UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

CARLOS ALBERTO BACA MALDONADO

**Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de plantas de eucalipto ao
longo de 46 meses após aplicação de lodo de esgoto**

Piracicaba

2009

CARLOS ALBERTO BACA MALDONADO

Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de plantas de eucalipto ao longo de 46 meses após aplicação de lodo de esgoto

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior

Piracicaba

2009

**AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR
QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO
E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Maldonado, Carlos Alberto Baca

Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de plantas de eucalipto ao longo de 46 meses após aplicação de lodo de esgoto / Carlos Alberto Baca Maldonado; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - Piracicaba, 2009.

116 f.: fig.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Impactos ambientais 2. Matéria orgânica do solo 3. Nutrientes minerais do solo 4. Reciclagem de resíduos urbanos 5. Resíduos sólidos urbanos
I. Título

CDU 631.879.2:633.61

À Rosalinda, minha amada esposa

Ofereço

À luz que brilha no meu coração

Aquela que desde o céu chegou

Minha estrela, minha rosa em botão

Para você, Carlinha, filha querida

Porque você é minha força e inspiração.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, fortaleza e luz de meu caminho e força da minha vida.

Ao prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior, pela orientação, ensinamentos e amizade no decorrer do curso;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), pela oportunidade na realização do curso;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa concedida;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio à pesquisa;

À FINEP/MCT, pelo apoio financeiro para realização dos análises laboratoriais;

À Suzano Bahia Sul Papel e Celulose S.A., pelo apoio com a área experimental, logística de trabalho, especialmente a José Luiz Gava e Fernando Marcio da Silva, pelo constante apoio durante o desenvolvimento do trabalho;

Aos funcionários da TECPAR, pelo apoio durante as coletas de campo, especialmente ao amigo Marcos pela grande amizade;

Aos prof.Drs. Antonio Enedi Boaretto, Takashi Muraoka e em memória ao professor Dr. Eurípedes Malavolta pela viabilização e colaboração para o desenvolvimento do trabalho.

Ao pesquisador Dr. Sebastião Pires de Moraes Neto, pelo esforço e dedicação durante a instalação do experimento e primeiras amostragens;

Ao professor Dilermando Perecin, da FCAV, UNESP de Jaboticabal, pela colaboração para o desenvolvimento da análise estatística;

À Dra. Maria Luiza Sant'Anna Tucci, do IAC de Campinas, pela colaboração na correção da tese, e amizade de sempre.

À Henriqueta Maria Gimenes Fernandes e Cleusinha Pereira Cabral, técnicas do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA, pela atenção, dedicação e amizade, meninas sem vocês este trabalho não teria terminado;

Às técnicas do Laboratório Fertilidade do Solo do CENA, Marileusa Bassi Elias e Sandra Teresa P. dos Santos, pela colaboração para o desenvolvimento das análises laboratoriais.

À Suzineide Manesco, secretaria da seção de Nutrição Mineral de Plantas, “cara” muito obrigado pela sua amizade e apoio.

À galera da pós-graduação, Ademir Franco, Lucia Pittol, Carolina Ribeiro, Maria Julia Brossi, Victor Ribeirinho, Leila Figueiredo, Marcelo Feitosa “Raspão”, ao grande amigo cubano Felipe Carlos Alvarez Villanueva, Vivian Braga, Milton Moraes, Anderson Trevisan, “chinito” Vinicius, Robson “Robinho” J. Arthur, Thiago Nogueira, pela grande amizade e o apoio;

Ao pessoal do estagio que em todo momento estiveram colaborando com o experimento, em especial ao “maestrino” André Trombeta, pela grande amizade;

À minha família peruano-brasileira, que ainda segue sendo pequena, minha esposa Rosalinda e minha filha Carlinha Rosalyn, pela sua compreensão.

À minha família no Peru, que segue crescendo dia a dia, em especial aos meus pais Juana e Peter e minha segunda mãe Flavia Herrera Solano assim como aos meus tios Henrique Diaz e Trinidad Farfan e meu irmão Alan Leonard, valeu irmãozinho, muito obrigado pelo apoio.

Em fim, a todos aqueles que fizeram possível a finalização deste trabalho.

*Todo começo tem final
um final feliz ou talvez ruim
Ou falando de outra forma
poderia ser “recomeço”
recomeço de uma nova vida
de uma nova viagem por novos caminhos
os conhecidos ficarão detrás
como nossas pegadas
desventuras, magoas, estresses e penúrias
impotências, incompreensões, dúvidas*

*Mas também ventura
sorrisos, amizades e alegrias
jogos de futebol e o meu Deus!!
o cafezinho da Cleusa, só dará para lembrar
Da Henriqueta nem que falar
mas ouça bem, tenho que aclarar
de ensinios e minúcias ela não tem par*

*De meus professores, todos eles grandes doutores
há muitas coisas para ressaltar
do Boaretto, pai pensador, a tranquilidade
ou de um Cassio a loucura por pesquisar
não, não me esqueci dos que já passaram
embora tenha sido de longe, para ele meu olhar
só resta de Malavolta lembrar
a coragem e força para continuar
mas também nos fazendo lembrar, que tudo tem seu final*

*Com este pequeno poema, me despeço amigos,
Milton desde que começamos no IAC,
Ademir, Lucia, Lilian e o José
Victor ribeirinho, desculpa ter ao Thiago perto de Você
mas de outra forma não tinha rima
os nomes da Leila e do “maestrito” André
estou esquecendo-me de alguém?
Sim!!, da Vivian, Felipe, Denis e estagiários
Perdoem-me aqueles que hoje não lembrei
mas as benções que peço a Deus para estes,
também é para vocês.*

C. B. M

Fim do Curso Doutorado

Piracicaba, 2009

RESUMO

MALDONADO, C.A.B. **Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de plantas de eucalipto ao longo de 46 meses após aplicação de lodo de esgoto.** 2009. 116f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

Objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto, com ou sem adubo nitrogenado e, ou, fosfatado, sobre os atributos químicos do solo e o crescimento e nutrição de plantas de eucaliptos até aos 46 meses após aplicação do resíduo. Em dezembro de 2004 foi estabelecido um experimento de campo com quatro doses de lodo de esgoto (0; 7,7; 15,1 e 23,1 t ha⁻¹, base seca, equivalentes a 0, 50, 100 e 150% do recomendado, com base no critério do N), nitrogênio (0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha⁻¹, equivalentes a 0, 33, 67 e 100% do N recomendado) e fósforo (0; 27,7; 53,6 e 84 kg ha⁻¹, equivalentes a 0, 33, 67 e 100% do P₂O₅ recomendado), em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento e duas repetições. Devido ao baixo teor de potássio no lodo, foi aplicado 188 kg ha⁻¹ de K₂O (100% do recomendado) em todas as parcelas. Foram realizadas coletas de solo aos 4, 14, 21 e 34 meses após a aplicação do lodo, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, exceto aos 4 meses que foi feita até 90 cm de profundidade. Nas amostras coletadas aos 4 e aos 34 meses foram realizadas análises de pH em CaCl₂, N-total, P (resina), Ca, Mg e K trocáveis, acidez total e matéria orgânica. Aos 14, 21 e 34 meses foram determinados o N-amoniacal e N-nitrato pelo método Kjeldahl. Teores extraíveis de Cu, Fe, Mn, Zn foram obtidos pelo método do DTPA e teores semitotais, por solubilização ácida (HNO₃ + HCl), em forno microondas, sendo os elementos quantificados por espectrometria de massa com plasma (ICP-MS). Análises de amostras de folhas foram feitas aos 4 e 43 meses, de amostras de folheto, trimestralmente e de amostras de serapilheira, aos 46 meses após aplicação do lodo, para determinar macro e micronutrientes. A decomposição do folheto (método de bolsas de decomposição) foi avaliada aos 45, 90, 160, 230 e 300 dias. A altura e o diâmetro na altura do peito das árvores foram medidos aos 6, 9, 12, 18, 24, 33 e 44 meses após plantio, e, então, determinado o volume de madeira. Os resultados obtidos foram avaliados por modelos de superfície de respostas, em função das doses de lodo, nitrogênio e fósforo. As doses de lodo promoveram melhorias nos atributos de fertilidade do solo. Os teores de C-orgânico e de P, K, Ca e Mg trocáveis aumentaram na camada de 0 a 10 cm de profundidade. Os teores de Cu, Fe, Mn e Zn, extraíveis e semitotais, aumentaram nas camadas até 40 cm de profundidade. Os teores de C-orgânico aos 34 meses foram superiores aos teores obtidos aos 4 meses, enquanto que os valores de pH diminuíram. Os teores de N total e amoniacal aumentaram com as doses de lodo e de fertilizante nitrogenado, com maior acúmulo na camada de 0-10 cm. Não foi observado potencial de lixiviação de N-NO₃⁻. As doses de lodo aumentaram os teores de N e de P nas folhas do eucalipto, assim como o adubo nitrogenado e fosfatado, respectivamente, mantendo teores adequados nas folhas recém-maduras do eucalipto. Os teores de Cu, Mn, Fe e Zn nas folhas de eucalipto foram aumentadas com as doses de lodo e se correlacionam com teores desses metais extraídos do solo com DTPA. O estudo de superfície de resposta, permitiu constatar que a aplicação de lodo, com base na dose recomendada pelo critério do N, pode propiciar a redução de 33% no uso do adubo fosfatado e 100% do adubo nitrogenado, sem prejuízos ao crescimento e à nutrição do eucalipto, com aumento da produtividade de madeira.

Palavras-chave: Impactos ambientais. Matéria orgânica do solo. Nutrientes minerais do solo. Reciclagem de resíduos urbanos. Resíduos sólidos urbanos

ABSTRACT

MALDONADO, C.A.B. **Soil fertility, plant nutrition and growth of eucalyptus after 46 months of sewage sludge application.** 2009. 116f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

This study aimed to evaluate the effect of sewage sludge, with or without mineral nitrogen and phosphate fertilizer on the soil chemical properties, nutrition and growth of Eucalyptus plants up to 46 months after sewage sludge application. Therefore, in December 2004 was established a field experiment with four doses of sewage sludge (0, 7.7, 15.1 and 23.1 t ha⁻¹, dry base), N (0, 46.9; 95.1 and 142 kg ha⁻¹) and phosphorus (0, 27.7, 53.6 and 84 kg ha⁻¹ P₂O₅), in a randomized block design in factorial design 4x4x4 with two repetitions. Due to low content of potassium (K) in the sewage sludge was applied 188 kg ha⁻¹ K₂O in all plots. Samples of soil were collected at 4, 14, 21 and 34 months after sludge application, from the 0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m layers, except at 4 months which was made up to 0.90 m depth. Samples collected at 4 and 34 months were analyzed for pH in CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹, total N, available P (resin), Ca, Mg and K contents, total acidity and organic matter. At 14, 21 and 34 months were determined ammonia-N and nitrate-N by the Kjeldahl method. Extractable Cu, Fe, Mn and Zn were obtained using the DTPA solution, and semi-total levels dissolution by acid (HNO₃ + HCl), in a microwave oven, and analyzed by ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometer). Analysis of leaf samples were made at 4 and 43 months, samples of leaf litter, quarterly and litter at 46 months after sludge application, to determine macro and micronutrients. The decomposition of leaf litter (method of decomposition bags) was evaluated at 45, 90, 160, 230 and 300 days. The height and diameter at breast height (DBH) of trees were measured at 6, 9, 12, 18, 24, 33 and 44 months after planting, and then determined the volume of wood. The results were evaluated by surface models of responses, depending on the sludge doses, nitrogen and phosphorus. The growth of the plants was adjusted by growth curves. The sludge application promoted improvements in the attributes of soil fertility. The content of organic C and P, K, Ca and Mg increased in the 0 to 10 cm depth. The contents of Cu, Fe, Mn and Zn, extractable and semitotals increased in layers up to 40 cm depth. The levels of organic C to 34 months were higher than levels found at 4 months, while the pH decreased. The levels of total N and ammonia increased with doses of sludge and fertilizer, with higher accumulation at 0-10 cm. There was no potential leaching of N-NO₃⁻. Both the sludge as fertilizer applied increases the levels of N and P of eucalyptus leaves, maintaining appropriate levels in recently matured leaves. The Cu, Mn, Fe and Zn in eucalyptus leaves were increased with sludge doses and are correlated with concentrations of DTPA metals extracted from soil. The response surfaces study, allowed to prove that the application of sludge, based on the recommended dose by the N criterion, can provide a 33% reduction in the phosphate fertilizer and 100% of nitrogen fertilizer, without damage to the eucalyptus nutrition and growth, with increase wood productivity.

Keys word: Environment impacts, Soil organic matter, Soil minerals nutrients, Urban waste recycling, Urban solid waste.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Impacto ambiental do abastecimento e poluição da água	16
2.2. Potencial do uso de lodo de esgoto em áreas agrícolas florestais	18
2.3. Influência do lodo de esgoto na fertilidade do solo	19
2.4. Importância da cultura do eucalipto	24
2.5. Atuação do lodo de esgoto sobre o sistema solo-eucalipto	25
2.6. Situação atual do uso e manejo do lodo em área comercial	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1. Localização geográfica e descrição da área experimental	28
3.2. Clima	28
3.3. Solo	29
3.4. Caracterização do lodo de esgoto	31
3.5. Instalação e condução do experimento, tratamentos	33
3.5.1. Aplicação de calcário	33
3.5.2. Aplicação do lodo de esgoto	33
3.5.3. Preparo do solo e plantio das mudas	34
3.5.4. Tratos Culturais	35
3.5.5. Manejo da fertilidade do solo	35
3.5.6. Delineamento experimental	36
3.5.7. Amostragem de solo	37
3.5.8. Análise química do solo	37
4. AMOSTRAGEM DE MATERIAL VEGETAL	38
4.1. Folhas da copa da árvore	38
4.2. Folhedo	38
4.3. Decomposição do folhedo	39
4.4. Serapilheira	40
4.5. Análise química do material vegetal	40
4.6. Avaliação da altura e do diâmetro e estimativa da produção de madeira	41

4.7. Análise estatística dos resultados	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. Efeito da aplicação do lodo de esgoto no solo	43
5.1.1. Estoque de Carbono no solo	43
5.1.2. Reação do solo	45
5.1.3. CTC do solo	46
5.1.4. Saturação por bases do solo (V%)	47
5.1.5. Macronutrientes no solo	49
5.1.5.1. Teores de N-Total	49
5.1.5.2. Nitrogênio inorgânico no solo	52
5.1.5.3. Teores de N-NO ₃ ⁻	54
5.1.5.4. Teores de P, K, Ca e Mg	56
5.1.5.4.1. Fósforo	56
5.1.5.4.2. Potássio	58
5.1.5.4.3. Cálcio	60
5.1.5.4.4. Magnésio	61
5.1.5.5. Micronutrientes no solo	63
5.1.5.5.1. Cobre	63
5.1.5.5.2. Ferro	64
5.1.5.5.3. Manganês	65
5.1.5.5.4. Zinco	66
6. TEORES DE NUTRIENTES NAS PLANTAS	68
6.1. Macronutrientes	68
6.1.1. Nitrogênio	68
6.1.2. Fósforo	70
6.1.3. Potássio	70
6.1.4. Cálcio e Magnésio	71
6.2. Micronutrientes	73
7. TEORES “SEMITOTAIS” NO SOLO	77
7.1. Micronutrientes	77
8. FOLHEDO	82
8.1. Produção de folheto	82
9. AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MADEIRA	85

9.1. Altura, diâmetro e volume de madeira das árvores de eucalipto	85
9.2. Volume de madeira	90
10. DEPOSIÇÃO DE SERRAPILHEIRA	99
10.1. Acúmulo de macronutrientes P, K, Ca e Mg.	100
10.2. Concentração de micronutrientes	101
10.3. Decomposição de folheto	101
10.3.1. Percentual remanescente (%)	101
10.3.2. Taxa de decomposição (k)	103
10.3.3. Meia-vida	104
11. CONCLUSÕES	105
12. REFERÊNCIAS	106

1. INTRODUÇÃO

A preservação do ambiente representa um dos maiores desafios para a humanidade. O aumento da população mundial com a concentração nas cidades, os hábitos consumistas e a industrialização, resultaram em aumento do consumo de água e conseqüentemente do volume dos esgotos e da contaminação dos recursos aquíferos superficiais

A questão do saneamento básico é crucial para a saúde humana. No Brasil, nas últimas décadas, muitas cidades iniciaram a construção de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) visando a despoluição dos rios e a redução dos problemas de saúde pública. No Brasil, menos de 50% dos municípios possuem redes de coleta e menos de 25% recebe o tratamento adequado.

Do tratamento do esgoto gera-se um resíduo chamado lodo de esgoto. Para as ETEs a disposição do lodo é um dos problemas mais críticos devido aos custos elevados de gerenciamento. Mundialmente, o gerenciamento e a disposição do lodo de esgoto vêm sendo uns dos problemas mais abordados nas pesquisas e diversas tecnologias foram desenvolvidas, entre elas o uso racional do lodo de esgoto em plantios florestais, como fertilizante agrícola, uma das melhores alternativas para a disposição final. Embora apresente potencial de fornecimento de nutrientes às plantas, como de nitrogênio, fósforo e alguns micronutrientes como cobre e zinco, o lodo de esgoto também pode, segundo a origem, apresentar alto potencial poluidor, devido aos metais pesados, organismos patogênicos e compostos orgânicos complexos, requerendo, portanto, ter tratamento e disposição final adequadas, de forma à não colocar em risco a saúde pública e o ambiente.

Para regular o uso agrícola do lodo de esgoto, em 2006, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução nº 375, específica para as condições de clima e solos do Brasil, a qual define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto e seus produtos derivados, gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário, e dá outras providências.

Embora a produção de lodo de esgoto sanitário no Brasil ainda seja em pequena escala, devido às precárias condições do saneamento básico a resolução do CONAMA representa um marco regulatório importante para que o lodo de esgoto possa ser utilizado na agricultura de forma segura para a população e o ambiente.

Por outro lado, um dos aspectos a se considerar na fertilização de florestas é a questão econômica, que em muitos casos pode ser fator limitante do incremento de produtividade. Estudos demonstram uma estreita relação entre a fertilização e o volume da produção.

Nos últimos anos, a aplicação de lodo de esgoto no cultivo do eucalipto vem se posicionando como uma alternativa viável para a disposição desse resíduo. Estudos realizados para observar o efeito do lodo de esgoto sobre a ciclagem de nutrientes, as concentrações de nutrientes na fitomassa e na serapilheira e as alterações na fertilidade do solo mostraram efeitos positivos tanto nas características físicas e químicas dos solos como nas características agronômicas das espécies cultivadas.

Nesse contexto, a hipótese de trabalho é que a aplicação de lodo de esgoto poderia melhorar a disponibilidade dos nutrientes no solo, potencializando o aporte de nutrientes às plantas, bem como o seu desenvolvimento.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar após a aplicação de lodo de esgoto, com ou sem adição de nitrogênio e fósforo mineral, os atributos químicos do solo, bem como a mobilidade dos nutrientes no perfil do solo com ênfase na disponibilidade do nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e dos micronutrientes Cu, Fe, Mn, e Zn do solo, e a produtividade, durante os 46 primeiros meses.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Impacto ambiental do abastecimento e poluição da água

O abastecimento de água e os esgotos sempre estiveram no centro das preocupações desde tempos mais remotos. No século IV a.C., os romanos tinham 856 banhos públicos e 14 termas, com um consumo de água diário de 750 milhões de litros (LIEBMANN, 1979).

Por outro lado, os cuidados com os esgotos levaram à construção da denominada “*cloaca máxima*”, (NETTO, 1959), que era um conduto livre em pedra que funcionava de receptor dos esgotos de Roma, em 514 a.C. No entanto, também é defendido (GRIMAL, 1990) que este coletor serviu, em primeiro lugar, para a drenagem dos pântanos e só posteriormente assegurou uma relativa higiene no escoamento dos esgotos.

A este respeito Liebmann (1979) refere-se que nessa época já se compreendia a necessidade de se economizar a água, adotando-se de latrinas dotadas de água corrente proveniente da recirculação das águas dos banhos públicos. Deverá situar-se, nesta época, certamente, os inícios do reuso e da sustentabilidade da água e não uma apropriação recente.

Na idade média, a água foi uma das questões mais relevantes chegando-se a considerar a *Idade da água*, porem comparando esta época com a idade antiga houve um retrocesso no que respeita a questão sanitária (Liedmann, 1979; Leray, 1982) nessa mesma época, sobre todo, no século XII as fontes artificiais eram vistas como referencia de urbanidade, porem as fossas domiciliares e a utilização de adubos contaminavam o lençol freático e consequentemente, houve proliferação de doenças.

O *Acto inglês*, decretado em 1388, (POMPEU, 1976) foi considerado a lei britânica mais antiga sobre poluição das águas e do ar, proibia o lançamento de excrementos, lixo e detritos em fossas, rios e outros pontos de água. Também em Augsburg, em 1453, foram estabelecidas leis de proteção aos meios aquáticos destinadas a controlar a contaminação dos rios que eram fontes de abastecimento público. Tais medidas não tiveram grandes resultados porque nas cidades medievais eram introduzidos, pelos cidadãos em geral, diferentes poluentes que provocaram

um conjunto de perturbações ambientais, originando a chamada “primeira grande transformação dos ecossistemas” (ROCHE, 1990).

O Renascimento foi marcado por um grande impacto socioeconômico e ambiental, na Inglaterra, a construção de uma rede de esgotos e descarga direta dos efluentes nos rios, provocou sua contaminação, doenças atingiam níveis epidêmicos elevados e a contaminação das águas abrangeu grandes extensões. No entanto, em diferentes países assiste-se ao desenvolvimento de sistemas de melhoramento de abastecimento de água e rede de esgotos. Nos finais do século XVIII na cidade de Nova Iorque, foi constituída uma comissão de saúde pública com o intuito de controlar o abastecimento de água e a construção de redes de esgoto (ROCHE, 1990).

Atualmente o mundo enfrenta uma grande crise no abastecimento de água tratada, disponibilizada para consumo, a forte urbanização dos países nos últimos 50 anos coloca em risco seu abastecimento. Pesquisas com o intuito de minimizar ou solucionar esse problema são feitas porém muitas delas não são economicamente viáveis, sendo a previsão da Organização Mundial da Saúde (OMS) que até 2050 mais de cinquenta países enfrentarão crise no abastecimento da água (Da SILVA, 2006).

