**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (simulando alteração do uso agrícola do solo)

Alexandre de Vicente Ferraz

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Silvicultura e Manejo Florestal**

**Piracicaba
2013**

Alexandre de Vicente Ferraz
Engenheiro Florestal

Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (simulando alteração do uso agrícola do solo)

Orientador:
Prof. Dr. FÁBIO POGGIANI

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Ferraz, Alexandre de Vicente

Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (simulando alteração do uso agrícola do solo) / Alexandre de Vicente Ferraz.- - Piracicaba, 2013.

159 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Eucalipto 2. Biossólido 3. Metais Pesados 4. *Lactuca sativa* L. 5. *Oryza sativa* L.
6. *Raphanus sativus* L. 7. Desbaste 8. Talhadia 9. Área de Reforma I. Título

CDD 634.9734
F381e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

Aos meus pais

Luiz Carlos Ferraz e Miriam de Vicente Ferraz

À minha irmã

Patrícia de Vicente Ferraz

Aos meus avós

Helena Moda e Sebastião Baptistino

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa de doutorado e pelo auxílio pesquisa concedido para viabilizar o custeio das análises de solos e plantas.

Ao Professor Doutor Fábio Poggiani pela orientação, paciência, ensinamentos, conselhos e amizade.

Ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ pelo suporte logístico e a todos os professores e funcionários, em especial à Giovana Maria de Oliveira, ao Donizete Aparecido Sabino, ao José Amarildo da Fonseca e Natanael da Silva Duarte, pelo auxílio e pronta disponibilidade em ajudar na condução deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais – ESALQ/USP por me proporcionar o cabedal de conhecimentos necessário para o meu desenvolvimento profissional.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pelo financiamento dos insumos necessários para a implantação dos experimentos na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI).

À Alba Valéria Masetto, coordenadora do Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais - ESALQ/USP, e ao Professor Doutor Francisco Antonio Monteiro, coordenador do Laboratório de Tecidos Vegetais do Departamento de Ciência do Solo - ESALQ/USP, pelo auxílio prestado na realização das análises químicas das amostras vegetais e de solo.

Ao Professor Doutor Mário Tomazello Filho e à Técnica Maria Aparecida R. C. Bermudez, do Laboratório de Dendrologia e Anatomia da Madeira – ESALQ/USP, pela orientação e disponibilidade dos materiais necessários para a produção das faixas dendrométricas, utilizadas na avaliação do crescimento das árvores.

Ao Paulo Henrique Müller da Silva pela amizade, colaboração nas atividades de campo e importantes sugestões na condução deste trabalho.

A todos os funcionários da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI) da ESALQ-USP pela infra-estrutura disponibilizada e apoio na condução das atividades experimentais, em especial: Rildo Moreira e Moreira, António Leite de Moraes (Toninho),

Daniel dos Santos Fernandes (Andó), Elaine Cristina da Silva Casonato, Estevão Araújo e Lourival Fermiano pela incondicional ajuda.

A todos os amigos da sala da pós-graduação pelas valiosas discussões e pelos momentos de descontração, em especial aos colegas: Ângela Simone Freitag, Gustavo Martins Soares, Luana Trevine Momentel, Juliana Soares Biruel Munhoz, Rafaela Lorenzato Carneiro e Maria Rosa Daniel Muianga.

À minha noiva Maria Cecília por estar sempre presente, por suportar os momentos de dificuldade ao meu lado, pelos momentos de alegria, ensinamentos, companheirismo e apoio.

Aos meus amigos Evandro Vagner Tambarussi e Frederico Almeida de Jesus pela inestimável amizade e por todo o auxílio prestado nos momentos de dificuldade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”

