cloreto férrico. Algumas características químicas do bio sólido utilizado foram: pH_{água} = 10,6; Umidade (65 °C) = 615,2 g kg⁻¹; C-orgânico = 165,12 g kg⁻¹; N total = 15,34 g kg⁻¹; P-total = 10,6 g kg⁻¹; K = 1,23 g kg⁻¹; Ca = 149,95 g kg⁻¹; Mg =

3,76 g kg⁻¹; Cd = 14 mg kg⁻¹; Cr = 378 mg kg⁻¹; Cu = 394 mg kg⁻¹; Ni = 227 mg kg⁻¹; e Zn = 1555 mg kg⁻¹ (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000).

Instalação do experimento

A instalação do experimento ocorreu em março de 1998, após corte raso de uma plantação de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade e novo plantio (3 x 2 m) com a mesma espécie, nas entrelinhas da antiga plantação, no sistema de cultivo mínimo. Em julho de 1998 foi realizada a aplicação do bio sólido sobre o solo e sem posterior incorporação, nas entrelinhas da cultura e com umidade original. Nove tratamentos foram distribuídos aleatoriamente em cada um dos quatro blocos locados no campo, num total de 36 parcelas experimentais. Cada parcela (20 x 30 m) foi constituída de 100 plantas, 10 linhas com 10 plantas cada, sendo que a área útil compreendeu as 36 plantas centrais. Detalhes sobre a implantação e condução inicial do experimento podem ser encontradas em Poggiani *et al.* (2000).

Dos nove tratamentos aplicados inicialmente, seis foram avaliados neste trabalho, 55 meses após a instalação do experimento: (i) Controle, sem fertilização mineral ou aplicação de bio sólido; (ii) Adubação Mineral (AM); (iii) 10 t ha⁻¹ de bio sólido + complementação com K (10+K); (iv) 10 t ha⁻¹ de bio sólido + complementação com K e P (10+KP); (v) 20 t ha⁻¹ de bio sólido + complementação com K (20+K); e (vi) 40 t ha⁻¹ de bio sólido + complementação com K (40+K).

No tratamento AM foi feita a aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total) e adubação com 127 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P, 137 kg ha⁻¹ de K, 1,3 kg ha⁻¹ de B e 2,0 kg ha⁻¹ de Zn, parcelados durante o primeiro ano de crescimento do eucalipto. As complementações com K nos tratamentos que receberam bio sólido foram realizadas no primeiro ano de crescimento do eucalipto, de modo a atingir 137 kg ha⁻¹ de K (mesma quantidade aplicada no tratamento AM), levando-se em consideração as quantidades do nutriente fornecidas via doses do bio sólido. A complementação com P no tratamento com 10 t ha⁻¹ de bio sólido foi igual ao AM, ou seja, 60 kg ha⁻¹ de P.

Na Tabela 3 são apresentadas as quantidades de nutrientes e metais pesados adicionados aos diferentes tratamentos em função das doses de bio sólido e/ou da fertilização mineral recebida.

Amostragens, análises químicas e tratamento estatístico dos dados

O solo foi amostrado em fevereiro de 2003, nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm de profundidade, com trado do tipo holandês, retirando-se cuidadosamente a serapilheira e outros restos vegetais da superfície antes da introdução do trado no solo. Coletaram-se cinco amostras simples dentro de cada parcela experimental, as quais foram misturadas a fim de se obter, para cada profundidade, uma amostra composta. Esta foi dividida em duas subamostras, sendo que uma delas foi armazenada sob refrigeração a 4°C para determinação de N-

inorgânico (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) e da umidade, enquanto a outra subamostra foi seca ao ar, peneirada (malha 2 mm) e homogeneizada para as demais determinações analíticas previstas.

Os teores totais e extraídos com solução de Mehlich 3 (MEHLICH, 1984) dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn nas amostras de terra foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (AA 12/1475 Intralab-Gemini). Para obtenção do extrato para determinação dos teores totais, as amostras foram digeridas em microondas segundo metodologia proposta por Abreu *et al.* (2001).

O N-inorgânico das amostras de terra foi extraído, a partir das amostras úmidas, com solução 2 mol L⁻¹ de KCl, e a determinação do teor de N no extrato foi feita por destilação a vapor, seguindo metodologia proposta por Mulvaney, 1996.