Diversas são as fontes de poluição que contaminam os recursos hídricos. Os efluentes resultantes de atividades agrícolas, industriais e comerciais, bem como os dejetos gerados pelos seres humanos, têm sido lançados historicamente na vala comum dos rios. Apesar das leis ambientais de controle da poluição das águas ter evoluído ao longo dos tempos, isso não impediu o lançamento constante de enormes volumes de rejeitos industriais, agrícolas e domiciliares nos cursos hídricos, que tiveram sua qualidade de água comprometida e seus usos limitados (FORUM DAS ÁGUAS DAS AMÉRICAS, 2009)

O tratamento de esgotos, fundamental para qualquer programa de despoluição das águas, e que com certeza irá despoluir os rios, resulta na produção de um lodo rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto. (CAMARGO; BETTIOL, 2000), havendo necessidade de uma adequada disposição final desse resíduo. Assim sendo, é essencial que as pesquisas científicas e tecnológicas desenvolvam alternativas seguras e factíveis para que esse resíduo não se transforme num novo problema ambiental.

2.2. Potencial do uso de lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais

A utilização de resíduos orgânicos na agricultura é uma prática antiga, originária provavelmente da China, onde dejetos humanos eram aplicados nas culturas agrícolas sem qualquer tratamento. No ocidente, dados indicam que a irrigação com efluentes de esgotos domésticos era praticada na Prússia desde 1560, e que na Inglaterra, em virtude da terrível epidemia de cólera, foram desenvolvidos projetos de disposição agrícola dos resíduos de esgotos sanitários a partir de 1800 (CAMARGO; BETTIOL, 2000).

No continente americano, (ROSTWOROWSKI, 1999) o uso de dejetos humanos na agricultura era praticado na época dos incas, no Peru, desde início do século XV até o primeiro quarto do século XVI, época em que o império incaico alcançou seu máximo esplendor, antes da conquista espanhola. Também na cultura asteca têm-se relatos do uso de dejetos humanos na agricultura, no México, cujos habitantes eram obrigados sob pena de castigo, a depositar os excrementos em lugares pré-estabelecidos, onde eram deixados a se decompor, juntamente com outros compostos, para posteriormente após secagem, poder ser utilizados como adubo, sem prejuízo à saúde humana (GUTIERREZ, 2009). Lamentavelmente, com o descobrimento e conquista desses povos, aquelas tecnologias foram se perdendo.

No Brasil, a pesquisa sobre a utilização de lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais, tem seu início da década de 1970, quando Santos (1972) publica o primeiro trabalho relacionado ao uso de lodo de esgoto na agricultura e logo estas pesquisas foram ampliando-se com as publicações de Carvalho; Barral (1981), Bettiol; Carvalho (1982 a, b) e Boaretto, (1986).

A aplicação de efluentes no solo, desde que convenientemente tratados, é considerada uma forma efetiva de controle da poluição do meio ambiente e uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica do solo, em regiões áridas e semi-áridas, sendo os maiores benefícios dessa tecnologia aqueles relacionados aos aspectos econômicos, ambientais e de saúde pública (SILVA et al., 1995; MADEIRA et al., 2002; PAGANINI, 2003) e diminuição da dependência da utilização de fertilizantes químicos (OUTWATER, 1994).

Do ponto de vista econômico, o uso do lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais torna-se viável em função da ciclagem e do aporte gradativo de nutrientes, em função de seu efeito residual, podendo reduzir ou até mesmo substituir a

adubação química, com rendimentos equivalentes ou superiores (CANZIANI et al., 1999; ABREU Jr. et al. 2005).

Em estudo sobre a utilização agrônômica de lodo de esgoto produzido em Brasília (DF), verificou-se que seu valor agregado, pela quantidade de nitrogênio e de fósforo fornecida em uma aplicação de 54 t ha^{-1} (base úmida), foi superior ao custo do frete para o transporte do material a uma distância de 100 km (SILVA et al., 2000).

De acordo com Kocsis; Maria (2004), a aplicação de lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos de Jundiaí, SP, em um Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa, mostrou-se eficiente na recuperação de solos degradados.

Maldonado (2005), avaliando precocidade, produção e teores de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em pupunheiras adubadas com lodo de esgoto no plantio, concluiu que sua adição nas doses mais elevadas (152 t ha^{-1}), afetou positivamente a produção, a precocidade da colheita, o perfilhamento das plantas, bem como os teores de nutrientes no palmito.

2.3. Influência do lodo de esgoto na fertilidade do solo

Segundo pesquisas realizadas até o momento, o lodo de esgoto desempenha função extremamente importante na dinâmica dos solos, influenciando em suas características químicas, físico-químicas, biológicas e físicas (BARBOSA et al., 2004; BETTIOL; FERNANDES, 2004).

Como condicionador de solos, o lodo de esgoto provoca aprimoramento na agregação e estabilidade das partículas, diminuindo a densidade e consequentemente, aumentando a infiltração, a retenção de água, a aeração do solo, e a retenção de cátions essenciais e não essenciais às plantas, nas formas trocáveis, evitando ou reduzindo as perdas por percolação e lixiviação, em virtude de seu alto teor de matéria orgânica, promovendo também, aumentos da CTC, do pH, e da condutividade elétrica do solo (OLIVEIRA et al., 2002).

Além disso, o conteúdo orgânico presente no lodo de esgoto pode promover alterações benéficas ao ambiente radicular, como aumento da capacidade de retenção de umidade, diminuição da resistência física à penetração das raízes e aprimoramento da distribuição de nutrientes no solo (MARTINS et al., 2004),

podendo substituir parcial o totalmente os fertilizantes minerais (NASCIMENTO et al., 2004; TRANNIN et al., 2005).

De acordo com a procedência e tipo de tratamento ao qual foi submetido, o lodo de esgoto apresenta teores de matéria orgânica variando entre 70 e 600 g kg⁻¹. Sendo que o aporte de matéria orgânica, dentre outros benefícios, favorece a atividade microbiana, que propicia a adição de agentes complexantes ao solo, influenciando em seu potencial de óxido-redução, e conseqüentemente, na distribuição de metais tóxicos no perfil do solo, de forma não prejudicial (BORGES; COUTINHO, 2004a). Da mesma forma, a matéria orgânica presente no lodo de esgoto também reduz a adsorção de fósforo no solo, fornecendo íons orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de adsorção, aumentando sua disponibilidade para as plantas (HUE, 1995).

Nascimento et al. (2004), avaliando o efeito de doses de lodo de esgoto sobre as alterações químicas dos solos e a produção de matéria seca de plantas de milho e feijão, cultivadas em vasos, verificaram aumento da CTC, proporcional às doses aplicadas (0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 t ha⁻¹ em base seca) em ambos os solos testados (Argissolo Vermelho amarelo e Espodossolo Cárbico hidromórfico), confirmando a retenção de cátions no solo promovida pela carga orgânica presente no lodo de esgoto. No entanto, Oliveira et al. (2002), consideraram que a estimativa da CTC realizada pela soma de bases, geralmente utilizada em diversos trabalhos, pode ocasionar a superestimação dessa característica, pela presença de Ca e Mg no lodo, concluindo que as alterações na CTC podem ser mais bem explicadas pela variação do pH, do que pelos acréscimos de C-orgânico promovidos pela incorporação desse resíduo.

O efeito do lodo de esgoto sobre a reação dos solos varia de acordo com o tipo de tratamento a que foi submetido (OLIVEIRA et al., 2002; NASCIMENTO et al., 2004), e não somente em função de atributos físico-químicos do solo, como teor de matéria orgânica, argilas, óxidos, nitrogênio e outros nutrientes.

Lodos condicionados com cal possuem grande poder de neutralização da acidez do solo em razão de sua alcalinidade. No entanto, mesmo lodos alcalinos podem acidificar o solo em decorrência de mineralização e nitrificação do N orgânico que libera íons H⁺ e inclusive, contribui para a lixiviação de cátions (HARRISON et al., 1996).

O uso do lodo alcalinizado, tratado com cal virgem (CaO) ou cal hidratada [Ca(OH)₂] para a remoção de patógenos e estabilização do resíduo, interfere diretamente no pH dos solos, mostrando-se viável para o controle da translocação de metais pesados no sistema solo-planta, uma vez que próximo da neutralidade, esses elementos tornam-se menos fitodisponíveis, pela redução da atividade iônica dos cátions metálicos (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001).

Barcelar et al. (2001), avaliando o efeito residual do lodo de esgoto alcalinizado (90% de umidade) sobre as propriedades químicas de um Cambissolo Húmico distrófico gleico, após três anos da incorporação, verificaram aumento significativo do pH nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm, correlacionando-se negativamente com os teores de H⁺Al, nas profundidades 5-10 e 10-20 cm, que se apresentaram significativamente inferiores quando comparados aos tratamentos testemunha e fertilizante mineral. O lodo foi incorporado nas doses 32, 64 e 96 t ha⁻¹, em sistema de plantio direto de milho, seguido de aveia, sendo que os teores de P disponível, C-orgânico, K e Mg trocáveis, e CTC total e orgânica, não apresentaram variações significativas entre os tratamentos nas diferentes profundidades estudadas. No entanto, o Ca trocável no solo aumento na camada 5-10 cm, nas maiores doses, e na camada 20-40 cm na menor dose aplicada, evidenciando o potencial do lodo tratado com cal virgem (CaO) para as culturas, aproveitando-se do seu efeito residual sobre o solo.

Estudos realizados por Borges; Coutinho (2004b), Velasco-Molina (2004), Andrade (1999), com respeito à aplicação do lodo de esgoto concluíram que sua adição proporcionou aumentos significativos do pH do solo, mas de forma lenta.

Quanto da aplicação de lodo de esgoto neutro, condicionados com polieletrólitos, poderá ocorrer um aumento inicial do pH do solo ocasionado pelo poder de neutralização das reações envolvidas na degradação da carga orgânica do resíduo. No entanto, esse efeito pode ser de curta duração e seguido por processos acidificantes (BOEIRA et al. 2002).

Dentre os atributos químicos, o lodo de esgoto tem promovido aumento nos teores de macronutrientes sobre todo do nitrogênio total, fósforo, sódio, cálcio e magnésio (NASCIMENTO et al., 2004; ASSIS et al., 2007),

O lodo de esgoto também apresenta grande potencial de uso como fertilizante nitrogenado, visto os seus elevados teores desse nutriente. A recomendação de aplicação de lodo é feita tomando-se como base a exigência nutricional da cultura,

os teores de N no lodo, e sua taxa de mineralização, diretamente afetada pelas condições de temperatura e umidade dos solos. Como essa taxa é medida em condições controladas de laboratório, pode não ser uma estimativa segura da mineralização sob condições de campo, sujeitas às diferentes alterações climáticas (VIEIRA; CARDOSO, 2003).

Andrade; Mattiazzo (2000), avaliando a fitodisponibilidade e movimentação de nitratos em Latossolo Vermelho-Amarelo, textura arenosa, cultivado com *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, verificaram que não houve acúmulo nem lixiviação de N total e N-NO_3^- no solo, ocorrendo apenas o aumento linear de N na parte aérea das plantas com a aplicação de doses de lodo, comprovando seu efeito na fitodisponibilidade desse nutriente.

Rocha et al. (2004), em experimento conduzido em Itatinga, SP, avaliando fertilidade do solo e crescimento de *E. grandis*, em solo de textura arenosa, observaram diferenças na concentração de nutrientes no solo conforme o estágio de crescimento das plantas mas não encontraram relações nas concentrações de certos nutrientes nas folhas como N, P, Ca. Observaram também que os teores de S e N aumentaram até 24 meses, mas diminuíram com o fechamento das copas e que o Mn foi o único micronutriente que respondeu inversamente ao tratamento com lodo, mas de modo geral houve melhoria da nutrição das plantas com sua aplicação.

Andreoli; Carneiro (2002), avaliando o comportamento vertical do nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal e pH em leiras de lodo de esgoto calado, verificaram que os teores de N-orgânico não variaram significativamente em função da profundidade amostrada. No entanto, houve uma tendência de maior acúmulo em profundidade devido à maior taxa de volatilização e nitrificação das camadas superiores, principalmente no lodo bruto. Com base nestes resultados, pode-se concluir que é fundamental o conhecimento do comportamento do nitrogênio, assim como suas formas e concentrações no lodo de esgoto. A correta quantificação da disponibilidade e da viabilidade de aplicação deste nutriente via resíduo, evita a disponibilização de nitratos em doses excedentes à capacidade de absorção das plantas e sua lixiviação, devido à baixa capacidade de retenção no solo.

O fósforo é um nutriente fundamental para o desenvolvimento do eucalipto, principalmente na fase inicial, quando as mudas respondem prontamente à sua disponibilidade no solo. A aplicação do lodo de esgoto nos sulcos, ou anteriormente ao plantio, são alternativas que devem ser consideradas para que o fósforo contido

no resíduo esteja disponível na fase inicial de crescimento e promova o arranque das mudas, uma vez que o P contido no lodo de esgoto não é prontamente lábil, sendo liberado lentamente, com efeitos em longo prazo (GUEDES; POGGIANI, 2003).

As plantas utilizam o P de fontes orgânicas e inorgânicas com quase a mesma eficiência. Entretanto, para ser aproveitado pelas culturas o P orgânico precisa ser transformado em inorgânico, essa reação de transformação é catalisada por enzimas denominadas fosfatases, produzidas pelas raízes ou pelos microorganismos do solo (WHITE, 1980).

Vários autores entre eles Berton et al. (1997), Nahas et al. (1992), encontraram correlação entre a atividade das fosfatases ácida e alcalina com os teores de P total, a matéria orgânica e o pH do solo.

No entanto, ainda existem dúvidas quanto ao potencial do lodo de esgoto em aumentar a disponibilidade de fósforo no solo, visto os divergentes resultados encontrados na literatura. Silva et al. (1995), avaliando a disponibilidade de nutrientes em solo cultivado com cana-de-açúcar (soqueira) adubado com lodo de esgoto, verificaram seu efeito significativo no aumento dos teores de fósforo disponível para as plantas, demonstrando seu potencial como fonte deste nutriente. Nascimento et al. (2004) verificaram que mesmo ocorrendo aumentos significativos nos teores de P disponível, chegando até a 100% para a dose mais elevada (60 t ha^{-1}), esses permaneceram abaixo dos níveis ideais para a maioria das culturas, fazendo-se necessária a suplementação com fertilizantes minerais ou aplicação de doses maiores de lodo para a obtenção de maiores produtividades.

Barcelar et al. (2001) não verificaram variações significativas nos teores de fósforo disponível para as plantas, no solo, com exceção para a maior dose aplicada (96 t ha^{-1}), onde o P disponível foi significativamente maior que na testemunha, na profundidade de 5-10 cm.

Nascimento et al. (2004), aplicando distintas doses de lodo de esgoto, observaram aumentos significativos nos teores de potássio e sódio trocáveis, a partir, apenas, da dose de 30 t ha^{-1} de lodo, em um Argissolo cultivado com milho e feijão. Estes resultados estão relacionados com os baixos teores destes elementos no lodo de esgoto utilizado.

Oliveira; Mattiazzo (2001), em trabalho sobre mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com

cana-de-açúcar, observaram que o Cu não apresentou evidências de mobilidade no perfil após 2 anos da aplicação do lodo de esgoto, atribuindo esse resultado à formação de complexos organo-metálicos estáveis de baixa solubilidade e à sua ligação a frações não trocáveis do solo. Para o Zn, foram observados aumentos em seus teores totais no solo em função das doses aplicadas, até a camada 20-40 cm no primeiro ano, e 40-60 cm no segundo ano agrícola, evidenciando a mobilidade desse micronutriente no perfil em função do tempo. Segundo Hue (1995), o Zn, entre os elementos metálicos, é o que apresenta maior mobilidade no perfil e, conseqüentemente, maior potencial de lixiviação no solo.

Martins et al. (2003), avaliando o acúmulo de Cu, Ni e Zn em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com milho por quatro anos, suplementado com lodo de esgoto e calagem, verificaram que as concentrações totais de Cu e Zn sofreram aumento significativo com o aumento das doses de lodo aplicadas, enquanto a concentração total do Ni não foi afetada. Assim também, trabalho anterior efetuado por Silva et al. (1995) constatou a elevação da disponibilidade de micronutrientes como B, Cu, Ni e Zn.

Nascimento et al. (2004), avaliando a disponibilidade de metais pesados em dois solos que receberam lodo de esgoto e a produção de matéria seca de plantas de milho e feijão, em casa de vegetação, verificaram que os teores de Zn, Cu, Mn, Fe e Pb, estiveram abaixo dos limites fitotóxicos estabelecidos para a utilização agrícola, observando também incremento de até 62% na matéria seca para a dose mais alta de lodo de esgoto (60 t ha⁻¹).

Franco et al. (2004), avaliando o efeito do lodo de esgoto compostado (LC), da casca de arroz carbonizada (CAC) e de suas misturas, em substratos para a produção de mudas de café 'Catuaí Vermelho IAC - 99', verificaram que, de maneira geral, o tratamento composto de 50% de LC + 50% de CAC, mostrou-se eficiente na nutrição das mudas, reduzindo o excesso de manganês e elevando o teor de zinco a níveis adequados para a cultura.

2.4. Importância da cultura do eucalipto

O eucalipto é originário da Austrália, onde existem mais de 600 espécies. A partir do início deste século, o eucalipto teve seu plantio intensificado no Brasil, sendo usado durante algum tempo nas ferrovias, como dormentes e lenha para as

maria-fumaças e mais tarde como poste para eletrificação das linhas (AMBIENTE BRASIL, 2009)

O eucalipto, sobre tudo o *E. grandis*, nas últimas décadas tem se constituído em cultivo de grande importância econômica no Brasil. A espécie tem sido empregada nos plantios de reflorestamento e recuperação de áreas degradadas, em função de sua baixa exigência quanto à fertilidade dos solos e de seu crescimento rápido (BRACELPA, 2002).

As florestas plantadas pelo setor de celulose e papel do Brasil são as mais produtivas do mundo. Atualmente, as plantações de eucalipto produzem uma média anual de 41 m³ de madeira por hectare (GLOBAL21, 2009).

Atualmente o Brasil é o quarto maior produtor mundial de celulose, superando dos grandes produtores mundiais, Suécia e Finlândia. A área reflorestada no Brasil, até 2007 correspondia a 1.714.943 hectares, dos quais 79,7% exclusivamente de eucalipto (BRACELPA, 2008) O investimento em florestas no Brasil, inicialmente tímido, começou nos últimos anos a atrair aportes de grandes fundos florestais, interessados em investimentos de longo prazo em florestas plantadas, devido ao grande potencial do país em termos de produtividade (JUSTUS, 2009).

2.5. Atuação do lodo de esgoto sobre o sistema solo-eucalipto

Andrade; Mattiazzo (2000), avaliando o efeito do lodo de esgoto em solo cultivado com *E. grandis*, verificaram que o Zn foi o único metal que apresentou movimento significativo no perfil do solo, comprovando o efeito das doses aplicadas no acúmulo de Zn-total na camada 30-60 cm em concentrações abaixo dos limites de toxicidez do solo e plantas, em após um ano da aplicação do lodo. Os metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn, assim como nitrato, não apresentaram movimentação no solo com aplicação do lodo. Quanto à fitodisponibilidade dos metais, observou-se que o uso do lodo de esgoto não provocou efeito significativo na disponibilidade de nenhum desses elementos às árvores no período avaliado, fazendo-se necessário o acompanhamento ao longo dos anos para obtenção de resultados mais conclusivos, uma vez que a cultura permanece cerca de 7 anos no campo antes do corte. Em relação aos teores de nitrogênio, verificou-se aumento linear em sua concentração nas folhas com as doses aplicadas, ainda que não tenham sido observadas alterações nos teores totais e inorgânicos no solo.

Na avaliação dos teores foliares de nutrientes em eucaliptos fertilizados com lodo de esgoto, Guedes; Poggiani (2003) verificaram que sua aplicação alterou significativamente os teores dos nutrientes nas folhas, salvo para o Fe que, apesar de altamente concentrado no resíduo, não se concentrou nas folhas de eucalipto, tanto que não houve efeito significativo entre os tratamentos. De maneira geral, os teores nas folhas de N, P, Ca e S aumentaram e os de Mn e Mg sofreram redução. Martins et al. (2004), analisando as características do sistema radicular de *E. grandis*, verificaram a diminuição da densidade e da superfície específica de raízes finas na camada superficial do solo (0-10 cm) em resposta ao aumento das doses de lodo, relacionando esses resultados ao aporte de nutrientes promovido pela adição do lodo na superfície do solo, uma vez que a produção de raízes finas, com conseqüente aumento da superfície específica de absorção de nutrientes, é um mecanismo adaptativo das árvores em condições de baixa fertilidade dos solos. De acordo com Gonçalves et al. (1999), os povoamentos de eucalipto têm a capacidade de estocar em sua biomassa aérea e radicular a maior parte dos nutrientes disponíveis em solos de baixa fertilidade.

Em outro ensaio instalado na Estação Experimental de Itatinga, ESALQ/USP, Gonçalves et al. (2000) verificaram que a aplicação de lodo de esgoto, sem incorporação nas entrelinhas de plantio, não promoveu a alteração nos teores de matéria orgânica, P, Mg, Zn, Cu e B na camada 0-5 cm, seis meses após a aplicação. Nas camadas superficiais do solo houve aumento nos teores de N, elevando-se também sua concentração nas folhas, favorecendo o crescimento inicial e a redução de custos no controle de plantas invasoras. Quanto ao fósforo, não foram verificadas alterações na concentração foliar desse nutriente em resposta à aplicação do lodo de esgoto com ou sem suplementação de fósforo. A aplicação de 10 t ha⁻¹, com ou sem suplementação de K, promoveu a elevação da concentração desse nutriente no solo na faixa adequada à cultura, sem alterar a produtividade. No entanto as doses superiores a 10 t ha⁻¹, promoveram a elevação dos teores de Ca e Mg e a redução de Al, Fe e Mn no solo, causando o aumento da concentração de Ca e redução dos teores de Fe e Mn nos tecidos foliares. A partir desse resultado, pode-se afirmar que o uso de doses acima de 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, fornecem a quantidade adequada desse nutriente às árvores, dispensando a suplementação de Ca via calagem ou outras fontes, refletindo em ganhos técnicos e econômicos, uma vez que esta cultura demanda e exporta grandes quantidades de cálcio.