Theodore Roosevelt

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	17
1.2 Estrutura da Tese	18
1.3 Descrição da região dos estudos.....	19
1.4 Caracterização climática da região dos estudos	20
Referências	21
 2 EFEITO RESIDUAL DO LODO DE ESGOTO SOBRE A FERTILIDADE DO SOLO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO MINERAL EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus grandis</i> , APÓS DESBASTE.....	25
Resumo	25
Abstract.....	25
2.1 Introdução.....	26
2.2 Material e Métodos	28
2.2.1 Descrição das áreas do estudo e delineamento experimental.....	28
2.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo.....	31
2.2.3 Avaliação da fertilidade do solo	33
2.2.4 Crescimento do tronco em circunferência	35
2.2.5 Estado Nutricional das Plantas	36
2.2.6 Análises estatísticas	37
2.3 Resultados e Discussão.....	37
2.3.1 Fertilidade do solo, 13 anos após adubação com lodo de esgoto	37
2.3.2 Crescimento do tronco em circunferência.....	41
2.3.3 Nutrição mineral das árvores de <i>E. grandis</i>	48
2.4 Conclusões.....	50
Referências	51
 3 BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE <i>Eucalyptus grandis</i> CONDUZIDOS POR TALHADIA, SOB EFEITO RESIDUAL DE DOSES DE LODOS DE ESGOTO (ÚMIDO E SECO).....	57
Resumo	57
Abstract.....	57
3.1 Introdução.....	58
3.2 Material e Métodos	60
3.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental	60
3.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo.....	62
3.2.3 Avaliação da fertilidade do solo	64
3.2.4 Quantificação da biomassa aérea e dos estoques de nutrientes	64
3.2.5 Análises estatísticas	66
3.3 Resultados e Discussão.....	66
3.3.1 Fertilidade do solo, 8 anos após a adubação com lodo de esgoto	66
3.3.2 Biomassa aérea e estoque de nutrientes.....	70
3.4 Conclusões.....	76
Referências	77

4 EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO COM DIFERENTES LODOS DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM ÁREAS DE REFORMA DE PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* 81

Resumo.....	81
Abstract	81
4.1 Introdução	82
4.2 Material e Métodos	84
4.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental.....	84
4.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo	87
4.2.3 Avaliação da fertilidade do solo.....	89
4.2.4 Estado nutricional das plantas.....	89
4.2.5 Crescimento das árvores em altura e diâmetro do fuste.....	90
4.2.6 Quantificação da biomassa aérea e dos estoques de nutrientes	90
4.2.7 Tamanho das folhas e área foliar específica das árvores	92
4.2.8 Produção de folheto e devolução de nutrientes para o solo	93
4.2.9 Análises estatísticas.....	95
4.3 Resultados e Discussão	95
4.3.1 Fertilidade do solo, 6 anos após a adubação com lodo de esgoto.....	95
4.3.2 Nutrição mineral das árvores	99
4.3.3 Crescimento das árvores	101
4.3.4 Dimensões das folhas e área foliar específica das árvores.....	102
4.3.5 Biomassa aérea e estoque de nutrientes	103
4.3.6 Produção de folheto e transferência de nutrientes para o solo	110
4.4 Conclusões	115
Referências	116

5 BIOMASSA, CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM PLANTAS ALIMENTÍCIAS CULTIVADAS EM DOIS TIPOS DE SOLOS COLETADOS EM TALHÕES DE *Eucalyptus grandis*, ADUBADOS HÁ CATORZE ANOS COM LODO DE ESGOTO..... 123

Resumo.....	123
Abstract	123
5.1 Introdução	124
5.2 Material e Métodos	127
5.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental.....	127
5.2.2 Avaliação da fertilidade do solo.....	130
5.2.3 Biomassa e características morfológicas das plantas	131
5.2.4 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas.....	132
5.2.5 Análises estatísticas.....	133
5.3 Resultados e Discussão	133
5.3.1 Fertilidade e concentração de metais pesados no solo	133
5.3.2 Biomassa e características morfológicas das plantas de alface.....	135
5.3.3 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de alface	137
5.3.4 Biomassa e características morfológicas das plantas de rabanete.....	140
5.3.5 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de rabanete	142
5.3.6 Biomassa e características morfológicas das plantas de arroz de sequeiro.....	146
5.3.7 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de arroz de sequeiro	148
5.4 Conclusões	153
Referências	154

RESUMO

Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (simulando alteração do uso agrícola do solo)