O N-total foi determinado por combustão a seco em aparelho analisador de carbono e nitrogênio LECO CN-2000.

As amostras de folhas foram coletadas em março 2003, derrubando-se as duas árvores mais representativas de cada parcela. Foram coletados os segundo e terceiro pares de folhas completamente desenvolvidas, a partir do ápice dos ramos, de quatro galhos inseridos na base do terço superior da copa, obtendo-se, assim, uma amostra com mais de 500 folhas. Após coleta, as folhas, incluindo pecíolos, foram secas a 65°C em estufa de ventilação forçada e moídas em moinho tipo Wiley (20 mesh).

Nas folhas foram determinados os teores de N e dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn. O extrato para determinação dos metais pesados foi obtido por digestão das amostras de folhas com uma mistura de H₂O₂ e HNO₃ em microondas. A quantificação do teor dos metais presentes no extrato foi feita por espectrofotometria de absorção atômica (AA 12/1475 Intralab-Gemini). A concentração de N no tecido foliar foi determinada a partir de extrato sulfúrico das amostras, conforme apresentado em Tedesco *et al.* (1995).

Tabela 3. Quantidades totais de nutrientes e metais pesados adicionados via adubação mineral e doses de bio sólido (Nutrients and heavy metals added to the soil through the application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	N	P	K	Ca	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
	kg ha ⁻¹								
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AM	98	35	137	528	0	0	0	0	1,20
10+K	153	106	137	1449	0,14	3,78	3,94	2,27	15,55
10+KP	153	141	137	1449	0,14	3,78	3,94	2,27	15,55
20+K	307	212	137	2999	0,28	7,56	7,88	4,54	31,10
40+K	614	424	137	5998	0,56	15,12	15,76	9,08	62,20

Os dados de solo (para cada profundidade) e de folhas do eucalipto foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e teste de Tukey (5% de probabilidade) para comparação das médias, considerando como fatores de variação os blocos e os tratamentos.

Também foram feitas correlações estatísticas entre os teores dos elementos no solo e nas folhas do eucalipto para auxiliar na discussão dos resultados de fitodisponibilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nitrogênio

De modo geral, os teores de N-total no solo não diferiram entre os tratamentos testados, 55 meses após a aplicação do biossólido ou de fertilizantes minerais, até profundidade de 60 cm (Tabela 4). Na camada 60-90 cm, os teores de N-total nos tratamentos 20+K e 40+K mostraram-se superiores aos registrados no Controle, o que foi interpretado como evidência de percolação de N no perfil do solo em função da aplicação do biossólido. No entanto, os tratamentos 20+K e 40+K não diferiram da AM quanto ao teor médio de N-total na camada 60-90 cm.

Andrade e Mattiazzo (2000), avaliando o teor total de N no solo na mesma área experimental nos tratamentos Controle, 10+K, 20+K e 40+K, doze meses após a aplicação do biossólido, encontraram teores médios, nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm, respectivamente de

0,64; 0,47; 0,41; 0,38 e 0,31 g kg⁻¹. Comparando esses teores aos obtidos no presente estudo, para os mesmos tratamentos (Tabela 4), nota-se que são de mesma magnitude. Desse modo, pode-se inferir que o teor total de N no solo tem-se mantido estável no tempo, o que pode ser explicado por vários fatores, dentre eles: (i) a existência de compostos nitrogenados de baixa taxa de mineralização nos biossólidos (Soares, 2003); e (ii) a ocorrência de imobilização e/ou incorporação da fração residual do N contido no biossólido em formas mais resistentes a biodegradação (BOEIRA *et al.*, 2003).

Aumentos nos teores de N-total na camada superficial de solos tratados com doses de biossólidos têm sido verificados em alguns estudos em que o resíduo foi incorporado ao solo (OLIVEIRA *et al.*, 2001; FRANCO *et al.*, 2003), o que não foi realizado no presente trabalho. Em solo sob eucalipto e após 12 meses da aplicação de doses de biossólido até 40 t ha⁻¹, sem posterior incorporação, no sistema de cultivo mínimo, Soares (2003) observou redução da concentração de N-total no solo.

Os resultados de N-inorgânico foram semelhantes entre os tratamentos (Tabela 5), não confirmando a movimentação de N no perfil do solo. Deve-se considerar, porém, que os valores de desvio padrão foram elevados, ao contrário do verificado nas determinações de N-total, o que deve ter colaborado para que não fossem observadas diferenças significativas entre os tratamentos.