2.6. Situação atual do uso e manejo do lodo em área comercial

O uso atual de lodo de esgoto em cultivos agrícolas comerciais está se tornando medida promissora e segura, trazendo vantagens econômicas e ambientais (Abreu Jr. et al., 2005). Em plantios florestais, o lodo de esgoto, aplicado como adubo organo-mineral, está resultando em efeitos positivos na taxa de crescimento das plantas, na ciclagem dos nutrientes no sistema solo-planta e na sustentabilidade do ecossistema florestal (SILVA et al., 2008). Segundo o IPEF (2005), o monitoramento de possíveis impactos ecológicos decorrentes da aplicação de lodo de esgoto não havia registrado nenhum fato preocupante.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização geográfica e descrição da área experimental

O experimento foi instalado em dezembro de 2004, em área de 3,2 ha, na fazenda Entre Rios, da empresa Suzano Bahia Sul Papel e Celulose S.A., localizada no município de Angatuba (SP), de coordenadas 22° 59' S e 48°41' O, altitude 624 metros ao nível do mar. (Figura 1).

Figura 1. Localização da área experimental no mapa do Estado de São Paulo

3.2. Clima

O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, mesotérmico úmido, com precipitação média mensal de 1350 mm, temperatura média anual de 19,4 °C e umidade relativa de 83,3%, podendo ocorrer geadas leves nos meses de inverno. A Figura 2 apresenta as variações de temperatura e de

precipitações pluviométricas desde a data de instalação do experimento até dezembro de 2008.

Figura 2. Médias mensais de temperatura máxima (T max), temperatura mínima (T min) e valores mensais de precipitação pluviométrica (P) acumulada

3.3. Solo

A área experimental apresentava dois tipos de relevos, um plano e outro com declividade inferior a 10%, as parcelas experimentais foram colocadas de tal forma que uma metade dos tratamentos fica-se no relevo plano e o outro no relevo com

declive. Estudo pedológico da área experimental feita em janeiro de 2008 por ¹Prado (Com. pessoal) classificou a área da parte plana como sendo um Latossolo Vermelho distrófico e a área com declive como sendo um Neossolo Quartzarênico, sendo que as diferenças entre ambos ocorrem nos horizontes diagnósticos, em profundidade.

Para caracterização do solo da área experimental, em outubro de 2004, foi realizada a amostragem de solo utilizando-se trado tipo sonda, nas camadas 0-20 e 20-40 cm de profundidade, obtendo-se três amostras compostas por cada uma das profundidades, a partir de 10 subamostras. As amostras foram secas ao ar, passadas em peneiras com abertura de malha de 2 mm e analisadas quimicamente, de acordo com metodologia descrita em Raij et al. (2001). A análise granulométrica foi feita pelo método da pipeta (DAY, 1965). As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os resultados da caracterização química e granulométrica do solo.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental, antes da instalação do experimento (outubro de 2004).

Prof. ⁽¹⁾	pH (CaCl ₂)	MO ⁽²⁾	N	S-SO ₄ ²⁻	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB ⁽³⁾	CTC ⁽⁴⁾	V ⁽⁵⁾
cm		g dm ⁻³	— mg kg ⁻¹ —	mg dm ³					mmol _c dm ³			%
0-20	3,6	20,2	430	1,2	6,5	0,25	1,25	1,00	40,0	2,5	42,5	5,7
20-40	3,8	15,5	340	1,0	5,5	0,20	1,00	1,00	30,2	2,2	32,4	6,7

¹Prof.- Profundidade; ²MO – Matéria orgânica; H+Al – Acidez; ³SB – Soma de bases; ⁴CTC – Capacidade de troca de cátions; ⁵V – Saturação por base

Tabela 2. Teores de micronutrientes (método do DTPA) no solo da área experimental, antes da instalação do experimento (outubro de 2004).

¹ Prof.	² B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	mg dm ³				
0-20	0,40	0,4	91	1,3	4,0
20-40	0,26	0,4	53	0,7	3,5

¹Prof.- Profundidade; ²Método de extração por água quente. Valores médios de 4 amostras analisadas.

¹ Prado, H. Estudo pedológico da área experimental da fazenda “Entre rios”, Angatuba, SP recebida por correio eletrônico, 2008.

Tabela 3. Características físicas do solo da área experimental antes da instalação do experimento (outubro de 2004).

Prof.	Areia total	Silte	Argila total	Argila água	Floculação	Textura
cm	%					
0-20	84	4	12	2	83	Arenosa
20-40	84	4	12	2	83	Arenosa

Classes de diâmetro da fração areia 2,0 - 0,05; silte = 0,05 – 0,002; argila total < 0,002; e argila água < 0,002.

De acordo com os critérios estabelecidos no Boletim 100 do IAC (RAIJ, et al. 1996), a acidez do solo é muito alta, o teor de matéria orgânica (MO), na camada superficial (0–20 cm), é médio, o P disponível e S baixos, o K trocável muito baixo, Ca e Mg trocáveis baixos e a saturação por bases muito baixa (Tabela 1), o conteúdo de B, Cu e Mn é médio e alto em Fe e Zn (Tabela 2), caracterizando o solo, em geral, como de baixa fertilidade. Segundo as características físicas do solo (Tabela 3), o baixo conteúdo de argila e alto de areia total o classifica de textura arenosa.

Uma das características ressaltante do solo foi à presença de serapilheira constituída pelos resíduos da colheita da madeira (folhas, galhos finos e galhos grossos).

3.4. Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto foi fornecido pela Opersan Serviços Ambientais S.C. Ltda., empresa que gerencia o lodo produzido na Estação de Tratamento de Esgotos de Jundiaí, SP, da Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ). O lodo foi gerado em sistema biológico de lagoas aeradas de mistura completa, seguida de lagoas de decantação. Na sequência, o desaguamento é feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação e secagem em pátio (revestido), com revolvimento mecânico periódico das pilhas para redução de agentes patogênicos.

Uma amostra do lodo de esgoto empregada no experimento foi seca ao ar, moída e passada em peneira com abertura de malha de 2 mm. O nitrogênio total e o nitrogênio amoniacal e nitrato foram determinados pelo método Kjeldahl (RAIJ et al., 2001), a umidade e os sólidos voláteis pela perda de massa, a 60°C e a 500°C,

respectivamente e o carbono orgânico por digestão com dicromato e o fluoreto, por fusão com soda, determinado com eletrodo íon seletivo.

Para análise dos demais elementos, a amostra foi preparada conforme o método SW 3051, da USEPA, e os elementos determinados por ICP-AES. Segundo os valores obtidos das análises (tabela 4), o lodo estava apto a ser usado na agricultura de acordo com a concentração de elementos inorgânicos limitados pela norma P.4230 (CETESB, 1999) e pela resolução N° 375, do CONAMA (CONAMA, 2006), que estabelecem a concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (Tabela 4).

Tabela 4. Características químicas e físicas do lodo de esgoto utilizado no experimento.

Característica	Valor	CONAMA (Concentrações máximas permitidas)
pH (em água)	6,2 ⁽¹⁾	
Umidade (%) (m/m)	79	
Sólidos voláteis (%) (m/m)	65	
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	340	
Nitrogênio total (g kg ⁻¹)	33	
N amoniacal (g kg ⁻¹)	3,6	
N nitrato-nitrito (g kg ⁻¹)	0,018	
Fósforo (g kg ⁻¹)	8,1	
Potássio (g kg ⁻¹)	1	
Cálcio (g kg ⁻¹)	8,1	
Enxofre (g kg ⁻¹)	16,4	
Magnésio (g kg ⁻¹)	1,6	
Boro (mg kg ⁻¹)	7,6	
Cobre (mg kg ⁻¹)	881	1500
Ferro (mg kg ⁻¹)	16062	
Manganês (mg kg ⁻¹)	483	
Molibdênio (mg kg ⁻¹)	ND ⁽²⁾	50
Zinco (mg kg ⁻¹)	989	2800
Sódio (mg kg ⁻¹)	997	
Alumínio (mg kg ⁻¹)	15888	
Arsênio (mg kg ⁻¹)	ND	41
Cádmio (mg kg ⁻¹)	11	39
Chumbo (mg kg ⁻¹)	85	300
Cromo total (mg kg ⁻¹)	111	1000
Mercúrio (mg kg ⁻¹)	ND	17
Níquel (mg kg ⁻¹)	26	420
Selênio (mg kg ⁻¹)	ND	100
Fluoreto (mg kg ⁻¹)	288	100
Vanádio (mg kg ⁻¹)	13	
Bário (mg kg ⁻¹)	273	1300
Prata (mg kg ⁻¹)	ND	
Cobalto (mg kg ⁻¹)	50	
Antimônio (mg kg ⁻¹)	ND	

⁽¹⁾ Todos os valores de concentração são apresentados com base na matéria seca.

⁽²⁾ ND - Não detectado, concentrações menores do que 0,1 mg kg⁻¹.

3.5. Instalação e condução do experimento, tratamentos

3.5.1. Aplicação de calcário

No dia seguinte ao estaqueamento (15/12/2004), aplicaram-se, a lanço, $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, PRNT = 95 %, PN = 99, CaO = 28 % , MgO = 20 %, em área total. Essa quantidade foi usada para se obter uma porcentagem de saturação por bases de 45%, na camada de 0-20 cm de profundidade (GONÇALVES; RAIJ, B.; GONÇALVES, 1997).

3.5.2. Aplicação do lodo de esgoto

De 16 a 20 de dezembro de 2004, o lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em faixa de aproximadamente 0,20 m na linha de plantio, com auxílio de adubadeira. A quantidade de lodo de esgoto aplicada se baseou no critério do nitrogênio, de acordo com a norma P. 4.230 da CETESB (1999), obedecendo os seguintes passos: (1) conforme recomendação técnica da Suzano para a área experimental, a dose recomendada de N foi de 142 kg ha^{-1} , valor este considerado como sendo 100 % do recomendado de N; (2) o lodo de esgoto continha 33 g kg^{-1} de N (Tabela 2), ou seja, cada tonelada de lodo continha 33 kg de N; (3) considerando que o fator de mineralização do lodo, para cálculo do N disponível, é de 0,28, então havia 9,24 kg de N disponível por tonelada do resíduo; e, (4) taxa de aplicação (t ha^{-1}) = $[\text{N recomendado } (\text{kg ha}^{-1}) / \text{N disponível } (\text{kg t}^{-1})] = (142/9,24) = 15,4 \text{ t ha}^{-1}$.

Na Figura 3 está representada de forma virtual a disposição das plantas e do lodo de esgoto na área experimental.

Figura 3. Representação virtual da disposição das plantas e do lodo de esgoto na área experimental.

3.5.3. Preparo do solo e plantio das mudas

O plantio foi realizado sob condições de cultivo mínimo ou reduzido, método que tem se destacado no setor florestal nos últimos anos por garantir melhor conservação do solo e de suas propriedades (GONÇALVES et al. 2002; MARTINS, 2005), consistindo em remover o solo minimamente, mantendo os resíduos vegetais (enleiramento) e realizando a subsolagem somente na linha de plantio. Esse método é utilizado pela empresa Suzano para produção comercial de eucalipto em todas suas áreas.

O sulcado e aplicação de herbicida (glifosato) foram realizados de 21 a 22 de dezembro de 2004. Em 23/12/2004, foi realizado o plantio das mudas de *E. grandis* (clone grandis puro SP0619), à 0,20 m da faixa de aplicação do lodo (Figura 3). A aplicação do adubo nitrogenado (uréia) e fosfatado (superfosfato triplo), no período de 23 a 24 de dezembro de 2004, foi realizada manualmente conforme as doses dos respectivos tratamentos (Tabela 5).

3.5.4. Tratos Culturais

Tratos culturais como capina manual e capina química mediante aplicação de herbicida pós-emergente (glifosato) na dosagem de 3 a 4 L ha⁻¹, controle de formigas cortadeiras usando formicida à base de sulfluramida (isca granulada) 2 kg ha⁻¹, em toda a área do experimento, foram todos conduzidos de acordo com os procedimentos convencionais da empresa Suzano Bahia Sul Papel e Celulose S.A., para a produção comercial de eucalipto

3.5.5. Manejo da fertilidade do solo

A adubação mineral com 142 kg ha⁻¹ de N, 84 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 188 kg ha⁻¹ de K₂O foi definida com base nas recomendações técnicas da Suzano (Gava)², para área de plantio comercial de eucalipto, em função das características físicas e químicas do solo e da produção esperada de madeira na ordem de 50 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.

Para aplicação do adubo nitrogenado na forma de Uréia (45% N), fixaram-se as doses de nitrogênio em 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha⁻¹ de N, para 0; 33; 67 e 100% de N, respectivamente. As doses de N foram parceladas em 4 vezes (Tabela 5). Para aplicação do fertilizante fosfatado, fixaram-se as doses de fósforo em; e 0; 28; 55,9 e 84 kg ha⁻¹ de P₂O₅ equivalentes a 0; 33; 67; e 100% de P, respectivamente. O adubo fosfatado, no caso o superfosfato triplo (41% P₂O₅), foi aplicado em dose única em pré-plantio (Tabela 5). Ambos os adubos minerais foram aplicados manualmente em meia coroa ao redor de cada planta.

O potássio, sendo um nutriente escasso no lodo de esgoto, cerca de 1 g kg⁻¹, foi fornecido ao eucalipto em todas as parcelas, aplicando-se 188 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de KCl (54% K₂O), equivalente a 100% do recomendado, parcelado em quatro vezes (Tabela 5). A aplicação do KCl foi realizada em pré-plantio e na segunda aplicação a 0,5 m da linha de plantio com auxílio do sulcador-aplicador, A terceira e quarta aplicação de KCl foram realizadas manualmente na linha de plantio, conforme esquema apresentado na Tabela 5. Na adubação de pré-plantio foram aplicados 29 g de KCl a cada 2 m linear.

²GAVA, J.L. Comunicação pessoal em setembro de 2004.

Tabela 5. Cronograma de aplicação dos adubos nitrogenado, fosfatado e potássico no manejo da adubação do solo da área experimental; em função das doses, com base nas recomendações técnicas da Suzano para área de plantio comercial de eucalipto; e em função da época de adubação

Exemplo, 5 em função da época de adubação							
EPOCAS DE ADUBAÇÃO	UREIA			SUPERFOSFATO TRIPLO			KCl
	Dose						
	33%	67%	100%	33%	67%	100%	DOSE UNICA
	-----kg ha ⁻¹ -----						
Plantio							
23-24/12/2004	11,5	23,1	34,7	68	137	205	48,1
Pós-plantio							
04-07 /04/2005	15,5	31,1	46,7				41,6
03-04/10/2005	31	62	93				83,2
01/11/2006	47	94	140				174

3.5.6. Delineamento experimental

Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de lodo de esgoto (0, 50, 100 e 150% do recomendado, em função do critério do nitrogênio), quatro doses de nitrogênio (0, 33, 67 e 100% do N recomendado) e quatro doses de fósforo (0, 33, 67 e 100% do P₂O₅ recomendado). Os tratamentos foram aplicados em delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento dos graus de liberdade da interação tripla (PIMENTEL, 1985) e duas repetições distribuídas em oito blocos com 16 tratamentos por bloco, totalizando 128 parcelas. Cada parcela continha 42 plantas, incluindo bordadura simples, com 20 plantas na área útil, sendo o espaçamento de 3 x 2 m entre as plantas.

3.5.7. Amostragem de solo

Após a instalação do experimento, as amostragens de solo foram realizadas em 04-07/04/2005, 21-23/02/2006, 18/09/2006 e 22-23/10/2007, correspondente a 4, 14, 21 e 34 meses após o plantio nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade.

Em cada parcela experimental foram coletadas seis subamostras a partir de três pontos pré-estabelecidos em torno de duas plantas escolhidas aleatoriamente na área útil. Os pontos pré-estabelecidos foram: 1) a 30 cm da planta, onde não se aplicou adubo mineral nem lodo; 2) na interseção da meia coroa que recebeu adubo mineral com a faixa de aplicação de lodo; e 3) na faixa de aplicação do lodo, objetivando obter uma amostra composta que melhor apresentasse os efeitos dos tratamentos e a maior homogeneidade possível.

3.5.8. Análise química do solo

As amostras coletadas aos 14, 21 e 34 meses foram mantidas úmidas em câmara fria até análise química para determinação do N-amoniaco e N-nitrato, conforme método descrito por Bremner; Keeney (1965). As amostras, após análise de nitrogênio inorgânico, foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira de 0,5 mm de malha, para as demais análises.

Nas amostras coletadas aos 4 e aos 34 meses foram realizadas análises de pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , N-total, fósforo disponível (resina), cálcio, magnésio e potássio trocáveis, acidez total (H+Al) e matéria orgânica, conforme descrito em Raij et al. (2001). Os teores disponíveis de micronutrientes Cu, Fe, Mn, Zn foram extraídos pelo método do DTPA, a pH 7,3 (LINDSAY; NORVELL, 1978) e os teores semitotais por solubilização ácida com ácido nítrico e clorídrico ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$), em forno microondas, segundo método 3051A (manual SW 846, USEPA, 2009).

Nos extratos obtidos, os teores de Cu, Fe, Mn, Zn foram quantificados por espectrometria de massa com plasma (ICP-MS Agilent 7500ce), conforme método do Laboratório de Análise e Referência em Amostras Ambientais e Fertilizantes (LARAFERT, convênio FINEP/MCT nº 01.04.0389.00), do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, do CENA/USP, adaptado do método 6020A³ (manual SW-846, da USEPA) por Abreu Junior et al., (2009).

³ <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/6020a.pdf>

4. AMOSTRAGEM DE MATERIAL VEGETAL

4.1. Folhas da copa da árvore

As amostragens de folha de eucalipto foram realizadas nas datas de 04-07/04/2005 e 22-01/07/2008, correspondente a 4 e 43 meses após o plantio. Foram coletadas quatro folhas (uma em cada ponto cardinal) de seis árvores, da área útil de cada parcela. As folhas (Figura 4) foram identificadas como as primeiras folhas adultas a partir do ápice, de ramos externos, do terço superior da copa (SILVEIRA et al., 2000) geralmente entre a terceira e sexta folha. As amostras de folhas foram lavadas com água de torneira e, em seguida, com água com resistividade de $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ a 25°C e carbono orgânico total $< 5 \mu\text{g L}^{-1}$, obtida em sistema de purificação de água Milli-Q Gradient A10. As amostras foram secas em estufas a 40°C , pesadas, moídas, homogeneizadas e realizada a análise química.

Figura 4. Amostragem das folhas de eucalipto para análise química, coleta-se folhas recém-maduras de ramos primários, geralmente entre as folhas 3 e 6.

4.2. Folheto

Conceitualiza-se o folheto como a queda de folhas causada pela senescência que resulta de processos metabólicos ligados a fisiologia da planta e também por estímulos ambientais constituindo-se num importante mecanismo de transferência de nutrientes da biomassa vegetal para o solo (GALSTONS; DAVIES, 1972).

A produção de folheto foi avaliada por meio de amostragem em coletores de 0,25 m² de área (0,5 m x 0,5 m), feitos com as bordas quadradas de madeira, prendendo uma tela de náilon (malha de 2 mm) ao quadro de madeira, e fixados ao solo sobre quatro estacas (GUEDES, 2005). A tela foi disposta em forma de bolsa côncava e suspensa, aproximadamente, a 50 cm acima do solo. No centro da área útil de cada parcela, foi colocado um coletor entre a linha de plantio e, em 22/08/2006, correspondente a 20 meses após plantio, iniciou-se a coleta mensal do folheto. As amostras foram enviadas para o laboratório, sendo determinados o peso de folheto úmido e, após a secagem em estufa a 40°C, o peso de folheto seco, calculando-se a umidade da amostra. O material seco foi moído e acumulado trimestralmente, para compor amostras compostas: Set-Out-Nov, Dez-Jan-Fev, Mar-Abr-Mai e Jun-Jul-Ago, no período de 22/08/2006 a 13/08/2008, de modo a representar as estações do ano, e, então, realizada análise química, na amostra de cada trimestre.

4.3. Decomposição do folheto

A decomposição do folheto foi avaliada pelo método denominado de bolsas de decomposição. Estas bolsas são utilizadas normalmente em férias para a venda de frutas, são fabricadas com tela de nylon vazado, com malha de 0,5 cm. Em cada bolsa foi colocado 10 g, conforme descrito em Silva (2006), de amostras de folheto seco coletadas anteriormente, de cada parcela. Em novembro de 2007, cinco bolsas de decomposição foram colocadas em cada parcela, na interface solo-serapilheira, permitindo contato direto com o solo abaixo e com a serapilheira acima, na mesma condição de decomposição que ocorre naturalmente no campo. Uma bolsa foi retirada de cada parcela aos 45, 90, 160, 230 e 300 dias após de colocadas no campo. O material coletado de cada bolsa, constituído por folhas de diferentes graus de decomposição, foi cuidadosamente limpo, pesado, seco a 40°C até peso constante, pesado novamente, moído e realizado análise química.

Foram calculados os percentuais de material remanescente (equação 1) e as taxas de decomposição segundo modelo exponencial negativo de perda de massa e de nutrientes ao longo do tempo (equação 2) (OLSON, 1963). Para estimar o período de meia-vida, ou seja, período necessário para que 50% da biomassa seja decomposta, utilizou-se a equação 3 (De COSTA; ATAPATTU, 2001).

$$\% \text{ Remanescente} = \frac{\text{massa final}}{\text{massa inicial}} \times 100 \dots\dots\dots \text{equação 1}$$

$$C = C_0 e^{-kt} \dots\dots\dots \text{equação 2}$$

$$t_{0,5} = \ln 2/k \dots\dots\dots \text{equação 3}$$

C = massa final das amostras (t), gramas;

C₀ = massa inicial (g);

t = tempo decorrido na experimentação (dias); e

k = constante de decomposição

4.4. Serapilheira

A serapilheira (folhas, galhos, casca) é o material orgânico depositado sobre a superfície do solo e sua contínua decomposição libera lentamente os nutrientes para as plantas. Para sua amostragem foi usado o coletor de serapilheira ou gabarito, de 0,25 m² de área interna (0,5 m x 0,5 m), feitos como quadrados vazados com as bordas de madeira (GUEDES, 2005). Quatro gabaritos foram colocados ao acaso sobre a serapilheira, na área útil de cada parcela, em torno de uma planta sendo duas na linha, a 1,5 m e 0,5 m perpendicularmente à planta, e outras duas na entrelinha de plantio, a 0,5 m e 1,0 m da planta escolhida. O material no interior dos gabaritos foi coletado com auxílio de uma espátula, homogeneizada, determinado o peso úmido em balança com capacidade de até 15 kg e 0,1 kg de precisão. No campo, foram retiradas subamostras de 1 kg, levadas ao laboratório e foram secadas a 40⁰C em estufa com circulação de ar e determinada a umidade. A coleta da serapilheira foi realizada de 27-28/11/07, 03-04/03/08, 12-13/05/08 e 12-13/11/2008 correspondendo a 35, 38, 40 e 46 meses após o plantio. Porém, somente as amostras coletadas, aos 46 meses após o plantio, é que foram analisadas quimicamente.