Nas últimas décadas, a elevação do consumo e do custo dos fertilizantes minerais tem preocupado o setor agrícola mundial. Portanto, o uso do lodo de esgoto tratado (biossólido) como adubo está sendo incentivado em diversos países, visto que aumenta a produtividade e gera benefícios pela reciclagem da matéria orgânica e nutrientes contidos em sua composição. Ainda assim, a presença de elementos potencialmente tóxicos (ex. metais pesados) no lodo e a falta de conhecimento sobre o seu efeito residual no ambiente, principalmente, em casos onde há a alteração do uso agrícola do solo, têm contribuído para a sua disposição final em aterros sanitários. Esta pesquisa pressupõe que o uso agrícola do lodo de esgoto, mesmo algum tempo após a sua aplicação ao solo, continua exercendo efeito residual favorável sobre a produtividade (biomassa) e a ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto, bem como em culturas de plantas alimentícias. No município de Itatinga-SP, foram instalados três experimentos com povoamentos de *Eucalyptus grandis*, sendo: (1) Prática de desbaste em dois talhões de eucalipto plantados em 1998, sobre Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE), e adubados com 20 t ha⁻¹ lodo de esgoto; (2) Prática da talhadia (condução de rebrota) em parcelas cultivadas com eucalipto e adubadas (em 2003) com 10, 20 e 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, aplicadas na forma úmida (torta) e seca (granulado) e (3) Prática de reforma em parcelas de eucalipto adubadas (em 2005) com 15 t ha⁻¹ dos lodos produzidos pelas estações de tratamento de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo. Um quarto experimento procurou simular a alteração do uso agrícola do solo, pela substituição de povoamentos de eucaliptos adubados com lodo de esgoto (há catorze anos) por áreas de cultivo das espécies: *Lactuca sativa* L. (alface), *Raphanus sativus* L. e *Oryza sativa* L. (arroz de sequeiro). Neste experimento, as plantas foram cultivadas em vasos preenchidos com dois tipos de latossolo (LVA e LVE), ambos coletados em talhões de *E. grandis* adubados há catorze anos com lodo de esgoto. De modo geral, a adubação dos plantios de eucalipto com os lodos de esgoto elevou o teor de fósforo, cálcio e zinco no solo. Nas áreas de desbaste, as concentrações foliares de nutrientes foram mais elevadas nas árvores cultivadas sob efeito residual do lodo de esgoto; todavia, este efeito não foi suficiente para alterar o crescimento do tronco (em circunferência) das árvores. Na área de talhadia, a adubação com 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto aplicado seco exerceu efeito residual positivo sobre a produção de biomassa aérea. Na área de reforma, a biomassa acumulada pelas árvores cultivadas sob efeito residual do lodo foi superior (até 150%) em relação à testemunha; além disso, este efeito residual do lodo trouxe reflexos positivos também na ciclagem de nutrientes, devido à maior deposição de folheto. Sob o efeito residual do lodo de esgoto, as plantas alimentícias acumularam 2 a 5 vezes mais biomassa em relação às respectivas testemunhas, principalmente ao serem cultivadas no LVA. Essas plantas apresentaram, também, concentrações mais elevadas de cádmio nas folhas, bem como de cromo e níquel nas raízes; todavia, em nenhum dos cultivos, foram excedidos os limites de metais pesados preconizados pela Agência de Vigilância Sanitária (ANVISA) do Brasil.

Palavras-chave: Eucalipto; Biossólido; Metais Pesados; *Lactuca sativa* L.; *Oryza sativa* L.; *Raphanus sativus* L.; Desbaste, Talhadia; Área de Reforma

ABSTRACT

Long term effect of the sewage sludge on productivity and nutrient cycling in *Eucalyptus grandis* stands and in food plants cultivation (simulating change in the agricultural use of the soil)