Tabela 4. Teor de nitrogênio total no solo em função da aplicação de doses de biossólido ou fertilizantes minerais. (Concentration of total nitrogen in the soil due to the application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	g kg ⁻¹				
Controle	0,58 ab ⁽¹⁾	0,38 a	0,31 a	0,25 a	0,22 b
AM	0,60 ab	0,45 a	0,34 a	0,34 a	0,24 ab
10+K	0,62 ab	0,40 a	0,50 a	0,27 a	0,26 ab
10+KP	0,56 b	0,46 a	0,32 a	0,30 a	0,31 ab
20+K	0,59 ab	0,38 a	0,38 a	0,33 a	0,33 a
40+K	0,70 a	0,41 a	0,34 a	0,31 a	0,31 a
Média	0,61	0,41	0,37	0,30	0,28
C.V. %	14,12	24,32	40,67	27,45	28,24

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Tabela 5. Teor de nitrogênio inorgânico no solo em função da aplicação de doses de biossólido ou fertilizantes minerais. (Concentration of inorganic nitrogen in the soil due to application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	7,3 a ⁽¹⁾	5,5 a	3,5 a	3,0 a	2,2 a
AM	8,4 a	5,9 a	6,0 a	1,2 a	2,2 a
10+K	8,5 a	6,4 a	6,1 a	5,3 a	6,0 a
10+KP	8,8 a	8,0 a	6,7 a	1,6 a	2,6 a
20+K	12,7 a	3,9 a	2,4 a	2,2 a	5,7 a
40+K	8,4 a	2,1 a	3,8 a	1,5 a	0,6 a
Média	9,0	5,3	4,8	2,5	3,2
C.V. %	47,18	84,38	61,06	115,14	97,81

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Andrade e Mattiazzo (2000) encontraram, aos doze meses da aplicação do bio sólido, teores médios de N-inorgânico superiores 63 a 91 % aos apresentados na Tabela 5, considerando os tratamentos Controle, 10+K, 20+K e 40+K. Tais diferenças devem estar relacionadas ao estágio de desenvolvimento das árvores, cujos estoques de N na biomassa tendem a aumentar com a idade do plantio florestal (ROCHA, 2002; VAZ, 2000).

Aumento dos teores de N-inorgânico após adição de bio sólidos tem sido freqüentemente encontrado na literatura, inclusive em profundidade no solo (LUO *et al.*, 2003; VEGA *et al.*, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2001). Novamente há que se destacar o papel da incorporação do resíduo ao solo nesses trabalhos, que deve aumentar a taxa de mineralização do N-orgânico e, conseqüentemente, a disponibilização de N-inorgânico, permitindo excesso de N-inorgânico que fica passível de lixiviação no perfil do solo se não houver absorção pelas plantas.

A concentração de N nas folhas de eucalipto não foi influenciada pelas doses de bio sólido, 55 meses após a aplicação (Tabela 6). A concentração média de N nas folhas, considerando todos os tratamentos, foi igual a 23,14 g kg⁻¹, superior ao que é considerado adequado para o eucalipto, entre 13 e 18 g kg⁻¹ (GONÇALVES *et al.*, 1997).

Na mesma área experimental, aos 12 (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000) e 16 meses (GUEDES, 2000) da aplicação do bio sólido, foram observados efeitos significativos das doses do resíduo na concentração foliar de N. Aos 36 meses esse efeito já não foi significativo (ROCHA, 2002), tal como verificado no presente estudo, 55 meses após a aplicação do bio sólido. A ausência de efeito das doses de bio sólido na concentração foliar de N do eucalipto, na medida em que a idade do plantio florestal avançou, é função da própria fisiologia da espécie. O eucalipto possui um estágio inicial de formação da copa, na qual a demanda de N é muito elevada, e após o fechamento das copas, fatores como luz e água passam a ser mais limitantes para o desenvolvimento das árvores (GONÇALVES *et al.*, 2000). Adicionalmente, após o fechamento das copas, a reciclagem bioquímica de N passa a suprir a maior parte do N demandado pelo eucalipto (ROCHA, 2002). Mesmo 12 meses após aplicação do bio sólido, o aumento da concentração foliar de N não foi atribuído inteiramente ao N mineralizado do bio sólido, sendo destacada a provável participação do N mineralizado do solo (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000), em

função de melhorias das condições para a atividade microbiana.