4.5. Análise química do material vegetal

Para as amostras de folha coletadas aos 4 e 34 meses após plantio foi determinado N pelo método semimicro Kjeldahl, e os teores de P, K, Ca, Mg foram determinados conforme a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

As amostras de folhas, folheto e de serapilheira foram submetidas a digestão com 8 mL de HNO₃ (20 % v/v) e 2 mL H₂O₂, em forno microondas, com temperatura de digestão de 180 °C (método 3051, do manual USEPA SW 846), para determinação dos teores de Cu, Fe, Mn, Zn por ICP-MS (ABREU JUNIOR et al., 2009). Todos os reagentes utilizados eram de pureza compatível para uso em ICP - MS.

4.6. Avaliação da altura e do diâmetro e estimativa da produção de madeira

As avaliações da altura total (Ht) e do diâmetro à altura do peito (DAP) foram realizadas nas datas de 30/06/2005, 05-06/09/2005, 05-06/12/2005, 01/06/2006, 01/12/2006, 05/09/2007 e 28/08/2008, correspondentes a 6, 9, 12, 18, 24, 33, e 44 meses após plantio, respectivamente. Aos 6 meses após o plantio não foi possível medir o DAP devido ao pequeno diâmetro das plantas de eucalipto. Dez árvores do centro de cada parcela foram avaliadas com equipamentos dendométricos. Para medir o DAP e a Ht, utilizaram-se vara com escala métrica e fita métrica, nas duas primeiras medições, e suta e clinômetro eletrônico, nas quatro últimas medições realizadas por funcionários da empresa.

O volume de madeira foi estimado a partir dos dados da altura total (HT) e do diâmetro altura do peito (DAP), com auxílio da equação 4 (GUEDES, 2005):

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = 0,000017 \times \text{DAP}^{1,9117} \times \text{HT}^{1,3065} \dots\dots\dots \text{equação 4}$$

Sendo o DAP em centímetros e Ht, em metros.

O ritmo de crescimento das plantas de eucalipto foi ajustado mediante curvas de crescimento Chapman-Richards, bastante utilizado na área florestal, que descreve uma família de curvas de crescimento que inclui: a logística, a Gompertz e a Boltzmann. Para o presente trabalho os ajustes foram realizados mediante o modelo Boltzmann.

4.7. Análise estatística dos resultados

As análises de variância, de regressão simples e múltipla, e, essencialmente, dos estudos de modelagem de superfície de resposta foram feitas com auxílio do programa SAS (1989). Os dados foram interpretados com o auxílio do modelo de superfície de resposta, considerando o efeito dos fatores (dose de lodo, dose de nitrogênio e dose de fósforo) sobre a variável dependente em estudo. O modelo completo de superfície de resposta é descrito pela equação geral: $Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iP^2 + jN^2$, e nível de significância aceito de até 10%.

O estudo do modelo de superfície de resposta, inicialmente, informa quais fatores: dose de lodo (L), dose de nitrogênio (N) e dose de fósforo (P) foram significativos, e se os efeitos dos fatores L, N e P seguiram os modelos linear, quadrático e/ou apresentaram produtos cruzados (LxN, LxP e NxP). Quando o(s) fator(es) não foi(ram) significativo(s), ele(s) foi(ram) retirado(s) do modelo completo e gerou-se um novo modelo, denominado de reduzido. O coeficiente de regressão (R^2) do modelo reduzido foi recalculado pela divisão da soma de quadrado total do modelo reduzido (SQT) pela soma do SQT com a soma de quadrados de tratamentos (SQTrat), sendo, então, representado em termos das médias dos tratamentos e, neste caso, o erro puro é excluído.

A presença de significância dos produtos cruzados indica a dependência ou interação entre fatores. Nesse caso, foram realizadas análises, modelando os níveis de um fator dentro dos níveis de outro fator e vice-versa; por exemplo, os níveis do fator dose de lodo foram fixados e, dentro de cada nível, analisados os efeitos dos fatores dose de nitrogênio e dose de fósforo, sobre a variável dependente em estudo. O estudo do modelo de superfície de resposta também serviu para informar se houve ponto de máximo ou de mínimo para a variável em estudo e quais os níveis dos fatores responsáveis pelo ponto, ou seja, as respectivas doses de lodo, nitrogênio e fósforo.

Diferentemente dos testes convencionais (Tukey, Duncan ou regressão), o estudo de modelagem de superfície de resposta permite considerações mais diretas na análise dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Efeito da aplicação do lodo de esgoto no solo

5.1.1. Estoque de Carbono no solo

O teor e a dinâmica da matéria orgânica são de muita importância para o manejo do solo, principalmente dos Latossolos (HERNANI et al, 1987), uma vez que esta fornece nutrientes lentamente durante a mineralização, melhorando a qualidade do solo e do ambiente.

Os teores de C-orgânico verificados aos 4 e aos 34 meses após a aplicação do resíduo mostraram efeitos das doses de lodo de esgoto principalmente aos 4 meses após o plantio, nas camadas superficiais de 0-10 cm ($P > 0,05$), 10-20 cm ($P > 0,11$) e 20-40 cm ($P > 0,009$) de profundidade. Porém, aos 34 meses após a aplicação do lodo não se observaram diferenças significativas entre as profundidades do solo (0-10; 10-20; 20-40 cm) evidenciando que o lodo de esgoto e o adubo nitrogenado e fosfatado não produziram alterações nos teores de carbono orgânico a longo prazo (Figura 6).

Figura 5. Teores de C-orgânico no solo em função das doses de lodo de esgoto aos 4 meses (A) e 34 meses (B), após aplicação em área cultivada com plantas de eucalipto.

Os maiores valores médios de C-orgânico foi observado na camada 0-10 cm do solo seguidos pelas camadas 10-20 e 20-40 cm (Figura. 5). Esses valores comparados com os valores da caracterização inicial do solo (Tabela 1) indicam que durante os 4 primeiros meses após aplicação do lodo, houve redução C-orgânico, na camada de 0-10 cm de 19 a 32 %, em relação à camada compreendida entre 0-20cm de profundidade na caracterização inicial, enquanto na camada de 20-40 cm os valores se equipararam. Lira et al. (2008), Vaz e Gonçalves (2002) e Rocha (2002), trabalhando com a cultura de eucalipto, também encontraram redução do C-orgânico após aplicação de lodo de esgoto aos seis meses, nas camadas superficiais. A redução dos teores de C-orgânico durante os primeiros quatro meses pode ter sido devida ao aumento da atividade microbiana do solo o que acelera a decomposição da matéria orgânica. Vaz e Gonçalves (2002) ainda observaram recuperação dos teores após trinta e dois meses, o que corrobora os resultados deste experimento. A recuperação do C-orgânico provavelmente ocorre pela deposição de serapilheira que favoreceu a entrada de carbono. Também, Teixeira (2006) estudando a dinâmica do carbono em solo adubado com lodo de esgoto sob cultivo de eucalipto, observou durante os primeiros sete meses intensa perda da matéria seca nos tratamentos que receberam lodo de esgoto, com redução do estoque de carbono nas doses 20 e 40 t ha⁻¹ (36 e 64 % respectivamente), confirmando novamente o “efeito priming”, efeito que acelera ou inibe a decomposição da matéria orgânica em resposta à adição de resíduos orgânicos ao solo.

Os teores de C-orgânico não foram influenciados pelo fertilizante mineral nitrogenado e fosfatado.

5.1.2. Reação do solo

Aos 4 meses após aplicação do lodo de esgoto foi observado valor médio de pH de 4,1 em todas as camadas e H+Al médio de 35 mmol_c dm⁻³ na camada de 0-10 cm, decrescendo gradualmente com as profundidade do solo. Em relação a esses valores, aos 34 meses houve um decréscimo significativo nos valores de pH e aumento de H+Al para todas as doses de lodo de esgoto utilizadas. Como esse resultado foi observado também no tratamento que não recebeu lodo, acredita-se que a acidez do solo seja devida principalmente ao fato de o solo ser muito arenoso,

conter pouca argila (12%), ter baixa CTC e, portanto, alta lixiviação de nutrientes. O poder acidificante gerado pela biodecomposição do material orgânico de restos vegetais do cultivo anterior e do lodo de esgoto pode ter interferido na acidez, porém, de forma pouco significativa. Em todas as camadas pesquisadas, os tratamentos com adubo mineral apresentaram valores de pH ligeiramente inferiores e valores de H+Al semelhantes aos observados nos tratamentos tratados apenas com lodo, demonstrando a leve acidez causada por esse tipo de fertilizante. Esse efeito observado pode ser atribuído também à transformação do nitrogênio do solo ocorrida no segundo estágio de nitrificação (NH_4^+ formando NO_2^-) que libera H^+ . Ferreira (2005) e Martins (2003) trabalhando com lodo de esgoto em cafeeiros tampouco observaram elevação do pH do solo, da mesma forma que Simonete et al. (2003) e Logan et al. (1997). Diferentemente, Oliveira et al. (2002) em experimento de dois anos consecutivos em cana-de-açúcar fertilizada com lodo de esgoto e Berton *et al.* (1989), em experimento em que lodo de esgoto foi incorporado a cinco diferentes solos, observaram elevação do pH, obviamente em função da utilização de lodo de esgoto alcalinizado.

5.1.3. CTC do solo

Com respeito à CTC, aos 4 meses nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm do solo, os valores observados estiveram nos intervalos entre 39,78 e 64,94; entre 34,27 e 45,07; e entre 27,80 e 46,65 mmol kg^{-1} , respectivamente, observando-se aumento em relação à caracterização inicial do solo, independentemente da adubação mineral ou orgânica.

Aos 34 meses após o plantio, para a camada 0-10 cm de profundidade foi observado aumento da CTC com as doses de P, embora não foi possível o ajuste a um modelo matemático aos resultados. Nas camadas de 10-20 e 20-40 cm de profundidade não foram observados efeitos significativos nem para as doses de lodo, nem para as doses de adubação fosfatada e nitrogenada (Figura 6).

Figura 6, Valores de CTC em solo tratado com lodo de esgoto antes do plantio (Inicial) e aos 120 e 1020 dias após plantio em função da adubação fosfatada na cultura de eucalipto

Mello et al. (1994); Cavallaro et al. (1993); Pigozzo et al. (2008) observaram aumentos na CTC do solo em função da dose de lodo de esgoto em quantidades que variaram entre 0 ate 240 t ha⁻¹ (matéria seca). Por outro lado, outros autores como Vaz e Gonçalves (2002) e Oliveira (1995), não observaram tal efeito.

5.1.4. Saturação por bases do solo (V%)

Foi observado aumento da saturação por bases do solo aos quatro meses após o plantio, devido ao fato de que tanto a calagem feita ao início do experimento como a aplicação do lodo de esgoto e fertilizantes fosfórico e potássico aportaram quantidades significativas de Ca, Mg e K. Houve efeito do lodo de esgoto na variação de V%, em todas as profundidades estudadas (Figura 7). Porém os resultados não se ajustaram aos modelos de regressão linear e quadrática. As

mesmas tendências nos resultados foram encontrados por Nogueira et al. (2006) em cultivos de milho e feijão e por Silva et al. (1998) na cultura de cana-de-açúcar.

Figura 7. V% em solo tratado com lodo de esgoto antes do plantio (Inicial) e aos 120 dias em função do lodo de esgoto e 1020 dias após plantio em função da adubação fosfatada na cultura de eucalipto

Os valores de V% na profundidade de 0-10 cm do solo variaram entre 16,95 e 28,48, independentemente das doses de lodo empregadas. Foi ajustada uma equação de regressão e de superfície de resposta para essa variável, encontrando-se semelhança entre as duas equações. Entretanto para as profundidades de 10-20 e 20-40 cm não foram encontradas diferenças significativas e os valores médios de V% para estas duas profundidades foram de 14,83 e 21,36, respectivamente.

Os valores de V% nas diferentes profundidades aos 34 meses após o plantio apresentaram efeito do lodo e do nitrogênio, sendo que, para a profundidade 0-10 cm, os efeitos significativos foram do lodo de esgoto com efeitos linear e quadrático, enquanto na profundidade de 10-20 cm apenas efeito do nitrogênio foi observado.

Os valores de V% para as diferentes doses de lodo de esgoto estiveram na camada de 0-10 cm de profundidade, entre 16,20 a 19,01 na camada 10-20 cm entre 13,78 a 15,08 e na camada de 20-40 cm estive entre 11,69 a 13,03 (Figura 7). Os valores de V% em função dos tratamentos não puderam ser ajustados pelo modelo de superfície de resposta. Detectou-se também menores valores de V% em comparação com a avaliação feita aos 4 meses, na profundidade de 0–10 cm para as doses 0, 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, fato que se deve à lixiviação dos cátions trocáveis do solo e, ou, à sua absorção pelas plantas, associadas à decomposição dos resíduos vegetais no processo de mineralização e formação das substâncias húmicas pelos microrganismos (Bohnen, 2000).

5.1.5. Macronutrientes no solo

5.1.5.1. Teores de N-Total

Aos 4 meses após plantio, os teores de N-total do solo não mostraram diferenças significativas devida aos fatores doses de lodo, de nitrogênio e de fósforo, observando-se valores médios de 0,50 a 0,63 g kg⁻¹ para a camada 0-10 cm, de 0,39 e 0,43 g kg⁻¹ para 10-20 cm e de 0,30 e 0,36 g kg⁻¹ para 20-40 cm de profundidade, em função das doses de lodo de esgoto (Figura 8). No entanto o modelo estatístico não propiciou ajuste de equação, uma vez que os valores dos coeficientes de determinação foram baixos, como no caso do efeito linear da aplicação de lodo para a profundidade 0-10 cm ($R^2 = 0,37$), e 10-20 cm e quadrático na profundidade 20-40 cm.

Figura 8. Teores de N-total no solo, A= 4 meses após plantio, B = 34 meses após aplicação do lodo de esgoto na cultura do eucalipto, em função das doses de lodo.

Aos 34 meses após o plantio, de maneira geral, o fator doses de lodo foi o que causou maior variação nos teores de N-total em todas as profundidades analisadas (0-10; 10-20 e 20-40), seguido pelo fator doses de nitrogênio.

Os teores de N-total na profundidade de 0 a 10 cm (Figura 9) variaram de 0,13 a 0,40; de 0,23 a 0,67; de 0,26 a 0,76 e de 0,37 a 0,78 g kg⁻¹, para as doses de lodo 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente. Os teores de N-total na camada de 0-10 cm variaram de 0,15 a 0,76; de 0,15 a 0,76; de 0,13 a 0,65 e de 0,20 a 0,81 em g kg⁻¹, respectivamente, em função do adubo nitrogenado. Com relação ao adubo fosfatado os teores para a camada 0-10 cm, variaram de 0,13 a 0,68; de 0,22 a 0,75, de 0,15 a 0,76 e de 0,15 a 0,78 em g kg⁻¹, respectivamente.

Dentre os fatores estudados aos 34 meses, doses de lodo foi o que causou maior variação nos teores de N-total na camada 0-10 cm, seguido pelo fator dose de N. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $Nt_{0-10} = 0,332 + 0,0154L - 0,0025N + 0,000013N^2 + 0,000012NP - 0,000011P^2$; $R^2 = 0,57$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem

($p < 0,0001$), para as doses de N, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0016$) e de segunda ordem ($p < 0,0111$), enquanto para as doses de P houve efeito somente dos parâmetros de segunda ordem ($p < 0,0911$).

Também aos 34 meses, os teores de N-total na profundidade de 10-20 cm do solo (Figura 8), variaram de 0,09 a 0,36; de 0,15 a 0,54; de 0,22 a 0,85 e de 0,29 a 0,57 em g kg^{-1} , para as doses de lodo 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , os teores de N-total variaram de 0,15 a 0,50; de 0,09 a 0,43; de 0,11 a 0,82 e de 0,13 a 0,85 em g kg^{-1} , respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , os teores de N-total variaram de 0,13 a 0,85; de 0,11 a 0,82, de 0,12 a 0,62 e de 0,11 a 0,58 em g kg^{-1} , respectivamente.

Dentre os fatores estudados, o fator doses de lodo foi o que propiciou maior variação nos teores de N-total, seguido pelo fator doses de N. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $N_{t10-20} = 0,148 + 0,024L - 0,000068L^2 + 0,000041NL$; $R^2 = 0,43$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito significativo dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0001$), e de segunda ordem ($p < 0,0002$).

Os teores de N-total na profundidade 20-40 cm do solo (Figura 8), variaram de 0,09 a 0,32; de 0,19 a 0,33; de 0,12 a 0,47 e de 0,30 a 0,44 em g kg^{-1} , para as doses de lodo 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , na forma de uréia, os teores de N-total variaram de 0,12 a 0,44; de 0,09 a 0,43; de 0,09 a 0,47 e de 0,09 a 0,40 em g kg^{-1} , respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato triplo, os teores de N-total variaram de 0,09 a 0,47; de 0,11 a 0,44, de 0,09 a 0,44 e de 0,09 a 0,44 em g kg^{-1} , respectivamente.

Dentre os fatores estudados, dose de lodo foi o que propiciou maior variação nos teores de N-total, seguido pelo fator doses de N. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $N\text{-total } 20-40 = 0,224 + 0,0065L - 0,00065N + 0,000035NL$; $R^2 = 0,52$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0420$), e de segunda ordem ($p < 0,1048$).

5.1.5.2. Nitrogênio inorgânico no solo

Aos 14 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto mostraram efeito linear sobre os teores de N-NH_4^+ do solo, na profundidade 10-20 cm, independentemente das doses de adubo nitrogenado. As doses de adubo nitrogenado causaram aumentos lineares nos teores de N-NH_4^+ nas profundidades 20-40 e 60-90 cm do solo, para a dose $7,7 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto. A presença de N-NH_4^+ nas camadas subsuperficiais do solo mesmo em pequenos teores mostra a movimentação dessa forma nitrogenada, corroborando os resultados encontrados por Gonçalves et al. (2001) e por Oliveira et al. (2001), relacionados à movimentação vertical do N-NH_4^+ .

Tabela 6. Comportamento das doses de lodo de esgoto (L), adubo nitrogenado (N) e adubo fosfatado (P) sobre os teores de N-NH_4^+ no perfil do solo.

Profundidade (cm)	Doses de lodo (t ha^{-1})	Equação $Y = \text{N-NH}_4^+ \text{ no solo (mg kg}^{-1}\text{)}$	R^2
14 meses após o plantio			
10-20		$Y = 1,3078 + 0,0390 * L$	0,11*
20-40	7,7	$Y = 0,0595 + 0,00391 * N$	0,41*
20-40	15,4	$Y = 3,6629 + 0,000495 * P * N$	0,37*
60-90	7,7	$Y = -0,6629 + 0,0473 * N$	0,36*
21 meses após o plantio			
0-10		$Y = 11,0747 - 0,1181 * N$	0,15*
0-10	0	$Y = 12,1415 - 0,1456 * N$	0,35*
20-40	0	$Y = 1,8138 - 0,0389 * N + 0,00029 * N^2$	0,33*
34 meses após o plantio			
0-10		$Y = 7,32 - 0,51L - 0,002L^2 - 0,002NL + 0,0003N^2$	0,11*

* $P < ,0001$ = valores utilizados com significância até 1%

Aos 21 meses após o plantio, as doses de adubo nitrogenado causaram aumentos lineares dos teores de N-NH_4^+ no solo na camada de 0-10 cm, de profundidade independentemente das doses lodo de esgoto. Na camada de 20-40 cm de profundidade, no tratamento sem lodo (Tabela 6), o adubo nitrogenado causou efeito quadrático sobre os teores de N-NH_4^+ do solo. Nos tratamentos com 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} de lodo não foi observado efeito de doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado sobre os teores de N-NH_4^+ .

Aos 34 meses após o plantio as doses de lodo de esgoto independentemente das doses de adubo mineral nitrogenado e fosfatado causaram efeitos significativos nos teores de N-NH_4^+ . Nos tratamentos 7,7 e 15,4 t ha^{-1} de lodo de esgoto observou-se mineralização mais intensa, com efeitos linear e quadrático para o adubo nitrogenado. No entanto, para a dose 23,1 t ha^{-1} , observou-se menor taxa de mineralização.

Figura 9. Teores de nitrogênio na forma amoniacal no solo em função das doses de lodo de esgoto, aos 14, 21 e 34 meses após a aplicação do resíduo em área cultivada com plantas de eucalipto.

O adubo nitrogenado favoreceu o aumento de N-NH_4^+ na profundidade 0-10 cm do solo, sendo que para as profundidades de 10-20 cm e 20-40 cm do solo não houve aumento significativo, indicando que o N-NH_4^+ tendeu a se concentrar na

região da aplicação do adubo, na parte superficial do solo (Figura 9). A presença dessa forma de nitrogênio mineral (N-NH_4^+) é coerente com as condições de solo ácido e de baixa fertilidade, como as encontradas neste experimento, característica que não acarretaria problemas à nutrição nitrogenada do eucalipto, considerando-se a preferência do eucalipto pela absorção dessa forma de N (Vale et. al, 1984).

Aos 14, 21 e 34 meses após aplicação do lodo de esgoto, os teores de N-NH_4^+ nas camadas superficiais podem ter sido influenciados pela mineralização da serapilheira, bem como dos restos de cultura adicionados ao solo, segundo a prática de cultivo mínimo, adotada pela empresa.

Em camadas de solo mais profundas como aos 20-40 cm, aos 14 meses e na profundidade 60-90 cm aos 21 meses os efeitos significativos da adubação nitrogenada nos teores de N-NH_4^+ no solo podem ter sido devidos à textura arenosa do solo, pois em solos argilosos as cargas negativas podem dificultar a mobilidade desse íon. As variações climáticas durante os 14 e 21 meses anteriores à coleta das amostras de solo (Figura 2), também podem ter influenciado a lixiviação do N-NH_4^+ .

5.1.5.3. Teores de N-NO_3^-

Aos 14 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto e as doses de adubo nitrogenado e fosfatado não influenciaram significativamente os teores de N-NO_3^- no solo nas camadas 0-10, 10-20, 20-40, 40- 60 e 60-90 cm de profundidade. Este resultado está de acordo com Andrade; Mattiazzo (2000) que, avaliando os teores de nitrato em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*, 12 meses após o plantio, não observaram efeito de dose de lodo de esgoto sobre o teor de nitrato no solo, em camadas menos profundas (0-30 cm).

Aos 21 meses após o plantio, no tratamento sem aplicação de lodo de esgoto, e somente nas doses de adubo nitrogenado causaram aumentos lineares nos teores de N-NO_3^- no solo na profundidade 10-20 cm. Nessa mesma profundidade, no tratamento que recebeu $7,7 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto, ocorreu o efeito da interação entre as doses de adubo nitrogenado e doses de adubo fosfatado sobre os teores de N-NO_3^- (Tabela 8). Nos tratamentos com $15,4$ e $23,1 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo, não houve efeito de doses de adubo nitrogenado nem de adubo fosfatado sobre os teores de N-NO_3^- .