Over the last few decades, the increase in consumption and in the cost of mineral fertilizers has concerned overall agriculture. Therefore, the use of treated sewage sludge (biosolids) as fertilizer has been encouraged in many countries, inasmuch as it increases productivity and generates benefits by the recycling of organic matter and nutrients in its composition. Nevertheless, the presence of potentially toxic elements (*e.g.* heavy metals) in the sludge and the lack of knowledge about its long term effect on the environment, especially in cases where there is a change in agricultural use, have contributed to its final disposal in landfills. This research assumes that the agricultural use of sewage sludge, even some time after its application to the soil, have a favorable long term effect on productivity (biomass) and nutrient cycling in eucalypt stands, as well as in cultures of food plants. For this study, three experiments with *Eucalyptus grandis* were installed in Itatinga/SP: (1) Thinning practice in two eucalyptus stands planted in 1998, on sandy and clayey ferralsol (LVA and LVE, by its acronym in Portuguese), both fertilized with 20 t ha⁻¹ of sewage sludge; (2) Coppicing practice (sprouting conduct) in eucalyptus plots fertilized (in 2003) with 10, 20 and 30 t ha⁻¹ of wet and dry sewage sludge; and (3) Reform techniques in eucalyptus plots fertilized (in 2005) with 15 t ha⁻¹ of sludge produced by Barueri's, São Miguel's and Parque Novo Mundo's wastewater treatment plants. A fourth experiment simulated the change of use of agricultural soil, by replacing eucalyptus stands fertilized with sewage sludge (fourteen years ago) for vegetable species: *Lactuca sativa* L. (lettuce), *Raphanus sativus* L. (radish) and *Oryza sativa* L. (upland rice). In this experiment, plants were grown in pots filled with two types of ferralsol (LVA and LVE), both collected in *E. grandis* stands fertilized with sewage sludge (14 years ago). In general, the eucalyptus stands fertilization with sewage sludge increased the phosphorus, calcium and zinc content in the soil. In thinning stands, the leaf nutrient concentrations were greater in trees grown under long term effect of sewage sludge; however, this effect was not sufficient to alter the growth of the trunk (in circumference). In coppice stands, the fertilization with 10 t ha⁻¹ of dry sewage sludge had positive long term effect on the biomass production. In areas undergoing stand reform, the biomass accumulated by trees grown on long term effect of the sewage sludge was greater (150%) than the control. Furthermore, this effect of the sludge also brought positive impacts on nutrient cycling, due to an increasing in the leaf fall production. Under the long term effect of sewage sludge, the food plants accumulated 2 to 5 times more biomass than respective control treatments, especially if they are grown on the LVA. These plants also showed greater cadmium concentrations in the leaves, as well as greater chromium and nickel concentration in the roots. However, the concentrations of heavy metals didn't exceed the limits recommended by the Brazilian Health Surveillance Agency (ANVISA, by its acronym in Portuguese) in any of the crops.

Keywords: Eucalypt; Biosolids; Heavy Metals; *Lactuca sativa* L.; *Oryza sativa* L.; *Raphanus sativus* L.; Thinning, Coppice; Area Undergoing Stand Reform

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e a superlotação dos grandes centros urbanos têm ocasionado maior produção de resíduos que, uma vez acumulados, tornam-se prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana; principalmente, se não forem tratados, descartados e/ou reciclados adequadamente (NOQUEIRA et al., 2009).

Com a crescente demanda por saneamento básico, empresas públicas e privadas têm implementado políticas ambientais mais avançadas, incluindo o tratamento de efluentes domésticos e industriais (BARREIROS et al., 2007). Entretanto, durante o tratamento do esgoto doméstico gera-se uma grande quantidade de lodo (MELO et al., 2007), que se constitui em um novo resíduo, cuja disposição final por meios convencionais (ex. aterros sanitários e incineração) representa um custo elevado para as estações de tratamento, além de ser ambientalmente inadequada (OLIVER; MCLAUGHLIN; MERRINGTON, 2005).

Por muito tempo, os projetos de tratamento de esgotos no Brasil foram elaborados e executados sem que houvesse uma destinação apropriada para o lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos (ETEs) (BERTON; NOGUEIRA, 2010). Atualmente, o uso agrícola do lodo de esgoto é uma das mais importantes alternativas para a sua disposição final (NOGUEIRA et al., 2013), tendo em vista os possíveis benefícios econômicos e ambientais gerados a partir da reciclagem da matéria orgânica e nutrientes contidos em sua composição (AARAB et al., 2006; BRAMRYD, 2013).