Tabela 6. Concentração de nitrogênio nas folhas de eucalipto. (Nitrogen concentration in the leaves of eucalypts)

Tratamento	N nas folhas (g kg ⁻¹)
Controle	22,63 a ⁽¹⁾
AM	22,13 a
10+K	20,63 a
10+KP	22,86 a
20+K	25,85 a
40+K	24,76 a
Média	23,14
C.V. %	10,91

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Dessa forma, em função do aumento da participação da ciclagem bioquímica no suprimento em N ao eucalipto, com o avanço da idade do plantio florestal, aos 55 meses da aplicação do bio sólido os teores de N no solo não correlacionaram significativamente com os teores foliares.

Metais pesados

Os teores totais de Cd e os extraídos com Mehlich 3 nas amostras de solo ficaram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado, indicando que se presente no solo, o metal encontra-se em concentração inferior a 0,6 mg kg⁻¹.

Os teores extraíveis de Cr no solo também estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado (0,5 mg kg⁻¹).

Quanto aos teores totais de Cr, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, com valores médios iguais a 14,61; 12,32; 11,96; 13,16 e 13,29 mg kg⁻¹, respectivamente para as camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm de profundidade.

Os teores totais de Cu no solo somente diferiram entre os tratamentos na camada 0-10 cm de profundidade, sendo observado maiores valores no tratamento 40+K, em comparação ao Controle e AM (Tabela 7).

As concentrações de Cu-extraível por Mehlich 3 tenderam a ser maiores, até 60 cm de profundidade, nos tratamentos que receberam bio sólido (Tabela 8). Na camada 0-10 cm, os tratamentos 20+K e 40+K exibiram teores do metal superiores aos encontrados no Controle e AM, não diferindo dos tratamentos com dose 10 t ha⁻¹ de bio sólido. Nas profundidades 10-20, 20-30 e 30-60 cm houve destaque para o tratamento 40+K, cujo teor médio foi sempre superior aos determinados no Controle e AM.

Tabela 7. Teor total de cobre no solo em função da aplicação de doses de bioossólido e fertilizantes minerais. (Concentration of total copper in the soil due to the application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	9,96 b ⁽¹⁾	10,67 a	9,91 a	11,17 a	11,66 a
AM	8,91 b	8,63 a	8,50 a	9,38 a	10,88 a
10+K	10,92 ab	9,73 a	8,90 a	9,63 a	10,65 a
10+KP	11,19 ab	11,39 a	9,68 a	10,65 a	11,33 a
20+K	11,41 ab	11,30 a	10,87 a	13,64 a	10,46 a
40+K	15,28 a	11,59 a	10,00 a	10,19 a	11,13 a
Média	11,28	10,55	9,64	10,78	11,02
C.V. %	17,46	17,34	15,53	28,83	12,34

(1) Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância)

Tabela 8. Teor de cobre no solo extraído com solução Mehlich 3 em função da aplicação de doses de bioossólido e fertilizantes minerais. (Concentration of copper in the soil, extracted with Mehlich 3 solution, due to application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	0,28 c ⁽¹⁾	0,33 b	0,40 b	0,33 b	0,43 A
AM	0,25 c	0,33 b	0,40 b	0,33 b	0,43 a
10+K	0,60 bc	0,53 b	0,53 ab	0,50 ab	0,53 a
10+KP	0,58 bc	0,68 b	0,53 ab	0,38 ab	0,45 a
20+K	0,90 b	0,68 b	0,50 b	0,40 ab	0,45 a
40+K	2,18 a	1,18 a	0,78 a	0,60 a	0,50 a
Média	0,80	0,62	0,52	0,42	0,46
C.V. %	31,81	34,90	22,42	24,38	23,55

(1) Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Aos 12 meses da aplicação do bioossólido, Andrade e Mattiazzo (2000) verificaram efeito significativo das doses de bioossólido no teor de Cu no solo extraído com Mehlich 3, somente na camada 0-10 cm, o que foi atribuído à baixa decomposição do bioossólido no solo, associada à pequena movimentação desse metal, que tende a formar complexos estáveis com ligantes orgânicos (LANDONIN e MARGOLINA, 1997). Nesse sentido, pode-se inferir que apesar da baixa mobilidade do Cu no solo, com o tempo, este metal pode alcançar maiores profundidades no perfil, o que explica os resultados apresentados na Tabela 8.