Figura 10. Teores de nitrogênio na forma nítrica no solo em função das doses de lodo de esgoto, aos 14, 21 e 34 meses após a aplicação do resíduo em área cultivada com plantas de eucalipto

Aos 34 meses após plantio não houve diferença significativa entre os teores de N-NO_3^- no solo, tanto para os tratamentos com lodo de esgoto como para aqueles que receberam adubação nitrogenada e fosfatada. No entanto, os teores de N-NO_3^- encontrados foram inferiores aos encontrados nas avaliações anteriores.

De modo geral aos 14, 21 e 34 meses após o plantio, não houve lixiviação de N-NO_3^- nas camadas mais profundas, provavelmente devido a sua absorção pelo sistema radicular dos eucaliptos. O sistema radicular perene e bem distribuído dos eucaliptos forma um verdadeiro emaranhado de raízes finas na camada mais superficial do solo o que aumenta a eficiência de absorção dos nutrientes, podendo funcionar como um filtro, que evitaria a lixiviação de N-NO_3^- (GUEDES, 2005). Trabalho efetuado por Silva (2007), também menciona a maior absorção de nutrientes por raízes de *E. grandis* nas camadas superficiais do solo.

É importante salientar que o aumento do teor de N-inorgânico após a adição de lodo de esgoto tem sido mencionado na literatura, inclusive em camadas mais profundas do solo, após a incorporação do lodo (BOEIRA; MAXIMILIANO 2009;

BOEIRA; SOUZA, 2007; LUO et al., 2003; VEGA et al., 2003). Os autores destacaram o papel da aplicação do lodo ao solo, no aumento da taxa de mineralização do N-orgânico e da disponibilização de N-inorgânico. Conseqüentemente, o incremento na concentração de N-NO_3^- , torna maior seu potencial de lixiviação no perfil do solo, com risco de impacto ambiental negativo se não houver sincronia com a absorção do nutriente pelas raízes. Essa maior lixiviação do N-NO_3^- também foi mencionada por Vega et al. (2003), embora esses autores tenham trabalhado em um cultivo de pupunheiras realizado em região de precipitação pluviométrica muito mais elevada que a do presente experimento.

5.1.5.4. Teores de P, K, Ca e Mg

5.1.5.4.1. Fósforo

Os teores de P aos 4 meses após aplicação do lodo de esgoto, para todas as camadas, não diferiram significativamente segundo o modelo estatístico aplicado. Os teores médios de P considerando as doses de lodo independentemente das doses de fertilizante mineral foram: 18,19; 12,65; 15,97; 18,64 g kg^{-1} , para as doses 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente, na camada 0-10 cm de profundidade.

Para a profundidade de 10-20 cm os teores médios de P foram 8,39; 4,27; 6,91 e 7,10 g kg^{-1} e para a camada 20-40 cm de profundidade, foram encontrados teores de 4,89; 2,66; 3,32 e 4,00 g kg^{-1} para as doses de 0, 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Observa-se, em geral, que os maiores teores de P ocorreram no tratamento que recebeu fertilização química, porém fica evidente que os maiores teores foram observados na camada mais superficial do solo.

Figura 11. Teores de fósforo disponível solo tratado com lodo de esgoto antes do plantio (Inicial) e aos 120 e 1020 dias após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto

Aos 34 meses após o plantio, na profundidade 0-10 cm, entre os fatores aplicados, o fator dose de P foi o que propiciou maior diferença nos teores de P do solo, seguido pelos fatores dose de N e dose de L. Os resultados foram ajustados pelo seguinte modelo de superfície de resposta: $P_{0-10} = 6,85 - 0,019N + 0,085P + 0,00021N^2 + 0,00063PN + 0,00069P^2$; $R^2 = 0,29$ e $p < 0,0001$. Para o P houve efeitos linear ($p < 0,0124$) e quadrático ($p < 0,0379$). As doses de lodo de esgoto aplicadas não produziram efeitos significativos nos teores de P do solo, enquanto as doses aplicadas de N propiciaram efeitos lineares ($p < 0,0040$) e quadráticos ($p < 0,0210$) significativos, Houve efeito da interação $P \times N$ ($p < 0,0001$).

Na profundidade 10-20 cm do solo, o fator dose de N foi o que causou maior diferença nos teores de P, seguido pelos fatores dose de P e dose de L. Os dados foram ajustados pelo seguinte modelo de superfície de resposta: $P_{10-20} = 4,504 - 0,0324N - 0,0324P + 0,00011N^2 + 0,00022PN$; $R^2 = 0,24$ e $p < 0,0001$. Para o fator

dose de N houve efeito linear ($p < 0,0034$) e quadrático ($p < 0,0822$). Para o fator dose de P foi observado efeito linear ($p < 0,0767$). Para o fator dose de lodo não houve efeito significativo sobre os teores de P do solo. Houve efeito da interação P*N ($p < 0,0121$).

Na profundidade 20-40 cm do solo, o fator dose de L foi o que causou maior diferença nos teores de P do solo, seguido pelos fatores dose de N e dose de P. Os dados foram ajustados pelo seguinte: $P_{20-40} = 1,762 - 0,0138N + 0,00037NL + 0,000050N^2 - 0,00042PL + 0,00014P^2$; $R^2 = 0,25$ e $p < 0,0001$. Para o fator dose de N houve efeito linear ($p < 0,0177$) e quadrático ($p < 0,01390$). Para o fator dose de P houve efeito linear ($p < 0,1496$). Houve efeito da interação P*L ($p < 0,0121$).

Os aumentos progressivos verificados nos teores de P dos tratamentos que receberam lodo de esgoto, estão de acordo com as observações de Bramryd, (2001), Simonete (2003) e Guedes et al. (2006). Outros trabalhos também tiveram aumentos da concentração de P no solo após aplicação de lodo de esgoto: Vaz & Gonçalves (2002) em eucalipto, Bezerra et al. (2006) em áreas degradadas, Rheinheimer (2000) e Gatiboni et al. (2007) em sistemas de plantio direto.

No presente trabalho os teores mais altos de P encontrados aos 120 dias após plantio nos tratamentos que receberam adubação mineral, poderiam estar relacionados ao fato de o lodo aparentemente poder atuar no decréscimo da adsorção do P no solo devido ao elevado teor de matéria orgânica. Esta pode fornecer íons orgânicos que competiriam com o fosfato pelos sítios de adsorção (HUE, 1995). Em todo caso o P é retido na matéria orgânica na fase inicial de decomposição (SWIFT et al., 1979), sendo liberado lentamente (GUEDES; POGGIANI, 2003).

Ao contrário do observado por Silva et al. (2006), os teores de P observados aos 1020 dias após plantio no presente trabalho, decresceram em todas as profundidades avaliadas.

5.1.5.4.2. Potássio

Aos 4 meses após o plantio os tratamentos empregados não produziram diferenças significativas nos teores de K do solo na profundidade 0-10 cm. O aumento de K foram observado nas camadas mais profundas do solo,

provavelmente devido à lixiviação desse nutriente. Os teores mais elevados foram observados para a dose de 15,4 t há⁻¹ de lodo de esgoto.

Na profundidade 10-20 cm, não houve possibilidade de ajuste dos teores de K no solo, em função da dose de lodo aplicada, verificando-se um coeficiente de determinação (R^2) muito baixo.

Da mesma forma, para a profundidade de 20-40 cm o modelo não se ajustou. Os valores estiveram dentro da faixa considerada como muito baixo e baixo por Raij et al. (1996).

Figura 12. Teores de Potássio disponível solo tratado com lodo de esgoto aos 120 e 1020 dias após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto

Aos 34 meses após plantio não foi observado efeito significativo para os teores de K de nenhum dos tratamentos empregados. Porém, o fator dose de lodo propiciou os maiores teores de K. No entanto esses teores de K no solo aos 34 meses foram mais baixos, em comparação com os teores encontrados aos 4 meses

após o plantio. Isso se deve ao fato de que nesse período de avaliação houve pouca precipitação pluvial

Nas maiores profundidades, nas duas avaliações feitas, foram observados teores elevados de K, provavelmente devido ao fato de o K apresentar grande mobilidade no solo. Esta mobilidade vertical do nutriente deve-se ao efeito adicional promovido pelo fluxo de massa decorrente da percolação de água foi relatada por Ernani et al. (2007) Contudo, segundo a classificação de disponibilidade de van Raij et al. (1996) os teores de K no solo aos 34 meses após plantio, para as diferentes camadas, podem ser considerados como muito baixos.

5.1.5.4.3 Cálcio

Aos 4 meses após o plantio não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre os teores de Ca no solo e para todas as camadas analisadas, 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade, os resultados não se ajustaram ao modelo de regressão linear ou quadrática. No entanto, ainda que os efeitos não tenham sido significativos, os teores de Ca, aos 4 meses após aplicação do lodo, na dose 0 de lodo de esgoto, nas camadas 0-10; 10-20 e 20-40 cm de profundidade, foram maiores que aqueles verificados nos tratamentos que receberam lodo (Figura 13). Esse fato provavelmente se deve a que a adsorção específica de íons bivalentes na superfície dos óxidos do solo não tenham sido suficiente para reter os cátions provocando a lixiviação do Ca^{2+} . Também as condições favoráveis de pH, presença de gás carbônico e carbonatos associados aos cátion Ca e Mg podem ter provocando a sua lixiviação na forma de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e/ou $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. (FASSBENDER,1986).

Esses resultados diferem dos resultados encontrados por Silva et al. (2006) que não observaram diferenças entre os teores de Ca dos tratamentos que receberam adubação mineral e aquelas que receberam lodo de esgoto seco.

Figura 13. Teores de Cálcio, extraído com resina, aos 4 e 34 meses após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto

Aos 34 meses após o plantio os teores de Ca nas diferentes profundidades do solo foram diminuindo seguindo a mesma tendência observada aos 4 meses, exceto pela dose 15,4 t ha⁻¹.

5.1.5.4.4. Magnésio

Aos 4 meses após aplicação do lodo, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm do solo, os teores mais altos de Mg foram observados no tratamento correspondente à dose 0 de lodo de esgoto, seguido pelos tratamentos correspondentes às doses 15,4 e 23,1 t ha⁻¹. Da mesma forma que para o Ca, também para o Mg foi observada lixiviação (Figura 14). Considera-se que esse fato possa estar relacionado à calagem efetuada na área experimental, com calcário dolomítico que possuía na sua conformação 20% de MgO.

Para a camada de 0-10 cm de profundidade, aos 4 meses após aplicação do lodo, a análise de variância mostrou efeito de dose de lodo de esgoto no teor de Mg do solo e o modelo, expresso pela equação: $Mg = 4,87 - 0,30L + 0,014L^2$, os maiores teores foram observados na dose 0 de lodo, sendo que o menor valor esteve na dose $7,7 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto.

Figura 14. Teores de Magnésio extraído com resina, no solo tratado com lodo de esgoto aos 4 e 34 meses após aplicação do resíduo, em função das doses de lodo de esgoto na cultura do eucalipto

Também para as camadas 10-20 e 20-40 cm profundidade, houve efeito do lodo de esgoto, adotando a mesma tendência que a camada 0-10 cm embora com menores teores. Na camada 20-40 cm, a equação de melhor ajuste, foi a seguinte: $Mg_{20-40} = 28,84 + 18,14L$. ($P > 0,08$)

Aos 34 meses após aplicação do lodo não foram observados efeitos dos tratamentos. Os teores de Mg diminuíram, nas camadas analisadas. Os teores mais altos de Mg foram observados na camada 0-10 cm do solo para a dose $15,4 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto seguido pela dose 0 t ha^{-1} (Figura 14).

O deslocamento de Ca^{2+} e Mg^{2+} na profundidade de 40 cm ou mais, pode estar relacionado ao número de cargas elétricas negativas integrantes da CTC, como também ao teor de matéria orgânica, que além de afetar as cargas, afeta também a quantidades de ânions presentes na solução do solo (ERNANI et al., 2001),.

5.1.5.5. Micronutrientes no solo

De modo geral, o fator dose de lodo foi o que causou efeito nos teores de Cu, Fe, Mn e Zn no solo, extraídos com DTPA, nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade tanto aos 4 como aos 34 meses após o plantio.

5.1.5.5.1. Cobre

Os teores de Cu no solo, aos 4 e 34 meses após aplicação do lodo, mostraram uma tendência linear para todas as camadas, observando-se teores mais elevados nos tratamentos que receberam adubação com lodo

Aos 4 meses os teores foram mais elevados em comparação aos teores da caracterização inicial do solo, decrescendo conforme a profundidade. Andrade; Mattiazzo (2000), observaram tendências semelhantes, porém aos 360 dias após o plantio.

Aos 34 meses, em todas as camadas avaliadas, os teores de Cu, foram mais elevados tanto em relação aos teores da caracterização inicial, como aos 4 meses após a aplicação do lodo. Estas observações também foram reportadas por Silva, (2006) aos 36 meses, utilizando lodo de esgoto em cultura de eucalipto. Uma das características do micronutriente Cu é sua pouca mobilidade no solo o que poderia explicar seu acúmulo na camada superior. Também as altas concentrações desse micronutriente no lodo de esgoto utilizado podem ter contribuído para a elevação do teor. Existem vários estudos que reportam as concentrações desse micronutriente nas camadas superficiais do solo entre eles Lobo, (2007), em girassol, com aplicação de lodo de esgoto, Andrade; Mattiazzo (2000) e Silva (2006) em *Eucalyptus grandis* aos 36 meses.

Os teores de Cu no solo nos diferentes períodos de avaliação e para os diferentes tratamentos estiveram na faixa considerada entre baixa e média (RAIJ et al. 1996)

Figura 15. Teores de cobre disponível no solo tratado com lodo de esgoto aos 4 e 34 meses após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto.

5.1.5.5.2. Ferro

Aos 04 meses após aplicação do lodo de esgoto, na camada 0-10 cm de profundidade não foram encontradas diferenças significativas nos teores de Fe do solo, propiciadas pelos tratamentos com lodo de esgoto (Figura 16). Na camada de 0-10 cm de profundidade, foram observados os teores mais elevados de Fe. Da mesma forma, para as camadas seguintes de 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, os teores de Fe do solo não apresentaram diferenças propiciadas pela aplicação de lodo de esgoto. Os teores de Fe extraídos com DTPA, estiveram dentro da faixa considerada alta (RAIJ et al., 1996). Aos 34 meses após aplicação do lodo observou-se redução dos teores de Fe no solo em todos os tratamentos e em todas

as profundidades analisadas, embora na camada 10-20 cm do solo observou-se elevação dos teores de Fe para as doses 0 e 7,7 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, contrária à tendência observada nas outras camadas. Uma das formas de ocorrência de Fe está na matéria orgânica, onde se encontra complexado aos ácidos fúlvicos e húmicos favorecendo a deslocamento deste no perfil do solo.

Figura 16 Teores de ferro disponível no solo tratado com lodo de esgoto aos 4 e 34 meses após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto.

5.1.5.5.3. Manganês

Aos 4 meses após o plantio observou-se aumento dos teores de Mn no solo, para todas as profundidades avaliadas, em comparação aos teores observados na caracterização inicial do solo. Os teores mais elevados de Mn foram observados na camada 0-10 cm, decrescendo com a profundidade do solo. Em todas as profundidades estudadas os tratamentos correspondentes às duas doses de lodo mais altas proporcionaram aumento significativo no teor de Mn do solo. Não foi

observada influência significativa dos tratamentos com P e N sobre os teores de Mn do solo, de acordo com o observado por Guedes (2005) e ao contrário das observações de Silva (2006). Aos 34 meses os teores de Mn diminuíram em relação aos quatro meses. Os teores encontrados nas avaliações feitas aos 4 e 34 meses após plantio estiveram dentro da faixa considerada como média (RAIJ et al (1996).

Figura 17. Teores de manganês disponível solo tratado com lodo de esgoto aos 4 e 34 meses após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto.

5.1.5.5.4. Zinco

Aos quatro meses após aplicação do lodo de esgoto, foi observado efeito significativo das doses de lodo nos teores de Zn do solo extraído com DTPA. As doses 15,4 e 23,1 t ha^{-1} propiciaram os maiores teores de Zn na camada 0-10 cm do solo que alcançaram valores superiores aos da amostragem inicial. Por outro lado, os tratamentos 0 e 7,7 t ha^{-1} de lodo, foram os que propiciaram os mais baixos teores de Zn do solo, ainda mais baixos que aqueles observados na caracterização

inicial do solo. Aos 34 meses, os teores de Zn se apresentaram mais baixos que aos 4 meses de avaliação, abaixo ainda daqueles teores observados na caracterização inicial e esse fato provavelmente possa estar relacionado ao crescimento das árvores que intensificaram a absorção desse micronutriente ou pelo antagonismo entre este micronutriente e o Cu e Fe que inibem sua absorção. Os teores de Zn para os dois períodos de avaliação estiveram dentro da faixa considerada como alta por Raij (1996).

Figura 18. Teores de zinco disponível no solo tratado com lodo de esgoto aos 120 e 1020 dias após plantio em função do lodo de esgoto na cultura do eucalipto.

6. TEORES DE NUTRIENTES NAS PLANTAS

6.1. Macronutrientes

6.1.1. Nitrogênio

Os teores de N-total nas folhas das plantas de eucalipto, aos 4 meses, não foram influenciados significativamente pela aplicação de doses de lodo de esgoto, de adubo nitrogenado e adubo fosfatado. Entretanto, aos 8 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto causaram aumentos, lineares nos teores de N nas folhas, independentemente da aplicação de doses P e N. Aos 13 meses após o plantio, ocorreu interação significativa entre doses de lodo de esgoto e doses de adubo nitrogenado sobre os teores de N nas folhas. Nessa mesma época, no tratamento com $7,7 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto, as doses de adubo nitrogenado causaram aumentos, lineares nos teores de N das folhas (Tabela 7).

Aos 18 meses após aplicação do lodo houve efeito linear nos teores de N nas folhas, entretanto aos 24 meses não foi observado efeito do lodo. Na avaliação feita aos 43 meses houve efeito do lodo de esgoto

Tabela 7. Efeito das doses de lodo de esgoto (L) e adubo nitrogenado (N) sobre os teores de N nas folhas de eucalipto aos 8, 13, 18 e 43 meses após a aplicação do lodo de esgoto.

Doses de lodo (t ha^{-1})	Equação Y = N nas folhas (g kg^{-1})	R ²
8 meses após aplicação do lodo		
	$Y = 20,6598 + 0,2075 \cdot L$	0,42*
13 meses após aplicação do lodo		
	$Y = 18,9718 - 0,000918 \cdot N \cdot L$	0,38*
7,7	$Y = 19,5725 + 0,01813 \cdot N$	0,34*
18 meses após aplicação do lodo		
	$Y = 19,96 - 1,139L$	0,36
43 meses após aplicação do lodo		
	$Y = 172,06 + 2,379L - 0,072L^2$	0,34

* $P < 0,0001$

Embora o efeito de épocas de coleta de folhas não tenha sido avaliado estatisticamente, observou-se aos 4 meses após o plantio, que os teores médios de N nas folhas foram superiores a 30 g kg^{-1} , enquanto aos 8 e 13 meses após o plantio, os teores de N foram menores que 28 g kg^{-1} . Tal fato, segundo Guedes; Poggiani (2003) pode ser atribuído à existência de uma quantidade de N mineral no lodo de esgoto que foi rapidamente disponibilizada, proporcionando aumento nos teores de N na planta logo aos 4 meses após a aplicação do lodo. Pode ainda ser atribuído ao efeito de concentração do nutriente na folha devido à menor área foliar, aos 4 meses após o plantio. Observou-se aos 4, 8, 13, 18, 24 e 43 meses após o plantio, que os teores médios de N nas folhas, mesmo na testemunha, estiveram acima da faixa entre 13 e 18 g kg^{-1} , considerada adequada para folhas de plantas adultas de eucalipto (GONÇALVES et al.,1997).

Figura 19. Teores de N- total na folha de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto

De acordo com Guedes; Poggiani (2003), o fato de as árvores testemunhas manterem o nível adequado do nutriente pode ser devido à decomposição dos restos culturais deixados nas entre linhas da área experimental segundo às práticas do cultivo mínimo e à presença do sistema radicular das árvores que foram cortadas para a instalação do experimento, que provavelmente liberaram N. Consequentemente a maior absorção de N em florestas pode estar relacionada à maior disponibilidade de amônio, que pode ser quimicamente fixado como amônia na serapilheira e húmus no processo de decomposição (AXELSSON; BERG, 1988). Por outro lado, vários estudos permitiram observar que exsudados radiculares, rizosfera, microflora e fauna do solo têm o potencial de acelerar a reciclagem de nutrientes (CLARHOLM 1985; BIONDINI 1988; ZHU e EHRENFELD 1996; PRIHA et al 1999).

6.1.2. Fósforo

Os 3 fatores estudados não propiciaram diferenças significativas nos teores de P nas folhas, aos 4 meses após o plantio. Os teores médios de P nas folhas estiveram acima do intervalo entre 0,9 e 1,3 g kg⁻¹ considerado ideal para folhas de plantas adultas de eucalipto (Gonçalves et al., 1997), haja vista que, por ocasião do plantio (Tabela 1), antes da aplicação dos tratamentos, os teores disponíveis de P no solo já eram classificados como médios para culturas florestais (RAIJ et al., 1997).

Aos 34 meses após plantio, Não houve diferenças entre doses de lodo de esgoto. Os teores estiveram abaixo dos teores encontrados aos 4 meses.

6.1.3. Potássio

Aos 4 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto propiciaram aumentos lineares dos teores de K nas folhas, independentemente das doses de adubo nitrogenado (Tabela 8). Esses teores estiveram dentro do intervalo de 9 a 13 g kg⁻¹, considerado adequado nas folhas de eucalipto (GONÇALVES et al., 1997). É importante mencionar que esse resultado pode ter-se alcançado devido à adubação mineral complementar com K, por ocasião do plantio. A concentração de K no lodo

de esgoto é baixa, visto que esse elemento é altamente solúvel em água, sendo perdido no efluente líquido durante o tratamento (TSUTYA, 2001).

Tabela 8. Efeito das doses de lodo de esgoto (L) e adubo fosfatado (P) sobre os teores de K e Ca nas folhas de eucalipto aos 4 meses após plantio.