Nos Estados Unidos da America, a Water Environmental Federation (WEF), entre outros órgãos e agências ambientais, propõe o termo *Biossólido* para denominar o lodo proveniente do tratamento de esgotos domésticos e industriais, que tenha sido devidamente higienizado, estabilizado e seco, e que apresente uma composição predominantemente orgânica (MELO; MARQUES, 2000), de modo a refletir de forma mais fidedigna as características benéficas inerentes ao seu uso em atividades agrofloretais (SILVEIRA; ALLEONI; GUILHERME, 2003).

A utilização de dejetos humanos na agricultura, como adubo e condicionador do solo, tem sido praticada há milênios na China e, mais recentemente, no fim do século XIX, na Austrália e Inglaterra (VANZO, 2001). Segundo Silveira, Alleoni e Guilherme (2003), metade da produção de lodo de esgoto nos Estados Unidos tem sido aplicada na agricultura, ao passo que na comunidade Européia, cerca de 30% deste resíduo já é utilizado como fertilizante em diferentes culturas agrícolas.

No Brasil, o enfoque científico quanto ao uso agrícola do lodo de esgoto começou em meados do século XX (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006), com o pioneirismo de Bettiol,

Carvalho e Franco (1982) e outros pesquisadores brasileiros. Desde então, os resultados das pesquisas têm indicado que o lodo de esgoto possui grande parte dos nutrientes exigidos pelas plantas, devido aos altos teores de matéria orgânica em sua composição, e que seu emprego é altamente recomendável em milho, café, cana-de-açúcar, citros e espécies florestais (VEGA et al., 2004).

Desde 1998, um grupo de pesquisadores da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) vem desenvolvendo diversos estudos na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ sobre a aplicabilidade de lodo de esgoto (biossólido) em culturas florestais. Dentre eles, Vaz (2000) e Rocha (2002) estudaram os efeitos de diferentes doses de lodo de esgoto (condicionado com cal hidratada) sobre a fertilidade do solo, o crescimento inicial e o estado nutricional em povoamentos de *Eucalyptus grandis*. Ambos verificaram que as doses entre 10 a 40 t ha⁻¹ foram efetivas no cultivo do eucalipto, equiparando-se à fertilização mineral convencional.

Guedes (2005), ao estudar os efeitos de diferentes doses de lodo de esgoto na ciclagem de nutrientes em plantios de *E. grandis*, verificou que o teor de nutrientes nas folhas das árvores aumenta de acordo com as doses de lodo aplicadas ao solo. Observou também que a adubação com lodo de esgoto incrementa o processo de ciclagem de nutrientes, elevando a produção e a taxa de decomposição da serapilheira.

Administrada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a ETE de Barueri-SP passou a condicionar o lodo de esgoto com polieletrólito ao invés de condicioná-lo cal hidratada. Utilizando este novo tipo de lodo, Silva (2006) estudou o efeito de doses de lodo seco (granulado) e úmido (torta) sobre o crescimento das árvores e a ciclagem de nutrientes em plantios de *E. grandis*. Como resultado, este autor verificou maior incremento na produção de madeira e maior acúmulo de nutrientes (principalmente N e P) na biomassa lenhosa das árvores, tanto em relação ao tratamento controle (sem qualquer adubação) quanto em comparação à fertilização mineral convencional.

As contribuições dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisadores da ESALQ/USP (entre 1998 e 2008) foram importantes para comprovar os efeitos benéficos imediatos do lodo de esgoto em plantios florestais; entretanto, não foram avaliados os efeitos de médio e longo prazo do lodo sobre a fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes no ecossistema.

Segundo Villas Boas et al. (2004), a matéria orgânica presente no lodo de esgoto pode ter efeito imediato e ainda residual por meio de processos mais lentos de decomposição e liberação de nutrientes. Nos sistemas de cultivo agrícola, principalmente naqueles onde as

culturas precedentes foram sucessivamente adubadas, os efeitos residuais dos fertilizantes orgânicos aplicados podem ser expressivos; porém, os agricultores geralmente não possuem meios suficientes para quantificar o possível aproveitamento dos fertilizantes remanescentes no solo (SILVA; SILVA FILHO; ALVARENGA, 2001).