Com relação ao teor total de Ni no solo, não foram verificadas diferenças em função da aplica-

ção do bioossólido. Os teores médios de Ni-total foram iguais a 3,73; 2,59; 2,66; 1,77; e 0,97 mg kg⁻¹ nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm, respectivamente. No caso dos teores de Ni extraído pelo Mehlich 3, na camada 0-10 cm de profundidade, estes foram influenciados pelos tratamentos, sendo de 6 a 23 vezes maiores no solo das parcelas que receberam bioossólido, comparativamente aos tratamentos Controle e AM (Tabela 9). Abaixo de 10 cm de profundidade, o efeito do bioossólido no teor extraível de Ni não foi significativo, embora até 60 cm possa ser observada tendência de aumento das concentrações médias de Ni extraído com Mehlich 3, principalmente nos tratamentos com 10 t ha⁻¹ de bioossólido.

Tabela 9. Teor de níquel no solo extraído com solução Mehlich 3 em função da aplicação de doses de bioossólido e fertilizantes minerais. (Concentration of nickel in the soil, extracted with Mehlich 3 solution, due to application of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	0,06 b ⁽¹⁾	0,13 a	0,21 b	0,13 b	0,13 a
AM	0,04 b	0,21 a	0,15 b	0,25 b	0,30 a
10+K	0,53 ab	0,30 a	0,83 a	0,85 a	0,39 a
10+KP	0,26 b	0,41 a	0,53 ab	0,40 ab	0,20 a
20+K	0,56 ab	0,49 a	0,53 ab	0,29 b	0,34 a
40+K	0,93 a	0,65 a	0,40 b	0,09 b	0,51 a
Média	0,40	0,63	0,44	0,33	0,31
C.V. %	68,48	84,51	42,00	61,09	84,30

(1) Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Considerando que em biossólido alcalino, semelhante ao utilizado no presente experimento, a distribuição do Ni esteve entre as frações orgânicas (32,6%), óxidos (22,8%), residual (19,6%) e carbonatada (17,9%) (BERTONCINI, 2002), pode-se supor que houve mineralização das formas orgânicas às quais o Ni estava associado e/ou solubilização do carbonato, de forma a permitir a passagem do metal para o solo e sua posterior lixiviação no perfil. Em função destes resultados, há evidências de movimentação do Ni até 60 cm de profundidade e que esta movimentação no perfil do solo depende da dose de biossólido aplicada. O pH mais alto verificado no tratamento 40+K não impediu as transformações que ocorreram com o elemento.

O teor total de Zn na camada 0-10 cm do solo foi maior no tratamento 40+K, em comparação com os demais (Tabela 10).

O aumento do teor total de Zn no solo já havia sido observado por Andrade e Mattiazzo (2000) aos 12 meses da aplicação do biossólido. A manutenção do maior teor de Zn na camada 0-10 cm do solo do tratamento 40+K, durante todo o período, pode ser explicada pela ciclagem do nutriente proveniente da deposição de folhas, que foi maior nesse tratamento (GUE-

DES, 2005), e também pelo aporte de Zn via biossólido. Este último aspecto leva a presumir que o Zn acumulado esteja, prioritariamente, associado à fração carbonato, como verificado por Bertoncini (2002) em solo tratado com o biossólido alcalino da ETE-Barueri.

Nas camadas abaixo de 0-10 cm de profundidade, os teores totais de Zn não evidenciaram tendência nítida de movimentação no perfil em função da aplicação do biossólido. No entanto, analisando-se os resultados de Zn extraído com solução de Mehlich 3 (Tabela 11), pode-se afirmar que houve movimentação desse metal até 60 cm de profundidade.

Os teores de Zn extraídos com Mehlich 3 do solo do tratamento 40+K diferiram estatisticamente daqueles encontrados nos tratamentos AM e Controle até as profundidades de 30 e 60 cm, respectivamente. Outras diferenças em relação às doses de biossólido inferiores a 40 t ha⁻¹, provavelmente não foram evidenciadas devido à elevada variação dos dados, o que pode ser confirmado observando-se os coeficientes de variação (Tabela 11).