Y(g kg ⁻¹)	Doses de lodo (t ha ⁻¹)	Equação	R ²
4 meses após o plantio			
K		$Y = 12,8457 - 0,12725 \cdot L$	0,22*
Ca		$Y = 4,3981 + 0,1533 \cdot L - 0,00448 \cdot L^2$	0,20*
Ca	23,1	$Y = 5,2882 + 0,03076 \cdot P - 0,000334 \cdot P^2$	0,29*

Valores com significância ate 0,01

Segundo Siqueira; Malavolta (2000), cerca de 24 % do total de K acumulado no eucalipto encontra-se nas folhas, o que nos leva a pensar que também os restos deixados da cultura anterior tenham contribuído para manter os teores adequados desse nutriente aos 4 meses após plantio.

Aos 34 meses após plantio, não foi encontrado efeito dos tratamentos, encontrando-se ainda, menores teores em comparação aos encontrados no quarto mês (Figura 20).

6.1.4. Cálcio e Magnésio

Aos 4 meses após plantio a doses de lodo de esgoto aumentaram os teores de Ca das folhas independentemente das doses dos adubos nitrogenado e fosfatado (Tabela 8).

Os teores de Ca e Mg estiveram abaixo dos intervalos de 6 a 10 g kg⁻¹ e de 3,5 a 5,0 g kg⁻¹, respectivamente, consideradas adequadas para as folhas de plantas adultas de eucalipto (GONÇALVES et al., 1997). Segundo Malavolta et al. (1997), elevadas concentrações de K na solução do solo podem inibir competitivamente a absorção radicular de Ca e, principalmente de Mg pelas raízes. Aos 34 meses após plantio foi observado ligeiro aumento teores de Ca e Mg. estando entre os intervalos de 3,73 a 4,0 para o Ca, e para o Mg de 2,02 a 2,42 (Figura 21). Estes teores de Mg coincidem com os encontrados por Silva et al. (2008), em avaliação de concentração de nutrientes em *Eucalyptus grandis* adubado com lodo de esgoto, porém essas avaliações foram feitas aos 18 meses após plantio.

Figura 20. Teores de macronutrientes nas folhas de eucalipto em função das doses de lodo de esgoto aos 4 meses após plantio.

Figura 21. Teores de macronutrientes nas folhas de eucalipto em função das doses de lodo de esgoto aos 43 meses após plantio.

6.2. Micronutrientes

Aos 4 meses após o plantio, foi observado efeito significativo tanto das doses de lodo de esgoto como de adubo fosfatado sobre os teores de Cu nas folhas. Porém os teores de Cu aos 4 meses após o plantio estiveram acima da faixa considerada adequada entre 7,0 e 10,0 mg kg⁻¹, por Gonçalves et al. (1997) às folhas de eucalipto. Aos 43 meses após plantio os tratamentos não propiciaram efeito nos teores de Cu nas folhas, porém houve decréscimo nos teores em comparação com os teores observados aos 4 meses, com teores abaixo dos considerados adequados. Esse fato poderia confirmar que os compostos constituintes da matéria orgânica, responsáveis pela formação de complexos orgânicos com micronutrientes do solo, diminuíram a solubilidade desse micronutriente, em virtude da complexação com ácidos fúlvicos e outros compostos (STEVENSON; ARDAKANI, 1972). Assim mesmo, a maior tendência para hidrolisar e maior eletronegatividade do Cu, faz que apresente labilidade muito baixa o que limita sua fitodisponibilidade (Mc BRIDE, 1997).

Os teores de Fe, Mn e Zn, aos 4 meses após o plantio, foram incrementados pelas doses de lodo de esgoto (Figura 22 e 23), independentemente das doses de adubo nitrogenado e adubo fosfatado. As doses de lodo de esgoto mostraram efeito quadrático sobre os teores de Fe e aumentos lineares, nos teores de Mn e Zn das folhas.

Dentro desse grupo de micronutrientes os teores de Mn apresentaram os maiores aumentos, entre 364 a 680 mg kg⁻¹, com o aumento das doses de lodo de esgoto. Com aplicação de 7,7 t ha⁻¹ de lodo de esgoto as folhas apresentaram concentrações dentro da faixa considerada adequada às folhas de eucalipto, entre 400 e 600 mg kg⁻¹. Porém as doses de 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo no solo propiciaram às folhas, concentrações de Mn nas folhas superiores a faixa adequada. com o mais alto valor médio de 680 mg kg⁻¹, observado no tratamento 23,1 t ha⁻¹ de lodo. (Figura 22). Aos 43 meses após o plantio, os teores de Mn nas folhas diminuíram em concordância com aqueles observados por Silva (2006), em plantas de *E. grandis* aos 540 dias após o plantio. No entanto, diferentemente do observado por esse autor, para quem esse fato estaria relacionado à elevação dos valores de pH do solo, o solo do presente trabalho aos 43 meses após o plantio, manteve os valores do pH na mesma faixa dos valores observados antes da instalação do experimento.

Segundo Guedes; Pogiani (2003) decréscimos nos teores de Mn no solo com a aplicação de lodo de esgoto são benéficos ao eucalipto, uma vez que estudos recentes têm reportado em eucalipto, decréscimo de produtividade em solos com excesso de Mn (SGARBY, 2002).

Figura 22. Teores de Mn na folha de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto aos 4 e 43 meses após aplicação do lodo.

As concentrações de Fe estiveram abaixo da faixa considerada como adequada para plantas de eucalipto (150 - 200 mg kg⁻¹) mostrando um grau elevado de deficiência no presente experimento. No entanto o lodo de esgoto apresenta alto teor deste micronutriente. Segundo Silva (2003), a planta de eucalipto mantém um equilíbrio deste elemento mesmo havendo maior disponibilidade deste no solo. Geralmente este micronutriente se encontra complexado na matéria orgânica e silicatos o que diminuiria sua fitodisponibilidade (DAVIES, 1995).

Aos 4 meses o teor de Zn nas folhas apresentou concentrações dentro da faixa adequada para este micronutriente em plantas de eucalipto (35 – 50 mg kg⁻¹) exceto na doses 7,7 cujas concentrações estiveram ligeiramente abaixo desta faixa.

Segundo Mc Bride, (1994) este micronutriente tem mobilidade média e a complexação com a matéria orgânica diminuem muito sua solubilidade. Silva, (2006), observou a mesma tendência deste micronutriente avaliando produção de madeira e ciclagem de nutrientes em *E. grandis*, com o aumento das doses de lodo de esgoto aos 540 dias de avaliação, embora com concentrações menores (8 a 14,3 mg kg⁻¹), aos encontrados neste trabalho, na avaliação efetuada aos 4 meses. No entanto, aos 43 meses após plantio as concentrações de Zn na planta diminuíram, alcançando concentrações parecidas as encontradas por Silva (2006) em avaliações feitas em cultura de eucalipto (Figura 23).

Figura 23. Teores de micronutrientes Cu, Fe e Zn nas folhas de eucalipto aos 4 meses após plantio, em função das doses de lodo de esgoto.

Figura 24. Concentração de Cu, Fe e Zn nas folhas de eucalipto após 43 meses do plantio, em função das doses de lodo de esgoto.

Tabela 9. Comportamento das doses de lodo de esgoto (L) e adubo fosfatado (P) sobre os teores de Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de eucalipto

Y (mg kg ⁻¹)	Doses de lodo (t ha ⁻¹)	Equação	R ²
4 meses após o plantio			
Cu	Geral	$Y=14,6581+0,18193*L-0,085192*P-0,004994*L^2+0,00031*P^2$	0,61*
Cu	Sem lodo	$Y = 14,92159-0,12073*P$	0,63*
Cu	15,4	$Y = 16,0551-0,09166*P$	0,66*
Fe		$Y = 126,5959-0,08889*L^2$	0,16*
Mn		$Y = 407,1972+22,5462*L$	0,50*
Zn		$Y = 27,1318+0,8843*L$	0,45*

* P < 0,0001 = valores utilizados com significância até 10%

Os teores de Cu, Mn e Zn nas folhas de eucalipto estiveram relacionados positivamente com os teores dos respectivos elementos no solo, na camada 0-10 cm de profundidade. Resultado semelhante foi obtido por De Felipo et al. (1991), porém

analisando o solo na camada 0-20 cm. em avaliação da eficiência agronômica do lodo de esgoto de uma siderúrgica.

7. TEORES “SEMITOTAIS” NO SOLO

7.1. Micronutrientes

O fator dose de lodo foi o que causou maior alteração nos teores semitotais de Cu, Fe, Mn e Zn no solo, nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, aos 4 e 34 meses após o plantio. As doses de N e P não alteraram os valores destes elementos no solo. Os modelos de superfície de resposta que melhor se ajustaram aos dados apresentaram parâmetros de primeira e de segunda ordem significativos, representados por modelos de regressão quadrática, para Cu, Mn e Zn (Figuras 25, 26 e 27).

Figura 25. Teores semitotais de Cu no solo nas camadas 0-10, 11-20 e 21-40 cm, de profundidade, em função das doses de lodo de esgoto (L), 34 meses após o aplicação do lodo.

Figura 26. Teores semitotais de Mn no solo nas camadas 0-10, 11-20 e 21-40 cm, de profundidade, em função das doses de lodo de esgoto (L), 34 meses após o aplicação do lodo.

Figura 27. Teores semitotais de Zn no solo nas camadas 0-10, 11-20 e 21-40 cm, de profundidade, em função das doses de lodo de esgoto (L), 34 meses após o aplicação do lodo

No caso do Zn, nas profundidades de 0-10, o modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $Y = 5,67 + 0,492L - 0,0322N - 0,01003L^2 + 0,000224N^2$; $R^2 = 0,57$ e $p < 0,0001$.

Aumentos nos teores de Cu em solo tratado com lodo de esgoto, na profundidade de 0-20 cm, também foram verificados por outros autores (BERTON ET AL., 1989; OLIVEIRA, 2000). Apesar do aumento nos teores de Cu do

solo com as doses de lodo, os valores obtidos se encontram abaixo dos valores orientadores de qualidade para solo (CETESB, 2005), que é 35 mg kg^{-1} .

Os teores semitotais de Fe no solo, variaram, em mg kg^{-1} , de 7022 a 8918, respectivamente. Verificou-se um aumento linear dos teores de Fe em função das doses de lodo de esgoto.

Os teores semitotais de Mn no solo, variaram, em mg kg^{-1} , de 21,1 a 53,3, respectivamente.

Os teores semitotais de Zn no solo, variaram, em mg kg^{-1} , de 2,48 a 20,96, respectivamente. Houve predominantemente efeito linear de doses de lodo. Oliveira (2000) e Oliveira; Mattiazzo (2001), estudando o efeito de doses de lodo na cultura de cana-de-açúcar, e Pigozzo et al. (2006), na cultura de milho, também verificaram acréscimo dos teores de Zn no solo em razão das doses do resíduo. O aumento dos teores de Zn no solo, de acordo com as doses, pode estar relacionado ao fato de o Zn se associar principalmente com óxidos de Fe e Al, e também com a matéria orgânica proveniente do lodo de esgoto.

Embora tenha havido aumento no teor de Zn do solo de acordo com as doses de lodo, todos os valores obtidos se encontraram abaixo dos valores orientadores de qualidade para solo (CETESB 2005), que é 60 mg kg^{-1} .

8. FOLHEDO

8.1. Produção de folheto

Na estação do inverno e da primavera de 2006, as doses de lodo de esgoto, de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado não causaram variações significativas sobre a produção de folheto.

Na estação do verão de 2007, ocorreu à interação entre as doses de lodo de esgoto e de adubo nitrogenado sobre a produção do folheto (Tabela 12). Na estação do outono de 2007, as doses de lodo de esgoto e de adubo nitrogenado mostraram efeito linear e quadrático sobre a produção de folheto.

Tanto no verão quanto no outono de 2007, as doses de lodo de esgoto e de adubo nitrogenado aumentaram a produção de folheto. No verão de 2007 a produção de folheto foi menor do que a produção de folheto no outono de 2007. Isso pode estar relacionado com as variações climáticas (Figura 2), ou seja, nos meses de dezembro de 2006 e janeiro e fevereiro de 2007 (verão), quando ocorreram as maiores precipitações, houve menor produção de folheto e nos meses de março, abril e maio de 2007 (outono), onde ocorreram as menores precipitações, houve maior produção de folheto. No verão, outono e inverno de 2008 a produção de folheto não foi alterada pela dose de lodo de esgoto 0; 7,7 e 15,4, entretanto para a dose 23,1 de lodo a produção de folheto foi decaindo seguindo a tendência das precipitações pluviais. Notou-se também que as precipitações pluviais em 2008 foram menores em relação ao ano anterior, para os mesmos períodos. As equações que melhor se ajustaram estão representadas na tabela 10, porem com coeficientes de variação muito baixos.

Figura 28. Produção de folheto, segundo as estações do ano e em função das doses de lodo de esgoto e relacionando-as aos dados climáticos.

Tabela 10. Comportamento das doses de lodo de esgoto (L) e de adubo nitrogenado (N) sobre a produção de folheto de eucalipto.

Estações do Ano	Equação Y = produção de folheto (kg ha ⁻¹)	R ²
Verão 2007	$Y = 946,3 + 0,09 \cdot N \cdot L$	0,28
Outono 2007	$Y = 1860,02 + 42,42 \cdot L + 6,738 \cdot N - 1,7308L^2 - 0,0467 \cdot N^2$	0,27
Outono 2008	$Y = 1614,9 + 0,018 \cdot N^2$	0,11
Inverno 2008	$Y = 2757,17 - 0,12 \cdot NL + 0,02 \cdot N^2$	0,11

* P < 0,0001 = valores utilizados com significância até 10%.

9. AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MADEIRA

9.1. Altura, diâmetro e volume de madeira das árvores de eucalipto

De maneira geral, as doses de lodo de esgoto promoveram o crescimento das árvores de eucalipto aos 6, 9, 12, 18, 24, 33 e 44 meses após o plantio. As plantas apresentaram os maiores crescimentos nas doses de 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, independentemente da época de avaliação (Figura 1). Vaz; Gonçalves (2002), avaliando o efeito da aplicação de 5, 10, 15, 20 e 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, base seca, em um povoamento de *Eucalyptus grandis*, observaram que, aos 24 meses de idade do eucalipto, a dose de 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, com ou sem complementação de K, resultou em crescimento semelhante ao obtido com adubo NPK mineral. Resultado parecido foi observado no presente trabalho após 12 meses do plantio; porém, na fase inicial, aos 6 e 9 meses, os tratamentos com lodo apresentaram maiores crescimento do que a adubação mineral.

A altura das árvores de eucalipto, aos 6 meses após o plantio, foi influenciada pelas doses de lodo de esgoto e de adubo fosfatado de forma linear e quadrática. No tratamento sem lodo, as doses de adubo fosfatado causaram aumentos, de forma linear, na altura das árvores. Nos tratamentos com 7,7, 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo não houve efeito de doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado sobre a altura das árvores (Tabela 13)

Aos 9 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto e de adubo fosfatado causaram efeito linear e sobre a altura das árvores (Tabela 13 e Figura 27).

Figura 29. Curvas de crescimento de altura das árvores de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto (L), A= 0; B = 7,7; C = 15,4 e D = 23,1 t ha⁻¹, ajustadas mediante a função de Boltzmann.

Aos 12 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto mostraram efeito linear e quadrático sobre a altura das árvores, independentemente das doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado. No tratamento que recebeu dose 7,7 t ha⁻¹ de lodo, as doses de adubo nitrogenado causaram efeito quadrático sobre a altura das árvores. Para os tratamentos sem lodo e com 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo não houve efeito de doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado sobre a altura das árvores (Tabela 13)

Aos 18 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto mostraram efeito linear e quadrático sobre a altura das plantas, independentemente das doses de adubo nitrogenado e fosfatado. No tratamento que recebeu 7,7 t ha⁻¹ de lodo, ocorreu interação entre as doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado sobre

a altura das árvores. Nos tratamentos sem lodo e com 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo não houve efeito de doses de adubo nitrogenado e adubo fosfatado sobre a altura das árvores (Tabela 13).

Aos 24 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto causaram aumentos, de forma linear, na altura das árvores independentemente das doses de adubo nitrogenado e adubo fosfatado (Tabela 11).

Tanto aos 33 como aos 44 meses após o plantio, a altura das árvores foram influenciadas pelo fator lodo de esgoto com aumentos de forma linear. (Tabela 11)

O diâmetro das árvores de eucalipto, aos 9 meses após o plantio, foram influenciadas pelas doses de lodo de esgoto e de adubo fosfatado de forma linear e quadrática, enquanto que as doses de adubo nitrogenado não mostraram efeito significativo sobre esta variável (Tabela 12).

Aos 12, 18 e 24 e 44 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto mostraram efeito linear e quadrático sobre o diâmetro das árvores, independentemente das doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado (Tabela 14). Aos 33 meses após plantio as doses de lodo de esgoto não apresentaram significância sobre o diâmetro das plantas de eucalipto.

Tabela 11. Altura das árvores de eucalipto em função das doses de lodo de esgoto (L), de adubo nitrogenado (N) e de adubo fosfatado (P) sobre a altura das árvores de eucalipto

Meses	Equação	R ²
	Y = Altura (m)	
6	$Y = 1,6274 + 0,08657 * L + 0,00706 * P - 0,00226 * L^2$	0,78
9	$Y = 2,7147 + 0,0993 * L + 0,00647 * P - 0,00263 * L^2 - 0,000045 * P^2$	0,81*
12	$Y = 4,8282 + 0,11541 * L - 0,00312 * L^2$	0,80*
18	$Y = 9,3998 * L - 0,00314 * L^2$	0,61*
24	$Y = 11,76057 + 0,07569 * L$	0,19*
33	$Y = 17,724 - 0,2020L + 0,0048L^2$	0,61
44	$Y = 18,27 + 0,121L - 0,004L^2$	0,77

* P < 0,0001 valores utilizados com significância até 10% , Equação geral superfície de resposta

Tabela 12. Comportamento das doses de lodo de esgoto (L) sobre o diâmetro das árvores de eucalipto

Meses	Equação	R ²
	Y = Diâmetro (cm)	
9	$Y = 1,66227 * 0,09955 * L + 0,00555 * P - 0,00271 * L^2$	0,78*
12	$Y = 3,8564 + 0,12138 * L - 0,00305 * L^2$	0,75*
18	$Y = 6,46531 + 0,10064 * L - 0,00244 * L^2$	0,68*
24	$Y = 7,73118 + 0,08176 * L - 0,00209 * L^2$	0,48*
44	$Y = 11,77 + 0,075 * L + 0,009 * P - 0,002 * L^2 - 0,00009 * P^2$	0,29*

* P < 0,0001 = valores utilizados com significância até 10%. Equação geral superfície de resposta

O volume de madeira das árvores de eucalipto, aos 9 meses após o plantio, foram influenciadas pelas doses de lodo de esgoto e de adubo fosfatado de forma linear e quadrática (Tabela 13). Aos 12 e 18 meses após o plantio, as doses de lodo de esgoto mostraram efeito linear e quadrático sobre o volume de madeira, independentemente das doses de adubo nitrogenado e de adubo fosfatado (Tabela 13).

Tabela 13. Comportamento das doses de lodo de esgoto (L) e de adubo fosfatado (P) sobre o volume de madeira das árvores de eucalipto.

Meses	Equação	R ²
	Y = Volume (m ³ ha ⁻¹)	
9	Y = 0,2869+0,0714*L+0,00453*P-0,001832*L ² - 0,00004*P ²	0,79*
12	Y = 3,1082+0,3441*L-0,00861*L ²	0,78*
18	Y = 19,14639+1,01282*L-0,02478*L ²	0,67*

* P < 0,0001 = valores utilizados com significância até 5%

Aos 6 e 9 meses após o plantio, somente a aplicação de lodo de esgoto não foi suficiente para disponibilizar o fósforo mineral para as árvores de eucalipto, sendo necessária a aplicação do adubo fosfatado para seu crescimento em diâmetro e altura.

Segundo Guedes, (2000) e Vaz; Gonçalves (2002), a ausência da disponibilidade de fósforo mineral pelo lodo até um ano de aplicação fez com que as árvores do tratamento que receberam adubo fosfatado se desenvolvessem melhor após o plantio com maiores taxas de crescimento em diâmetro e altura.

Aos 6 e 9 meses, provavelmente, a decomposição dos restos culturais (cascas, galhos e folhas) deixados nas entrelinhas da área experimental pode ter favorecido a liberação do nitrogênio mineral para o sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis*. Aos 12 e 18 meses após o plantio, as doses de adubo nitrogenado contribuíram para o crescimento vegetativo na dose 7,7 t ha⁻¹ de lodo.

Até aos 44 meses após o plantio o lodo de esgoto promoveu o crescimento das árvores de eucalipto, isso pode indicar a contínua liberação dos nutrientes contidos na composição química do lodo devido a sua baixa taxa de degradação. Este fato concorda com Guedes (2005) que observou que o volume de material lenhoso produzido, no tratamento com 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto úmido tratado com cal e complementado com potássio, foi 57% superior à testemunha e 12% superior ao tratamento com adubo mineral, aos 84 meses de idade.

9.2. Volume de madeira

Para todas as datas avaliadas (9, 12, 18 24, 33 e 44 meses após o plantio), o fator doses de lodo de esgoto propiciou maior alteração no volume de madeira (troncos)

Aos 9 meses, com o análise de superfície de resposta foi possível estimar o ponto de máximo sendo este de $1,37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para doses de $22,7 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo complementada com doses de $113,9 \text{ t ha}^{-1}$ de N na forma de uréia, e $82 \text{ t ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$. Todavia analisando-se os fatores lodo de esgoto e fósforo, fixando um destes fatores, foi observado que para todas as doses de lodo de esgoto, fixando-se os níveis de P, o volumem de madeira foi significativo. Entanto que para as doses de P, fixando-se os níveis de lodo de esgoto, somente as doses $15,4$ e $23,1 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto causaram aumentos significativos.

Figura 30. Volume de madeira (tronco), $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, de árvores de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto (L), A= 0; B = 7,7; C = 15,4 e D = 23,1 t há, ajustadas utilizando-se o modelo Boltzmann.

Tabela 14. Dados médios de volume de madeira, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto aos 9 meses após o plantio, em função das doses de lodo de esgoto (L), t ha^{-1} , e de adubo mineral fosfatado (P), kg ha^{-1} de P_2O_5 .