Segundo Poggiani, Silva e Guedes (2006), apesar de algumas pesquisas terem demonstrado que a aplicação do lodo de esgoto no cultivo do eucalipto age como fonte de nutrientes para as plantas; as decisões futuras quanto à aplicabilidade do lodo em plantios florestais necessitam ainda de mais estudos, principalmente, em relação aos diversos aspectos da ciclagem de nutrientes e do balanço nutricional no ecossistema.

Há de se considerar também que os lodos de esgoto carregam uma significativa parcela do potencial poluidor dos esgotos dos quais se originaram (SUHADOLC et al., 2010), como por exemplo, a presença de metais pesados (EGIARTE et al., 2006). O comportamento desses elementos em longo prazo, após o término das aplicações do lodo ao solo, não é bem conhecido e deve merecer maior atenção (SILVEIRA; ALLEONI; GUILHERME, 2003).

Atualmente, a legislação brasileira através da resolução CONAMA 375 estabelece limites e critérios para o uso agrícola do lodo de esgoto (BRASIL, 2006). Essa resolução permite, por exemplo, a aplicação do lodo em plantações florestais e de cana de açúcar, mas proíbe sua utilização em culturas como as olerícolas, pastagens, tubérculos e raízes inundadas, cuja parte comestível possa entrar em contato direto com o solo (BERTON; NOGUEIRA, 2010). Entretanto, a escassez de informações sobre o possível efeito residual do lodo na fertilidade e biodisponibilidade de metais pesados no solo, bem como sobre a nutrição e produção de biomassa vegetal pelas plantas, gera ainda dúvidas quanto à sustentabilidade do uso agrícola do lodo de esgoto ao longo do tempo (ROY; COUILLARD, 1998), principalmente nos casos onde há possibilidade da alteração do uso agrícola do solo.

Portanto, esta pesquisa partiu do pressuposto de que a utilização de lodos de esgoto como fertilizantes orgânicos em plantações de eucalipto, mesmo vários anos após sua aplicação ao solo, continuam exercendo efeito favorável sobre a produtividade e a ciclagem de nutrientes em subsequentes sistemas de cultivo, tanto de eucaliptos quanto de plantas alimentícias, sem ocasionar aumento significativo na concentração de metais pesados na biomassa vegetal.

1.1 Objetivos

O propósito desta pesquisa foi de estudar o efeito residual de alguns lodos de esgoto, produzidos por diferentes ETes da SABESP e variados sistemas de condicionamento do lodo,

sobre plantios de *Eucalyptus grandis* conduzidos por diferentes técnicas de manejo e sobre o cultivo de hortaliças ou cereais, simulando uma eventual alteração do uso agrícola do solo. Para alcançar este propósito, foram conduzidos quatro experimentos na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga-SP com os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito residual do lodo de esgoto sobre o crescimento em diâmetro do tronco e a nutrição mineral de árvores de *E. grandis*, adubadas em 1998 com lodo condicionado com cal e submetidas ao desbaste em 2009.
- b) Quantificar a biomassa aérea e o estoque de nutrientes em brotações (2ª. rotação) de *E. grandis*, regeneradas em 2008 a partir de um plantio adubado (em 2003) com doses de lodo de esgoto úmido ou seco, condicionados com polieletrólito.
- c) Estudar o crescimento, a nutrição mineral, a produção de biomassa aérea e a ciclagem de nutrientes em parcelas de *E. grandis*, após a reforma (plantio de mudas) de um povoamento de eucalipto adubado (em 2005) com diferentes lodos de esgoto, produzidos pelas ETEs de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo.
- d) Averiguar os efeitos residuais do lodo de esgoto sobre o cultivo e a contaminação de plantas alimentícias (alface, arroz de sequeiro e rabanete) com metais pesados, considerando o cultivo dessas plantas em solo adubado (em 1998) com lodo condicionado com cal e, até então, cultivado com árvores *E. grandis*.