Aumentos dos teores trocáveis de Zn em solos tratados com biossólidos têm sido também observados em outros trabalhos (CAMARGO *et al.*, 2003; GALDOS *et al.*, 2003).

Tabela 10. Teor total de zinco no solo em função da aplicação de doses de biossólido e fertilizantes minerais. (Concentration of total zinc in the soil, due to addition of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	12,16 b ⁽¹⁾	16,30 a	14,50 ab	13,08 ab	10,62 a
AM	8,37 b	11,05 a	11,25 b	9,29 b	10,81 a
10+K	17,12 b	14,49 a	12,09 b	13,52 ab	12,35 a
10+KP	19,15 b	22,24 a	16,35 ab	17,30 ab	13,75 a
20+K	26,54 b	20,80 a	22,94 a	23,79 a	17,69 a
40+K	47,63 a	26,82 a	18,75 ab	18,11 ab	15,79 a
Média	21,83	19,62	15,98	15,85	13,50
C.V. %	41,48	46,89	28,42	35,23	32,83

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Tabela 11. Teor de zinco no solo extraído com solução Mehlich 3 em função da aplicação de doses de biossólido e fertilizantes minerais. (Concentration of the zinc in the soil, extracted with Mehlich 3 solution, due to addition of biosolids and mineral fertilization)

Tratamento	Profundidades (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
	mg kg ⁻¹				
Controle	0,63 b ⁽¹⁾	0,53 b	0,53 b	0,48 b	0,48 a
AM	0,63 b	0,55 b	0,55 b	0,58 ab	0,43 a
10+K	3,00 b	2,20 ab	1,85 ab	1,23 ab	0,78 a
10+KP	2,23 b	2,25 ab	1,15 ab	0,85 ab	0,53 a
20+K	4,20 b	2,18 ab	1,33 ab	0,73 ab	0,48 a
40+K	10,25 a	5,40 a	3,15 a	1,95 a	1,25 a
Média	3,49	2,18	1,43	0,97	0,65
C.V. %	48,00	66,79	61,07	62,76	66,67

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

Nas folhas de eucalipto, os teores de Cd e Cr estiveram abaixo do limite determinação do método analítico utilizado, respectivamente 0,06 e 0,5 g kg⁻¹, respectivamente.

As concentrações foliares de Cu não diferiram entre os tratamentos, enquanto as concentrações de Ni e Zn tenderam a ser superiores no tratamento 40+K, em comparação com o Controle e/ou AM (Tabela 12).

Tabela 12. Concentrações de metais nas folhas do eucalipto 55 meses após a aplicação de doses de biossólido e fertilizantes minerais. (Concentrations of heavy metals in eucalypts leaves 55 months after application of biosolids and mineral fertilization to the soil)

Tratamento	Cu	Ni	Zn
	mg kg ⁻¹		
Controle	6,22 a ⁽¹⁾	3,24 b	17,68 ab
AM	7,49 a	3,49 b	15,20 b
10+K	12,44 a	6,23 ab	27,37 ab
10+KP	9,47 a	4,99 ab	21,18 ab
20+K	10,95 a	4,23 ab	30,40 a
40+K	7,66 a	7,83 a	28,47 a
Média	9,54	5,00	23,38
C.V. %	27,64	34,27	23,89

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (nível 5% de significância).

É importante ressaltar que os tratamentos que receberam 10 t ha⁻¹ de biossólido não evidenciaram qualquer aumento da fitodisponibilidade dos metais Cu, Ni e Zn. Tal observação tem especial importância ao se considerar que o tratamento 10+KP tem mostrado as melhores respostas em termos de produção das árvores (VAZ e GONÇALVES, 2002; ROCHA, 2002).

As concentrações médias, considerando todos os tratamentos, obtidas para Cu (9,5 mg kg⁻¹) e Zn (23,4 mg kg⁻¹) estiveram dentro da faixa considerada adequada para eucalipto (GONÇALVES *et al.*, 1997). Para o Cu, embora não se tenham verificado diferenças significativas entre os tratamentos, os teores verificados nas folhas de eucalipto dos tratamentos 10+K e 20+K estiveram acima da faixa recomendada de 7 a 10 mg kg⁻¹.