Lodo (t ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5 , kg ha^{-1})				Regressão Linear
	0	28	55,9	84	
	----- $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ -----				
0	0,29 ¹ (0,26)	0,41 (0,39)	0,41 (0,45)	0,42 (0,45)	ns
7,7	0,79 (0,77)	0,91 (0,90)	0,92 (0,96)	0,96 (0,96)	ns
15,4	1,03 (1,02)	1,13 (1,15)	1,26 (1,21)	1,15 (1,21)	*
23,1	1,02 (1,09)	1,23 (1,21)	1,27 (1,28)	1,35 (1,27)	*
Efeito de Linear	***	***	***	***	
regressão Quadrático de L.	***	***	***	**	

¹Valor estimado com base na equação de superfície de resposta $V9 = 0,2636 + 0,0779L - 0,001832L^2 + 0,005699P - 0,00004148P^2$. ns = $p > 0,10$; * = $p \leq 0,10$; ** = $p \leq 0,05$; *** = $p < 0,01$.

Considerando o V9 de $0,41 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, obtido no tratamento com aplicação convencional de adubos minerais: 142 kg ha^{-1} de N, na forma de uréia, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo, e 188 kg ha^{-1} de K_2O , como sendo o volume de madeira relativo de 100%, pode-se estimar que os V9 máximos foram de 263% a 324%, com variações nas doses de lodo de 15,4 a $22,5 \text{ t ha}^{-1}$, de N de 69,9 a 142 kg ha^{-1} , e de 0 a $55,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 . Pôde-se constatar que a situação de melhor relação custo/benefício foi aquela obtida com a dose recomendada de lodo ($15,4 \text{ t ha}^{-1}$), com base no critério do nitrogênio, complementada com $55,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 e $69,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N na forma de uréia (tabela16).

Tabela 15. Resultados médios de volume de madeira, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto aos 9 meses após o plantio (V9), em função das doses de lodo de esgoto (L), t ha^{-1} , e de adubo mineral nitrogenado (N), kg ha^{-1} , na forma de uréia.

Lodo (t ha^{-1})	Nitrogênio (kg ha^{-1})				Efeito de regressão de N	
	0	46,9	95,1	142	Linear	Quadrático
	----- $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ -----					
0	0,40	0,39	0,38	0,37	ns	Ns
7,7	0,78	0,93	0,97	0,90	*	*
15,4	1,07	1,20	1,17	1,12	*	Ns
23,1	1,16	1,13	1,33	1,25	ns	Ns
Efeito de	Linear	***	***	***		
regressão do	Quadrático	**	***	***		
Lodo	o					

ns = $p > 0,10$; * = $p \leq 0,10$; ** = $p \leq 0,05$; *** = $p < 0,01$.

Tabela 16. Variação do volume de madeira relativo (V9R), em %, em função dos dados estimados de máximo volume de madeira ($V9_{\text{max}}$), $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto, aos 9 meses após o plantio, em função das doses de lodo (L), em t ha^{-1} , de adubo mineral nitrogenado (N), em kg ha^{-1} , aplicado na forma de uréia, e de adubo mineral fosfatado (P), em kg ha^{-1} de P_2O_5 .

V9R	⁽¹⁾ $V9_{\text{max}}$		⁽²⁾ Doses de	
	ax	Lodo	N	P_2O_5
--%---	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	t ha^{-1}	----- kg ha^{-1} -----	
68	0,28	0	0	0
100	0,41	0	142	84
321	1,32	22,5	142	66,9
263	1,08	19,0	83,1	0
324	1,33	20,8	102,5	55,9
309	1,27	15,4	69,9	55,6

⁽¹⁾Os dados dos tratamentos sem aplicação de lodo, testemunha absoluta e testemunha com adubo mineral, referem-se às médias originais dos tratamentos e os demais dados foram estimados na análise de estudo de interação entre L*N, L*P, N*P, fixando-se os níveis de um dos fatores, respectivamente.

Os dados de volume de madeira aos 12 meses após o plantio (V12), para plantas de eucalipto, variaram, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de 2,89 a 4,22; de 5,29 a 7,10; de 5,68 a 7,91 e de 6,42 a 8,70 para as doses de lodo (L) de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado (N) de 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , na forma de uréia, os dados de V12, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 2,91 a 8,35; de 2,89 a 7,77; de 3,19 a 8,70 e de 3,13 a 8,06; respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado (P) de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato triplo, os resultados de V12, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 2,89 a 7,91; de 2,94 a 7,93; de 3,36 a 8,70 e de 2,99 a 8,35; respectivamente.

O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $V12 = 3,359 + 0,3625L - 0,00861L^2 + 0,0029N$; $R^2 = 0,89$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0001$) e de segunda ordem ($p < 0,0001$), e para as doses de N, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0431$).

Todavia analisando-se os fatores doses de L e N, dois a dois, fixando-se o nível de um dos fatores (Tabelas 17), obtiveram-se os seguintes resultados: a) para o efeito de doses de lodo dentro de doses de N, observou-se que o aumento do V12 causado pelo lodo ocorreu para todas as doses de N; e b) para o efeito de N dentro dos níveis de lodo, observou-se que o aumento de V12 causado por doses de N ocorreu, somente, para a dose de 7,7 t ha^{-1} de lodo. A análise do desdobramento forneceu, também, as estimativas dos pontos de máximas de V12, em função das doses de lodo, de N e de P (Tabela 18), cujos valores variaram de 6,60 a 7,97 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. Considerando o V12, de 3,89 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, obtido no tratamento com aplicação convencional de adubos minerais: 142 kg ha^{-1} de N, na forma de uréia; 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo e 188 kg ha^{-1} de K_2O , como volume de madeira relativo de 100%, pode-se estimar que os V12 máximos foram de 170% a 204%, com variações nas doses de lodo de 7,7 a 19,7 t ha^{-1} ; de N de 46,9 a 109,5 kg ha^{-1} ; e de 28 a 73,8 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Desta forma, pode-se constatar que a situação de melhor relação custo/benefício foi obtida com a dose 19,3 t ha^{-1} de lodo, complementada com 48,6 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 46,9 kg ha^{-1} de N na forma de uréia (Tabela 18).

Tabela 17. Resultados médios e estimados de volume de madeira (V12), $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto, aos 12 meses após o plantio, em função das doses de lodo de esgoto (L), t ha^{-1} , e de adubo mineral nitrogenado (N), kg ha^{-1} , na forma de uréia.

Lodo (t ha^{-1})	Nitrogênio (kg ha^{-1})				Efeito de regressão de N	
	0	46,9	95,1	142	Linear	Quadrático
	----- $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ -----					
0	3,48 (3,36)	3,50 (3,50)	3,45 (3,63)	3,52 (3,77)	ns	ns
7,7	5,63 (5,71)	6,14 (5,84)	6,67 (5,98)	5,88 (6,12)	**	**
15,4	6,34 (6,86)	6,84 (7,00)	7,04 (7,13)	7,27 (7,27)	ns	ns
23,1	7,31 (7,14)	7,14 (7,28)	7,73 (7,42)	7,51 (7,55)	ns	ns
Efeito de regressão de L	Linear	***	***	***	***	
	Quadrático	**	***	***	***	

¹Valor estimado com base na equação de superfície de resposta $V12 = 3,359 + 0,3625L - 0,00861L^2 + 0,0029N$ ns = $p > 0,10$; * = $p \leq 0,10$; ** = $p \leq 0,05$; *** = $p < 0,01$

Tabela 18. Variação do volume de madeira relativo (V12R), em %, em função dos dados estimados de máximo volume de madeira ($V12_{\text{max}}$), $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto, aos 12 meses após o plantio, em função das doses de lodo (L), em t ha^{-1} , de adubo mineral nitrogenado (N), em kg ha^{-1} , aplicado na forma de uréia, e de adubo mineral fosfatado (P), em kg ha^{-1} de P_2O_5 .

V12R	⁽¹⁾ V12		⁽²⁾ Doses de		
	max	Lodo	N	P_2O_5	
-%-	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	----- t ha^{-1} -----	----- kg ha^{-1} -----		
75	2,91	0	0	0	
100	3,89	0	142	84	
170	6,60	7,7	81,2	50,4	
198	7,72	19,2	109,5	28	
194	7,57	19,3	46,9	48,6	
204	7,97	19,7	95,1	73,8	

⁽¹⁾Os dados dos tratamentos sem aplicação de lodo, testemunha absoluta e testemunha com adubo mineral, referem-se às médias originais dos tratamentos e os demais dados foram estimados na análise de estudo de interação entre L*N, L*P, N*P, fixando-se os níveis de um dos fatores, respectivamente.

⁽²⁾Todos os tratamentos receberam a aplicação de 188 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio, conforme recomendação convencional da Suzano.

Os resultados de volume de madeira aos 18 meses após o plantio (V18) (Anexo 3), para plantas de eucalipto, variaram, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de 15,9 a 23,2; de 24,9 a 32,8; de 27,1 a 32,5 e de 27,9 a 34,6 para as doses de lodo (L) de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado (N) de 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , na forma de uréia, os dados de V18, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 17,9 a 31,9; de 15,9 a 32,5; de 20,5 a 34,6 e de 20,5 a 32,8; respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado (P) de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato triplo, os resultados de V18, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 15,9 a 31,9; de 19,8 a 32,5; de 21,0 a 34,6 e de 19,8 a 32,5; respectivamente. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $V18 = 20,2097 + 0,9658L - 0,02478L^2 + 0,01448N$; $R^2 = 0,83$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0001$) e de segunda ordem ($p < 0,0001$), e para as doses de N, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0024$).

Todavia analisando-se os fatores doses de L e N, dois a dois, fixando-se o nível de um dos fatores (Tabelas 19), obtiveram-se os seguintes resultados: a) para o efeito de doses de lodo dentro de doses de N, observou-se que o aumento do V18 causado pelo lodo ocorreu para todas as doses de N; e b) para o efeito de N dentro dos níveis de lodo, observou-se que não houve efeito de N sobre o V18 em nenhum dos níveis de lodo. A análise do desdobramento forneceu, também, as estimativas dos pontos de máximas de V18, em função das doses de lodo, de N e de P (Tabela 20), cujos valores variaram de 31,1 a 32,8 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. Considerando o V18, de 23,2 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, obtido no tratamento com aplicação convencional de adubos minerais: 142 kg ha^{-1} de N, na forma de uréia; 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo e 188 kg ha^{-1} de K_2O , como volume de madeira relativo de 100%, pode-se estimar que os V18 máximos foram de 134% a 139%, com variações nas doses de lodo de 18,3 a 19,1 t ha^{-1} ; de N de 46,9 a 142 kg ha^{-1} ; e de 51,2 a 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Desta forma, pode-se constatar que a situação de melhor relação custo/benefício foi obtida com a dose 19,1 t ha^{-1} de lodo, complementada com 55,5 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 95,1 kg ha^{-1} de N na forma de uréia (Tabela 20).

Tabela 19. Resultados médios e estimados de volume de madeira (V18), $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto, aos 18 meses após o plantio, em função das doses de lodo de esgoto (L), t ha^{-1} , e de adubo mineral nitrogenado (N), kg ha^{-1} , na forma de uréia.

Lodo (t ha^{-1})	Nitrogênio (kg ha^{-1})				Efeito de regressão de N	
	0	46,9	95,1	142	Linear	Quadrático
	----- $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ -----					
0	20,8 ¹ (20,2)	19,7 (20,9)	21,6 (21,6)	21,8 (22,3)	ns	ns
7,7	26,2 (26,4)	27,2 (27,0)	29,4 (27,7)	29,1 (22,3)	ns	ns
15,4	27,9 (29,1)	29,9 (29,8)	30,0 (30,5)	30,1 (31,2)	ns	ns
23,1	30,1 (29,3)	29,7 (30,0)	31,5 (30,7)	31,0 (31,4)	ns	ns
Efeito de regressão de L	Linear	***	***	***	***	
	Quadrático	*	***	***	***	

¹Valor estimado com base na equação de superfície de resposta :

$V18 = 20,2097 + 0,9658L - 0,02478L^2 + 0,01448N$ ns = $p > 0,10$; * = $p \leq 0,10$; ** = $p \leq 0,05$; *** = $p < 0,01$

Tabela 20. Variação do volume de madeira relativo (V18R), em %, em função dos dados estimados de máximo volume de madeira ($V18_{\text{max}}$), $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de plantas de eucalipto, aos 18 meses após o plantio, em função das doses de lodo (L), em t ha^{-1} , de adubo mineral nitrogenado (N), em kg ha^{-1} , aplicado na forma de uréia, e de adubo mineral fosfatado (P), em kg ha^{-1} de P_2O_5 .

V18R	⁽¹⁾ V18		⁽²⁾ Doses de	
	max	Lodo	N	P_2O_5
-%--	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	t ha^{-1}	----- kg ha^{-1} -----	
77	17,9	0	0	0
100	23,2	0	142	84
135	31,3	18,8	46,9	80,7
139	32,3	19,1	95,1	55,5
137	31,8	18,3	142	51,2
134	31,1	19,1	123,7	84

⁽¹⁾Os dados dos tratamentos sem aplicação de lodo, testemunha absoluta e testemunha com adubo mineral, referem-se às médias originais dos tratamentos e os demais dados foram estimados na análise de estudo de interação entre L*N, L*P, N*P, fixando-se os níveis de um dos fatores, respectivamente.

⁽²⁾Todos os tratamentos receberam a aplicação de 188 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio, conforme recomendação convencional da Suzano.

Os dados de volume de madeira aos 24 meses após o plantio (V24) (Anexo 4), para plantas de eucalipto, variaram, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de 39,8 a 54,0; de 35,0 a 54,2; de 38,1 a 52,8 e de 41,1 a 59,8 para as doses de lodo (L) de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado (N) de 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , na forma de uréia, os dados de V24, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 39,8 a 59,7; de 40,2 a 59,8; de 41,2 a 52,8 e de 43,0 a 56,5; respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado (P) de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato triplo, os resultados de V24, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 38,1 a 56,5; de 36,6 a 53,4; de 35,0 a 59,8 e de 38,3 a 59,7; respectivamente.

As doses de N e P não alteraram os valores de V24. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $V24 = 44,07 + 0,00802L^2$; $R^2 = 0,10$ e $p < 0,0152$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de segunda ordem ($p < 0,0152$).

A análise do desdobramento forneceu, somente, a estimativa do ponto de máximo do V24 ($48,9 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$), em função da dose recomendada de lodo ($15,4 \text{ t ha}^{-1}$), com base no critério do nitrogênio, complementada com a dose de $114,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N e $79,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de P.

Os dados de volume de madeira aos 44 meses após o plantio (V44), para plantas de eucalipto, variaram, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, de 134,9 a 160,7; de 147,4 a 198,0; de 158,6 a 192,2 e de 157,3 a 194,9 para as doses de lodo (L) de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha^{-1} , respectivamente. Para as doses de adubo mineral nitrogenado (N) de 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} , na forma de uréia, os dados de V44, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 143,7 a 198,0; de 134,9 a 186,0; de 147,6 a 194,9 e de 142,4 a 192,2; respectivamente. Com relação às doses de adubo mineral fosfatado (P) de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato triplo, os resultados de V44, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variaram de 134,9 a 182,4; de 149,8 a 198,0; de 140,8 a 190,4 e de 146,9 a 194,9; respectivamente.

As doses de N não alteraram os valores de V44. O modelo de superfície de resposta que melhor se ajustou aos dados foi: $V44 = 143,6 + 3,21L - 0,0981L^2 + 0,386P - 0,0036P^2$; $R^2 = 0,58$ e $p < 0,0001$. Para as doses de lodo, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0001$) e de segunda ordem ($p < 0,0001$), e para as doses de P, houve efeito dos parâmetros de primeira ordem ($p < 0,0207$) e de segunda ordem ($p < 0,0598$).

Analisando-se os fatores dose de L e P, dois a dois, fixando-se o nível de um dos fatores (Tabelas 21), obtiveram-se os seguintes resultados: a) para o efeito de doses de lodo dentro de doses de P, observou-se que o aumento do V44 causado pelo lodo ocorreu para todas as doses de P; e b) para o efeito de P dentro dos níveis de lodo, observou-se que houve efeito de L sobre o V44 somente para o nível 7,7 t ha⁻¹ de lodo.

Tabela 21. Resultados médios e estimados de volume de madeira (V44), m³ ha⁻¹, de plantas de eucalipto, aos 44 meses após o plantio, em função das doses de lodo de esgoto (L), t ha⁻¹, e de adubo mineral fosfatado (P), kg ha⁻¹, na forma de P₂O₅.

Lodo (t ha ⁻¹)	Fósforo (kg ha ⁻¹ , de P ₂ O ₅)				Efeito de regressão de P	
	0	46,9	95,1	142	Linear	Quadrático
	----- m ³ ha ⁻¹ -----					
0	142	152	154	150		
	¹ (144)	(152)	(154)	(151)	ns	Ns
7,7	161	177	178	167		
	(163)	(171)	(173)	(170)	*	*
15,4	169	172	179	178		
	(170)	(178)	(180)	(177)	ns	Ns
23,1	170	170	176	174		
	(166)	(174)	(174)	(173)	ns	Ns
Efeito de regressão de L.	Linear	**	**	**	*	
	Quadrático	*	**	**	ns	

¹Valor estimado com base na equação de superfície de resposta $V44 = 143,6 + 3,21L - 0,0981L^2 + 0,386P - 0,0036P^2$
ns = p > 0,10; * = p ≤ 0,10; ** = p ≤ 0,05; *** = p < 0,01

10. DEPOSIÇÃO DE SERAPILHEIRA

Os resultados médios de deposição de serapilheira para as doses 0, 7,7 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, aos 35, 39, 40 e 46 meses após o plantio foram de 120; 128,4; 126,6 e 130,5 kg ha⁻¹ aos 35 meses, de 141; 143,63; 158,5 e 143,2 kg ha⁻¹ aos 39 meses; de 146,3; 148,1; 153,6 e 158,6 kg ha⁻¹ aos 40 meses, e de 151,4; 148,2; 155,5 e 152,1 kg ha⁻¹ aos 46 meses após plantio, para as doses. Como pode observar-se a maior produção de serapilheira encontra-se na dose 15,4 t ha⁻¹ (Figura 31). De maneira geral as maiores deposições predominaram entre março e maio de 2008, onde foram observadas temperaturas elevadas e leve precipitação pluvial o que, certamente, ocasionaram estresse hídrico nas árvores de eucalipto, respondendo com a diminuição da sua superfície de transpiração.

Figura 31. Deposição de serapilheira em função das doses de lodo de esgoto e do tempo.

10.1. Acúmulo de macronutrientes P, K, Ca e Mg.

Houve efeito do lodo de esgoto para os macronutrientes acumulados aos 46 meses após plantio. Os teores médios acumulados de macronutrientes na serapilheira, aos 46 meses, estão representados na tabela 22. Considerando a produção de serapilheira produzida por hectare temos que foi retornado ao solo entre 7,42; 7,88; 8,086 e 8,22 kg ha⁻¹ de P, 14,08; 14,82; 15,55 e 15,21 kg ha⁻¹ de K, 116,60; 122,99; 127,51 e 127,79 kg ha⁻¹ de Ca e 27,26; 28,16; 29,54 e 28,90 kg ha⁻¹ de Mg.

O retorno total estimado de P, K, Ca e Mg foi de 166,08, 173,85, 180,69 e 180,12 kg ha⁻¹ para as doses 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto respectivamente, sem considerar o N.

Tabela 22. Deposição de serapilheira e concentração média de P, K, Ca e Mg aos 46 meses após plantio de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto.

Lodo t ha ⁻¹	Deposição de Serapilheira (kg ha ⁻¹)				Macronutrientes (g kg ⁻¹)			
	35	39	40	46	P	K	Ca	Mg
	----- meses -----				----- 46 meses -----			
0	120,00	141,00	146,25	151,43	0,049	0,093	0,77	0,18
7,7	128,44	143,63	148,06	148,19	0,053	0,10	0,83	0,19
15,4	126,63	158,44	153,56	155,5	0,052	0,10	0,82	0,19
23,1	130,35	143,19	158,63	152,13	0,054	0,10	0,84	0,19

Nota-se que o nutriente que retorna ao solo em maior concentração foi o Ca. Segundo Vitousek (1984), o retorno de Ca é elevado na maioria de florestas tropicais. A avaliação dos macronutrientes na serapilheira no presente estudo foi realizada no mês de setembro, data que foi caracterizada por precipitações moderadas que possivelmente elevaram os valores de transferência do Ca. Isto corrobora, em parte, as afirmações de Vital et al. (2004), em que os teores de Ca geralmente são maiores na estação seca do ano. Porém esse autor refere-se a floresta estacional semidecidual. Clevelário Jr (1996) sugere que a elevação no teor de Ca na serapilheira pode ser decorrente de uma liberação lenta desse elemento pelo material vegetal recém- caído, da retranslocação de outros elementos antes da abscisão das folhas, da redução da massa das folhas antes da abscisão e ou

consequência da retenção de Ca contido na transprecipitação pela serapilheira. Por outro lado, Schumacher; Pogianni, (1993) referem que o eucalipto é a espécie que apresenta a maior eficiência nutricional para o elemento cálcio.

Dentro do conjunto de macronutrientes estudados o P é o macronutriente que se apresentou como mais limitante, no entanto é conhecido que o eucalipto apresenta eficiência tanto para fósforo, Ca e Mg o que evidencia a adaptação dessa espécie em solos de baixa fertilidade. O retorno desses nutrientes a través da serapilheira segue a seguinte ordem $Ca > Mg > K > P$.

10.2. Concentração de micronutrientes

O acúmulo de micronutrientes na serapilheira foi significativo para o tratamento com doses de lodo de esgoto, sendo que o fertilizante nitrogenado e fosfatado não apresentou significância. O Fe foi o micronutriente que apresentou valores mais elevados seguido de Mn, Zn e Cu (Figura 31) Os dados médios dos teores de Cu, Fe, Mn e Zn acumulado na serapilheira, aos 46 meses após o plantio estão apresentados na tabela 23

Tabela 23. Concentração de micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn, aos 46 meses após plantio de eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto.

Doses de lodo de esgoto	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----			
0	1,01	89,00	57,32	1,74
7,7	1,11	100,31	63,03	1,90
15,4	1,09	97,84	61,78	1,86
23,1	1,13	102,93	64,34	1,93
R²	0,82	0,78	0,60	0,80

10.3. Decomposição de folheto

10.3.1. Percentual remanescente (%)

Os resultados médios do percentual remanescente da decomposição do folheto no campo foram aos 45 dias de: 82,2; 80,8; 80,2; 81,4 %, aos 90 dias de:

79,9; 78,8; 78,3 e 79,3, para 160 dias de: 70,6; 65,7; 67,1 e 64,8 %; aos 230 dias de 65,1; 66,5; 63,5 e 62,5 %. Entanto que aos 300 dias foi de 57,01; 56,95; 57,42 e 55,48 %, para a dose 0; 7,7; 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto respectivamente. Não foi encontrado diferencas significativas entre tratamentos sobre a quantidade de folhodo remanescente em todos os períodos avaliados.