1.2 Estrutura da Tese

Visando proporcionar maior clareza na apresentação das pesquisas desenvolvidas, esta tese foi estruturada nos seguintes capítulos:

- 1º Capítulo – Introdução geral dos temas abordados na tese.
- 2º Capítulo - Efeito residual do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo, crescimento e nutrição mineral em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, após desbaste.
- 3º Capítulo – Biomassa aérea e estoque de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* conduzidos por talhadia, sob efeito residual de doses de lodos de esgoto (úmido e seco).
- 4º Capítulo – Efeito residual da adubação com diferentes lodos de esgoto na produção de biomassa aérea e ciclagem de nutrientes em áreas de reforma de plantios de *Eucalyptus grandis*.
- 5º Capítulo – Biomassa, concentração de nutrientes e metais pesados em plantas alimentícias cultivadas em dois tipos de solos coletados em talhões de *Eucalyptus grandis*, adubados há catorze anos com lodo de esgoto.

1.3 Descrição da região dos estudos

As pesquisas foram conduzidas em 4 áreas experimentais (Figura 1.1), situadas em diversos locais da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), pertencente à Universidade de São Paulo (USP). Localizada no município de Itatinga/SP, a EECFI encontra-se nas coordenadas geográficas 23°10'S e 48°40'W, a 860 m de altitude.

Figura 1.1 – Localização das quatro áreas experimentais (AE-16, AE-28, AE-30 e AE-37) utilizadas na pesquisa e da sede administrativa da EECFI

Quanto ao tipo de ocupação do solo, o histórico da área onde se desenvolveram os estudos pode ser descrito basicamente em três períodos distintos:

- 1º Período: até meados dos anos 40, grande parte da área apresentava-se recoberta por vegetação de Cerrado “*senso strictu*” e, a outra parte, era utilizada para a criação de gado leiteiro e de corte.
- 2º Período: entre 1940 e 1988, grande parte da área passou a ser cultivada com eucaliptos pela extinta Ferrovia Paulista S/A (FEPASA), visando à produção de lenha e dormentes. Em 1965, a área reservada para a conservação do cerrado foi atingida por um grande incêndio florestal, afetando fortemente a vegetação nativa. Segundo VIEIRA (1998), as principais espécies arbóreas presentes na área de Cerrado em via de regeneração (1997) eram: *Anadeanathera falcata* (Benth.) Speg.; *Stryphnodendron adstringes* (Mart.) Coville; *Gochnatia polymorpha* (Less.) Cabr.; *Machaerium acutifolium* Raddi.

3º Período: após 1988, com a criação da EECFI, parte da área continuou sendo cultivada com eucaliptos para fins comerciais e outra parte (cerca de 700 hectares) foi destinada à realização de experimentos científicos relacionados à silvicultura e ao manejo florestal.

O tipo de solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho amarelo distrófico típico, A moderado, textura média e relevo plano (EMBRAPA, 2006). Este solo apresenta pH relativamente baixo, elevado teor de alumínio e baixa saturação por bases. Situação, portanto, característica das áreas atualmente florestadas com diversas espécies do gênero *Eucalyptus* no Estado de São Paulo.

1.4 Caracterização climática da região dos estudos

A precipitação média anual no município de Itatinga-SP é de 1.300 mm, ocorrendo à maior incidência de chuvas no período de outubro a março (Figura 1.2). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical Cwa - mesotérmico úmido com inverno seco. A temperatura média anual da região é de 19,4°C, sendo a mínima de 16,3°C no mês de julho e a máxima de 21,9°C no mês de janeiro.

Figura 1.2 – Precipitação pluviométrica e temperatura média normais do município de Itatinga-SP, de acordo com a série temporal de 1941 até 1970, segundo Rolim e Sentelhas (1999)