As correlações estatísticas dos teores totais e extraíveis de Cu no solo a 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm de profundidade, com as concentrações foliares desse metal não foram significativas e, portanto, o extrator Mehlich 3 não foi eficiente na previsão da disponibilidade do Cu para o eucalipto (Tabela 13) na idade avaliada.

Para o Ni e o Zn, as correlações entre os teores totais e extraídos com Mehlich 3 (camada 0-10 cm do solo) e as concentrações nas folhas do eucalipto foram significativas, indicando a

proporcionalidade entre as quantidades fitodisponíveis desses metais e os teores totais no solo, bem como a eficiência do extrator Mehlich 3 na previsão da fitodisponibilidade de Ni e Zn para o eucalipto.

Tabela 13. Valores de coeficientes de correlação (r) obtidos a partir de correlações lineares entre os teores de cobre, níquel e zinco no solo (totais e extraídos com Mehlich 3) e nas folhas de eucalipto. (Correlation coefficients among the concentrations of copper, nickel, and zinc (total and extracted with Mehlich solution) in the soil and in eucalypts leaves)

Profundidade (cm)	Coeficiente de correlação (r)		
	Cu-total vs Cu-folha	Ni-total vs Ni-folha	Zn-total vs Zn-folha
0-10	-0,14	0,58*	0,50*
10-20	-0,16	0,37	0,30
20-30	0,05	-0,07	0,35
30-60	-0,01	0,14	0,57*
60-90	-0,11	0,27	0,31
	Cu-Mehlich vs Cu-folha	Ni-Mehlich vs Ni-folha	Zn-Mehlich vs Zn-folha
0-10	-0,06	0,60 *	0,45 *
10-20	-0,03	0,21	0,37
20-30	-0,12	0,26	0,39
30-60	0,23	0,08	0,36
60-90	0,22	0,04	0,37

* Significativo ao nível de p > t = 0,05

Diversos trabalhos da literatura têm mostrado a boa eficiência do extrator Mehlich 3 na previsão da fitodisponibilidade de Cu, Ni e Zn para culturas de interesse agrônomo (ANJOS e MATTIAZZO, 2001; MARTINS *et al.*, 2003; PIRES e MATTIAZZO, 2003).

CONCLUSÕES

- Embora a aplicação de biossólido em quantidades superiores a 20 t ha⁻¹ tenha resultado em aumento dos teores de N-total em profundidade no solo, este incremento não supõe riscos ambientais diferentes daqueles proporcionados pela fertilização mineral;
- A concentração foliar de nitrogênio não foi influenciada pelo aporte inicial do elemento via resíduo ou fertilizante mineral;
- As doses utilizadas de biossólido não proporcionaram aumentos nos teores de Cd e Cr no solo e não foram verificadas evidências de fitodisponibilidade desses metais;
- Os teores de Cu, Ni e Zn aumentaram com o tempo decorrido desde a aplicação do biossólido, indicando a ocorrência de lixiviação no perfil do solo e incremento na fitodisponibilidade quando da aplicação do biossólido na dose de 40 t ha⁻¹ (base seca), embora não tenha representado risco ao eucalipto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; ANDRADE, J.C. Determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro, manganês, zinco, níquel, cádmio, cromo e chumbo em ácido nítrico usando métodos da US-EPA. In: VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.251-261.
- ANDRADE, C.A. **Fração orgânica de bio sólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um latossolo cultivado com eucalipto**. 2004. 121p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ANDRADE, C.A.; MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de bio sólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.58, p.59-72, 2000.
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Extratores para Cd, Cu, Cr, Mn, Pb e Zn em latossolos tratados com bio sólido e cultivados com milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.337-344, 2001.
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolos repetidamente tratados com bio sólido. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.4, p.769-776, 2000.
- BERTONCINI, E.I. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em Latossolos sucessivamente tratados com bio sólido: extração seqüencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas**. 2002. 195p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- BOEIRA, R.C.; MAXIMILIANO, V.C.B.; MADARI, B. Efeito residual de quatro aplicações de lodos de esgoto sobre a disponibilidade de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM).
- CAMARGO, O.A.; MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C. Heavy metals accumulation in a orthox soil amended with sewage sludge and limestone In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, 7., Uppsala, 2003. **Proceedings**. Uppsala, 2003. (CD-ROM).
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: IAC, 1986. 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- FRANCO, A.; MARQUES, M.O.; GATTO, R.H.; NOGUEIRA, A.E.; CAMILOTTI, F.; NÓBILE, F.O.; TASSO JÚNIOR, L.C. Cana-de-açúcar cultivada com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no solo e plantas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM).
- GALDOS, M.V.; MARIA, I.C.; CAMARGO, O.A. Alterações em propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Eutrófico tratado com lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM).
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensidade do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-57.
- GONÇALVES, J.L.M.; VAN RAIJ, B.; GONÇALVES, J.C. Florestais. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, Fundação IAC, 1997. p.245-260. (Boletim Técnico, 100)
- GUEDES, M.C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (bio sólido) sobre Latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 154p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (bio sólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. 2000. 74p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- HARRISON, R.B.; REIS, M.G.F.; REIS, G.F.; GONÇALVES, J.L.M.; HENRY, C.L.; COLE, D.W.; KING, R.; LEONARD, P.; COMPTON, J.; XUEL, D. Closing the loop: the rule of harvesting and transportation in maintaining productivity and returning organic waste to the forest. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 9., Curitiba, 1996. **Anais**. Curitiba: UFPR, 1996. p.101-118.