Figura 32. Folhodo remanescente de *E. grandis* no período de 45, 90, 160, 230 e 300 dias em função das doses de lodo de esgoto,. A=0 t ha⁻¹; B= 7,7 t ha⁻¹; C= 15,4 t ha⁻¹; D= 23,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto.

As Figuras 2 e 32 indicam a influencia da precipitação pluvial sobre a variável percentual remanescente evidenciando-se maior perda de massa nos períodos de maior concentração de chuvas. O percentual remanescente aos 45 dias foi maior aos relatados por Hepp et al. (2009), em experimento de decomposição de folhas de eucalipto aos 60 dias que observaram massa remanescente de 75%.

No final do período de avaliação, 300 dias, a perda de massa esteve entre 47% para os tratamentos 15,4 e 23,1 t ha⁻¹ e 45% para os tratamentos 0 e 7,7 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. A relação entre a perda de massa e a precipitação foi relatada

por Costa et al, (2005). Porém, a percentual de perda de massa do folheto remanescente do presente trabalho esteve acima dos encontrados por esse autor, ainda assim, estes valores corroboram as afirmações de que as florestas de eucalipto apresentam taxas de decomposição baixa, normalmente inferior a 50% durante o ano sobre diferentes sistemas de manejo e condições edafoclimáticas (GAMA-RODRIGUES; BARROS, 2002). Estudos de decomposição com folhas de *Eucalyptus* spp. demonstram que esta planta possui uma taxa de decomposição lenta, o que poderia estar ocasionada pelos compostos químicos constituintes da folha (GRAÇA et al. 2002).

10.3.2.Taxa de decomposição (k)

Na figura 33, está representado o coeficiente de decomposição, em valores de k por dia, cujos resultados expressam a taxa de decomposição do folheto no campo, aos 45, 90, 160, 230 e 300 dias. Observa-se ao longo do tempo uma taxa de decomposição gradativa, sendo esta mais lenta ao longo do tempo. Aos 45 dias os valores de k estiveram entre 0,004506 a 0,004932; aos 90 dias, entre 0,003743 a 0,004002; aos 160 dias, 0,002299 a 0,002727; aos 230 dias, 0,001947 a 0,001993 e aos 300 dias, 0,0019 a 0,002026 g g⁻¹ dia.

Não foram observadas diferenças significativas entre as doses de lodo de esgoto utilizadas.

Segundo Torres et al. (2005) o processo de decomposição da serapilheira é caracterizado por uma taxa de decomposição alta e um padrão invertido em termos de velocidade em cada fase do processo. Ambas as características são dependentes do clima local e a composição química da serapilheira.

Verifica-se que decorridos 300 dias, para todas as formações, a decomposição da serapilheira não ultrapassou os 50% da quantidade inicialmente condicionada nos bolsas de decomposição. Supõe-se que, nessas formações, a decomposição seja mais lenta, sobretudo em razão da qualidade química do material, como estruturas mais resistentes e compostos mais estáveis e de difícil decomposição como lignina e outros compostos fenólicos (SWIFT et al., 1979).

Para Guedes (2005), o menor período de avaliação pode ser um dos fatores que explicariam o maior valor de k. Quanto menor o período de avaliação, apenas uma fração mais facilmente decomponível será degradada e não serão atingidos grupos mais recalcitrantes, o que levará a maior valor da constante.

Figura 33. Taxa de decomposição (k) das folhas de eucalipto, dias após à instalação das bolsas de decomposição (litter bag) na área experimental, em função das doses de lodo de esgoto.

10.3.3. Meia-vida

O tempo de meia vida de 45, 90, 160, 230 e 300 dias após instalação das bolsas de decomposição é amostrado na tabela 15, como se pôde observar os maiores tempos para que 50% do folheto seja decomposto, estiveram na dose 0

Tabela 18. Tempo de meia vida das folhas de eucalipto em função das doses de lodo de esgoto.

Dias de avaliação	Doses de lodo de esgoto (t ha ⁻¹)			
	0	7,7	15,4	23,1
	-----tempo (dias) -----			
45	155,74	146,05	144,42	191,17
90	189,12	187,87	179,36	175,15
160	364,97	278,45	267,37	271,01
230	395,85	378,45	362,79	342,09
300	435,45	383,98	377,43	397,92

11. CONCLUSÕES

A aplicação do lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos, com base no critério do nitrogênio, promove melhorias nos atributos de fertilidade do solo, no crescimento e nutrição mineral das plantas de eucalipto, sem causar impactos negativos ao ambiente florestal, considerando período de até 46 meses após a aplicação do resíduo.

A aplicação do lodo de esgoto, com base no critério do nitrogênio, promove aumentos nos teores de C-orgânico, N-total, N-amoniaco e de P, K, Ca e Mg trocáveis, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, e dos teores de Cu, Fe, Mn e Zn, extraíveis e semitotais, nas camadas até 40 cm de profundidade.

A aplicação do lodo de esgoto, com base no critério do nitrogênio, promove teores adequados de N e P nas folhas recém-maduras do eucalipto e equivalentes aos propiciados pelos fertilizantes nitrogenado e fosfatado, respectivamente. O lodo também promove teores adequados de Cu, Mn, Fe e Zn nas folhas de eucalipto, cujos valores se correlacionam com teores desses metais extraídos do solo com DTPA.

O estudo de superfície de resposta, permitiu constatar que a aplicação de lodo, com base na dose recomendada pelo critério do N, pode propiciar a redução de 33% no uso do adubo fosfatado e 100% do adubo nitrogenado, com aumento da produtividade de madeira.

12. REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 391-470, 2005.
- ABREU JUNIOR, C. H.; SILVA, C. R.; GOMES, T. F.; BOARETTO, A. E.; GINÉ, M. F.; MURAOKA, T.; FERNANDES, H. M. G. Análise química de elementos potencialmente tóxicos por espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 2009. cap. 8, p. 481-531.
- AMBIENTE BRASIL. **Silvicultura do eucalipto (*Eucalyptus* spp)**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./florestal/index.html&contedo=./florestal/eucalipto.html>. Acesso em: 28 ago. 2009.
- ANDRADE, C. A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Eucalyptus grandis* após a aplicação de biossólido da ETE de Barueri**. 1999. 65 p Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- ANDRADE, C. A.; MATIAZZO, M. E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 59-72, 2000.
- ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. Avaliação do comportamento vertical de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal e pH em leiras de lodo de esgoto caledo. **SANARE - Revista Técnica da SANEPAR**, Curitiba, v. 18, p. 63-70, 2002.
- ASSIS, R. N. T.; OMIR, M. M.; ALMEIDA, M. F. Algodoeiro cultivado em solo tratado com calcário, lodo de esgoto e cádmio. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, Valdivia, v. 7, n. 1, p. 74-87, 2007.
- AXELSSON, G.; BERG, B. Fixation of ammonia (^{15}N) to Scots pine needle litter in different stages of decomposition. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v. 3, p. 273–280, 1988.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho eutrófico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 403-407, 2004.
- BARCELAR, C. A.; ROCHA, A. A. Efeito residual do lodo de esgoto alcalinizado em atributos químicos e granulométricos de um Cambissolo húmico. **Scientia Agrária**, La Roja, v. 2, n. 1-2, p. 87-91, 2001.
- BERTON, R. S.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 187-192, 1989.

BERTON, R. S.; PRATT, P. F.; FRAKENBERGER JUNIOR, W. T. Phosphorous availability in soil amended with organic materials estimated by three chemical methods and two enzyme activities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 617-624, 1997.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T. “Resíduo orgânico” como fertilizante para a cultura do milho (*Zea mays* L.) híbrido HMDO 7974. **Fertilizantes**, São Paulo, v. 4, p. 9-11, 1982a.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T. Utilização do “resíduo orgânico” primário e fertilizantes organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, São Paulo, v. 4, p. 14-15, 1982b.

BETTIOL, W.; FERNANDES, S. A. P. **Efeito do lodo de esgoto na comunidade microbiana e atributos químicos do solo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 6 p. (Comunicado Técnico, 24).

BEZERRA, F. B.; OLIVEIRA, M. A. C. L. de, PEREZ, D. V.; ANDRADE, A. G. de; MENEGUELLI, N. do A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 469-476, 2006.

BIONDINI, M. Carbon and nitrogen losses through root exudation by *Agropyron cristatum*, *A. Smithii* and *Bouteloua gracilis*. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, p. 477–482, 1988.

BOARETTO, A. E. **Uso de lodo de esgoto como fertilizante**. Botucatu: FINEP, 1986. 185 p.

BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um Latossolo após três aplicações de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 581-590, 2007.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. B. Mineralização de compostos nitrogenados após aplicações de lodos de esgoto em quatro cultivos de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 207-218, 2009.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1639-1647, 2002.

BOHNEN, H. Acidez do solo: Origem e correção. In: KAMINSKI, J. (Coord.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2000. p. 9-20. (Boletim Técnico, 4).

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. I. Fracionamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 543-555, 2004a.

_____. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. II. Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 557-568, 2004b.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Relatório Estatístico 2007/2008**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br>> Acesso em: 10 ago. 2008.

BREMNER, J. M.; KEENEY, D. R. Steam-distillation methods for determination ammonium, nitrate and nitrite. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 2**. Madison: ASA, 1965. p. 1191-1206. (Agronomy, 9).

BRITO, L. F. Erosão hídrica de Latossolo Vermelho distrófico típico em áreas de pós-plantio de eucalipto na região de Guanhães (MG). 2004. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

CAMARGO, O. A.; BETTIOL, W. Agricultura: opção animadora para a utilização de lodo de esgoto. **O Agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 2-3, p. 13-16, 2000.

CANZIANI, J. R. F.; OSAKI, M.; MASSARDO, M.; PEGORINI, E. Análise econômica para reciclagem do lodo de esgoto da ETE Belém. **SANARE - Revista Técnica da SANEPAR**, Curitiba, v. 11, n. 11, p. 51-58, 1999.

CARVALHO, P. C. T.; BARRAL, M. F. Aplicação do “resíduo orgânico” como fertilizante. **Fertilizantes**, São Paulo, v. 3, p. 1-4, 1981.

CAVALLARO, N.; PADILLA, N.; VILLARRUBIA, J. Sewage sludge effects on chemical properties of acid soils. **Soil Science**, New Brunswick v. 156, p. 63-70, 1993.

CLARHOLM, M. Possible roles for roots, bacteria, protozoa and fungi in supplying nitrogen to plants. In: FITTER, A. H. (Ed.). **Ecological interactions in soil**. Boston: Blackwell, 1985. p. 355-365.

CLEVELÁRIO JUNIOR; J. **Distribuição de carbono e de elementos minerais em um ecossistema florestal tropical úmido baixo-montano**. 1996. 135 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação**. São Paulo: CETESB, 1999. 33 p. (Manual Técnico – Norma P 4.320).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de diretoria Nº195-2005- E, de 23 de novembro de 2005**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2009.

DA SILVA, A. L. S. Escassez de água potável para consumo. Disponível em: <http://pt.shvoong.com/authors/carl-sagan/> Acesso em: 20 set. 2009.

DAVIES, B. E. Lead. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. 2. ed. London: Blackie Academic & Professional, 1995. p. 206-223.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 1. Madison: ASA, 1965. p. 545-567.

DE COSTA, W. A. J. M.; ATAPATTU, A. M. L. K. Decomposition and nutrient loss from prunings of different contour hedgerow species in tea plantations in the sloping highlands of Sri Lanka. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 51, n. 3, p. 201-211, 2001.

DE FELIPO, B. V.; NOGUEIRA, A. V.; LOUDES, E. G.; ALVAREZ, Z. V. H. Eficiência agrônômica do lodo de esgoto proveniente de uma siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 389-393, 1991.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivo da acidez de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 825-831, 2001.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 393-402, 2007.

FRANCO, E.; MIGLIORANZA, E.; FONSECA, E. P. High metal contents in coffee plant organs developed in tubets with different proportions of biosolid composts and carbonized rice hulls. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 4, p. 503-510, 2004.

FERREIRA, T. L. **Utilização de lodo de esgoto na implantação de cafezal em latossolo vermelho distrófico**. 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2005.

FORUM DAS ÁGUAS DAS AMÉRICAS E FORUM MUNDIAL DAS ÁGUAS. **Relatório final das atividades**. Brasília: Senado Federal, 2009.

GALSTON, A. W.; DAVIES, P. J. **Mecanismo de controle no desenvolvimento vegetal**. São Paulo: USP, 1972. 171 p.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 193-207, 2002.

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GLOBAL21 - Comercio Exterior e Marketing Internacional. **Papel e celulose** Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.global21.com.br/informessoriais/setor.asp?cod=9>. Acesso em: 23 set. 2009.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.

GONÇALVES, J. L. M.; RAIJ, B. van; GONÇALVES, J. C. Florestais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC, 1997. p. 247-259. (Boletim Técnico, 100).

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais implantados do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 601-616, 2001.

GONÇALVES, J. L. M.; VAZ, L. M. S.; AMARAL, T. M.; POGGIANI, F. Aplicabilidade de biofóssido em plantações florestais: II. Efeito na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 179-196.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; POGGIANI, F.; VAZ, L. M. S.; MOREIRA, R. M. **Efeito do lodo de esgoto na fertilidade do solo e crescimento das árvores**. (Subprojeto 3). Piracicaba: IPEF; ESALQ/USP; SABESP, 1999. 77 p. (Relatório de Pesquisa, 6).

GRAÇA, M. A. S.; POZO, J.; CANHOTO, C.; ELOSGLI, A. Effects of Eucalyptus plantation on detritus, decomposers, and detritivores in streams. **The Scientific World**, London, v. 2, p. 1173-1185, 2002.

GUEDES, M. C. **Efeito do lodo de esgoto (biofóssido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GUEDES, M. C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biofóssido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 154 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GUEDES, M. C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biofóssido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 188-201, 2003.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 267-280, 2006.

GRIMAL, P. Un urbanisme de l'eau à Rome. In: BERNADIS, M. A.; NESTEROFF, A. (Org.). **Le grand livre de l'eau**. Paris: La Manufacture et La Cité des Sciences et de l'Industrie, 1990. p. 97-105.

GUTIERREZ, R. R. [**Aztlan**] Cuitlahuac alimento y excremento. Crystal River: FAMSI. Disponível em: <http://www.famsi.org/pipermail/aztlan/2009-May/006090.html>. Acesso em: 25 jun. 2009.

HARRISON, R. B.; GESSEL, S. P.; ZABOWSKI, D.; HENRY, C. L.; XUE, D.; COLE, D. W.; COMPTON, J. E. Mechanisms of negative impacts of three forest treatments on nutrient availability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1622-1628, 1996.

HEPP, L. U.; DELANORA, R.; TREVISAN, A. Compostos secundários durante a decomposição foliar de espécies arbóreas em um riacho do sul do Brasil. **Acta Bot. Brasilica**, Porto Alegre, v. 23, n. 2, p. 407-413, 2009.

HERNANI, L. C.; SAKAI, F.; ISHIMURA, I.; LEPSCH, I. F. Influência de métodos de limpeza de terreno sob floresta secundária em Latossolo Amarelo do vale do Ribeira, SP.: I. Dinâmica de atributos químicos, físicos e produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 205-214, 1987.

HUE, N. V. Sewage sludge. In: RECHCIGL, J. E. (Ed.). **Soil amendments and environmental quality**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. p. 199-247.

JUSTUS, P. Estabilidade atrai investidor externo para plantio de florestas. **Estado de Hoje**. Economia e Negócios, São Paulo, 25 de maio de 2009. Disponível em: http://www.estadao.com.br/estadaodehoje/20090525/not_imp376258,0.php. Acesso em: 20 set. 2009.

KOCSSIS M. A.; MARIA, I. C. de. O efeito do lodo de esgoto na recuperação da estrutura física de solos degradados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 6., 2004, Goiânia. **Setenta Anos da AGB: as transformações do espaço e a geografia no século XXI**; caderno de resumos. Goiânia: Associação Brasileira de Geógrafos, 2004. v. 1, p. 262.

LERAY, G. **Planète eau**. Paris: La Villette Presses Pocket, 1982. 43 p.

LIEBMANN, H. **Terra um planeta inabitável**: da antiguidade, até aos nossos dias, toda a trajetória poluidora da humanidade. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1979. 114 p.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 421-428, 1978.

LIRA, A. C. S.; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 207-216, 2008.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H. Níveis de lodo de esgoto na produtividade do girassol. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, Valdivia, v. 7, p. 16-25, 2007.

LOGAN, T. J.; GOINS, L. E.; LINDSAY, B. J. Field assessment of trace element uptake by six vegetables from N-Viro Soil. **Water Environment Research**, Alexandria, v. 69, n. 1, p. 28-33, 1997.

MADEIRA, C. A.; PEÑA, M. R.; MARA, D. D. Microbiological quality of a waste stabilization pond effluent used for restricted irrigation in Valle Del Cauca, Colombia. **Water Science & Technology**, London, v. 45, n. 1, p. 139-143, 2002.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MALDONADO, C. A. B. **Biossólido na implantação da cultura da pupunheira: Efeito na precocidade, na produção e nos teores de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos do palmito**. 2005. 95 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Produção Agrícola) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2005.

MARTINS, L. F. S.; POGGIANI, F.; OLIVEIRA, R. F.; GUEDES, M. C.; GONÇALVES, J. L. M. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 207-218, 2004.

MARTINS, A. L. C. Cooper, nickel and zinc phytoavailability in an oxisol amended with sewage sludge and liming. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 747-754, 2003.

MARTINS, S. G. **Erosão hídrica em povoamento de eucalipto sobre solos coesos nos Tabuleiros Costeiros, ES**. 2005. 106 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 395-403, 2003.

NAHAS, E.; CENTURION, J. F.; ASSIS, L. C. Efeito das características químicas dos solos sobre os microorganismos solubilizadores de fosfato e produtores de fosfatases. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 49-53, 1992.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 385-392, 2004.

NETTO, J. M. A. Considerações sobre saneamento básico, saúde pública e qualidade de vida. **Revista de Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 55-61, 1959.

OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247 p. Tese

(Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, F. C.; MATIAZZO, M. E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 807-812, 2001.

OLIVEIRA, F. C.; MATIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 505-519, 2002.

OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, Brooklyn, v. 44, p. 322-331, 1963.

OUTWATER, A. B. **Reuse sewage sludge and minor wastewater residuals**. St. Louis: Lewis Publisher, 1994. 179 p.

PAGANINI, W. S. Reuso de água na agricultura. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reuso de água**. São Paulo: Manole, 2003. p.339-402.

PIGOZZO, A. T. J.; LENZI, E.; LUCA JÚNIOR, J.; SCAPIM, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; COSTA, A. C. S. Reação do solo e disponibilidade de micronutrientes, em solo de textura média tratado com lodo de esgoto e cultivado com milho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 569-579, 2008.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.

PIRES, A. M. M. **Ácidos orgânicos da rizosfera**: aspectos qualitativos e quantitativos e fitodisponibilidade de metais pesados originários de biossólidos. 2003. 90 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PIRES, A. M. M. **Uso agrícola do lodo de esgoto**: Aspectos legais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 4 p.

PIRES, L. S. **Sistemas de manejo de eucalipto e erosão hídrica em Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso na região de Belo Oriente (MG)**. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

POMPEU, C. T. **Regime jurídico da polícia das águas públicas**. Polícia da qualidade. São Paulo. Brasil. 1976. v. 1.

PRIHA, O.; LEHTO, T.; SMOLANDER, A. Mycorrhizas and C and N transformations in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, p. 191–204, 1999.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, L. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bio sólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 623-639, 2004.

ROCHE, D. Le temps de l'eau rare, du Moyen Age à l'Epoque Moderne. In: BERNADIS, M. A.; NESTEROFF, A. (Org.). **Le grand livre de l'eau**. Paris: La Manufacture et La Cité des Sciences et de l'Industrie, 1990. p. 115-126.

ROSTWOROWSKI, D. M. **Historia de los incas**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 259 p.

SANTOS, H. F. Aplicação do lodo de estações de tratamento de esgotos em solos agrícolas. **Revista DAE**, São Paulo, v. 32, p. 31-40, 1979.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi - SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, p. 21-34, 1993.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471-480, 2008.

SGARBY, F. **Produtividade de Eucalyptus sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, C. A.; RANGEL, O. J. P.; DYNIA, J. F.; BETTIOL, W.; MANZATTO, C. V. Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em Latossolo sucessivamente tratado com lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 353-364, 2006.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEIXE, C. A. Características agrotecnológicas, teores de nutrientes e de metais pesados em cana-de-açúcar (soqueira), cultivada em solo adubado com lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBCS; UFV, 1995. p. 2279-2281.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 143-151.

SILVA, P. H. M. **Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação de lodo de esgoto**. 2006. 117 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008.

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. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 79-104.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. de C.; ANDRADE, C. A.; TEIXEIRA, C. F. A. da. Efeito do lodo de esgoto em um argissolo e no crescimento e nutrição do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1187-1195, 2003.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. **SAS/STAT User's guide**, version 6, 4. ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989. v. 1-2, 1686 p.

STEVENSON, F. J.; ARDAKANI, M. S. Organic matter reactions involving micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINSDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: SSSA, 1972. p. 76-114.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Berkeley: University of California Press, 1979. 372 p.

TORRES, P. A.; ABRIL, A. B.; BUCHER, E. H. Microbial succession in litter decomposition in the semi-arid Chaco woodland. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 49-54, 2005.

TRANNIN, I. C. de B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S. Avaliação agronômica de um biossólido industrial para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 261-269, 2005.

TSUTYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 69-108.

VAZ, L. M. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2000. 41 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 747-758, 2002.

VELASCO MOLINA, M. **Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinqüenta e cinco meses após a aplicação de biossólido**. 2004. 66 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

VIERA, R. F.; CARDOSO, A. A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 867-874, 2003.

VITOUSEK, P. M. Litterfall, nutrient cycling and nutrients in tropical forests. **Ecology**, Brooklyn, v. 65, n. 1, p. 285-298, 1984.

VITAL, A. R. T.; GUERRINI, I. A.; FRANKEN, W. K.; FONSECA, R. C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 793-800, 2004.

WHITE, R. E. Pathways of phosphorous in soil. In: HUCKER, T. W. G.; GATROUX, G. (Ed.). **Phosphorous in sewage sludge and animal slurries**. London: D. Reidel Publishing Company, 1980. p. 291-307.

ZHU, W.; EHRENFELD, J. G. The effects of mycorrhizal roots on litter decomposition, soil biota, and nutrients in a spodosolic soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 179, p. 109-118, 1996.