- LANDONIN, D.V.; MARGOLINA, S.E. Interactions between humic acids and heavy metals. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v.30, n.7, p.710-715, 1997.
- LUO, Y.M.; QIAO, X.L.; WU, L.H.; SONG, J. Leachability of nitrate and Zn in biosolid-amended soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, 7., Uppsala, 2003. **Proceedings**. Uppsala, 2003. (CD-ROM).
- MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A. Fitodisponibilidade de cobre, níquel e zinco em um Latossolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e calagem. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.4, p.747-754, 2003.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v.15, n.12, p.1409-1416, 1984.
- MORO, M. Caracterização, distribuição e análise econômica dos resíduos industriais da Champion Papel e Celulose Ltda. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E URBANOS EM FLORESTAS, Botucatu, 1994. **Anais**. Botucatu: UNESP, FCA, 1994. p.155-166.
- MULVANEY, R.L. Methods for determination of inorganic nitrogen in soil. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soils analysis: chemical methods**. Madison: SSSA, ASA, 1996. p.1125-1139.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. p.25-98.
- OLIVEIRA, F.C. **Comportamento de metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodos de esgoto**. 1995. 91p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo Distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.1, p.171-180, 2001.
- PIRES, A.M.M.; MATTIAZZO, M.E. Condicionamento de biossólidos e a disponibilidade de Cu e Zn para arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.1, p.161-166, 2003.
- POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. **Aplicabilidade do lodo filtrado de esgoto produzido na Região Metropolitana de São Paulo em plantações florestais de rápido crescimento**. Piracicaba: ESALQ, IPEF, SABESP, 2000. 111p.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 1- reflexos no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p.163-178.
- ROCHA, G.N. **Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2002. 48p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- SANTOS, H.F.; TSUTUYA, M.T. Aproveitamento e disposição final do lodo de esgoto de ETEs do Estado de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.2, n.2, p.70-82, 1997.
- SOARES, M.T.S. **Taxa de mineralização e de lixiviação do nitrogênio, e alterações da fertilidade de um latossolo vermelho-amarelo degradado e outro não-degradado fertilizados com biossólido e florestados com *Eucalyptus grandis***. 2003. 142p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174p.
- VAN RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 40p. (IAC. Boletim Técnico, 81).
- VAZ, L.M.S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólidos**. 2000. 41p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- VAZ, L.M.S.; GONÇALVES, J.L.M. **Crescimento inicial e fertilidade do solo em um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. **Sitientibus**, Feira de Santana, v.26, p.151-174, 2002.
- VEGA, F.V.A.; BOVI, M.L.A.; BERTON, R.S.; GODOY JÚNIOR, G. Movimento vertical e horizontal de NO₃- e NH₄+, em solo tratado com lodo de esgoto, aplicado no plantio de pupunheira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto: SBSCS, 2003. (CD-ROM).
- ZEN, S.; BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Resíduos urbanos como fonte de nutrientes em povoamentos de eucalipto. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E URBANOS EM FLORESTAS, Botucatu, 1994. **Anais**. Botucatu: UNESP, FCA, 1994. p.25-39

Recebido em 06/08/2004

Aceito para publicação em 19/04/2006