Referências

- AARAB, T.; SMEYERS, M.; REMY, M.; GODDEN, B.; DELHAYE, J.P. The storage of sewage sludge: influence of liming on the evolution of copper chemical fractions. **Waste Management**, Oxford, v. 26, n. 9, p. 1024-1032, 2006.
- BARREIROS, R.M.; GONÇALVES, J.L. de M.; SANSÍGOLO, C.A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 103-111, 2007.
- BERTON, R.S.; NOGUEIRA, T.A.R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIOANE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu, SP: FEPAF, 2010. p. 31-50.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T.; FRANCO, B.J.D.C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. **O solo**, Piracicaba, v. 75, n.1, p. 44-54, 1982.
- BRAMRYD, T. Long-term effects of sewage sludge application on the heavy metal concentrations in acid pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in a climatic gradient in Sweden. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 289, n. 1, p. 434-444, 2013.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - **CONAMA. Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Dispõe sobre critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2009.
- EGIARTE, G.; ARBESTAIN, M.C.; RUÍZ-ROMERA, E.; PINTO, M. Study of the chemistry of an acid soil column and of the corresponding leachates after the addition of an anaerobic municipal sludge. **Chemosphere**, Oxford, v. 65, n. 11, p. 2456-2467, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GUEDES, M C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 154p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais/Silvicultura e Manejo Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- MELO, W.J. de; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A.(Org.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 109-139.
- MELO, W.J. de; AGUIAR, P. de S.; MELO, G.M.P. de; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Nickel in a tropical soil treated with sewage sludge and cropped with maize in a long-term field study. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 39, n. 6, p. 1341-1347, 2007.

NOGUEIRA, T.A.R.; MELO, W.J. de; OLIVEIRA, L.R.; FONSECA, I.M.; MELO, G.M.P. de; MARCUSSI, S.A.; MARQUES, M.O. Nickel in soil and maize plants grown on a oxisol treated over a long time with sewage sludge. **Chemical Speciation and Bioavailability**, Surrey, v. 21, n. 4, p. 165-173, 2009.

NOGUEIRA, T.A.R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, London, v. 114, p. 168-177, 2013.

OLIVER, I.W.; MCLAUGHLIN, M.J.; MERRINGTON, G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in sewage biosolids: a comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 337, n. 1/3, p. 139-145, 2005.

POGGIANI, F.; SILVA, P.H.M. da; GUEDES, M.C. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. In: ANDREOLI, C.V. (Org.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2006. p. 159-188.

ROCHA, G.N. **Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2002. 48p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais/Manejo de Florestas de Produção) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. **Balanço hídrico normal por Thorntwaite e Mather (1955)**. Piracicaba: ESALQ/USP – Departamento de Ciências Exatas: Área de Física e Meteorologia, 1999. (programa para Excel v. 6). 1 CD-ROM.

ROY, M.; COUILLARD, D. Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil. **Water Research**, New York, v. 32, n. 5, p. 1642-1652, 1998.

SILVA, E.C.; SILVA FILHO, A.V.; ALVARENGA, M.A.R. Efeito residual da adubação efetuada no cultivo da batata sobre a produção do feijão-de-vagem. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 180-183, 2001.

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

SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 793-806, 2003.

SUHADOLC, M.; SCHROLL, R.; HAGN, A.; DÖRFLER, U.; SCHLOTTER, M.; LOBNIK, F. Single application of sewage sludge – Impact on the quality of an alluvial agricultural soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 81, n. 11, p. 1536-1543, 2010.

VANZO, J.E. Horizonte histórico da reciclagem. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C.T. de; MELFI, A.J.; MELO, W.J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólido na agricultura**. São Paulo, SP: SABESP, 2001. p. 1-5.

VAZ, L.M.S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2000. 41p. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

VEGA, F.V.A.; BOVI, M.L.A.; BERTON, R.S.; GODOY JUNIOR, G.; CEMBRANELLI, M. de A.R. Aplicação de biossólido na implantação da cultura da pupunheira. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 131-135, jan - mar. 2004.

VIEIRA, S.A. **Efeito das plantações florestais (*Eucalyptus sp.*) sobre a dinâmica de nutrientes em região de cerrado do estado de São Paulo**. 1998. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

VILLAS BÔAS, R.L.; PASSOS, J.C.; FERNANDES, M.; BÜLL, L.T.; CEZAR, V.R.S.; GOTO, R. Efeito de doses e tipos de compostos orgânicos na produção de alface em dois solos sob ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 28-34, 2004.

2 EFEITO RESIDUAL DO LODO DE ESGOTO SOBRE A FERTILIDADE DO SOLO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO MINERAL EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus grandis*, APÓS DESBASTE

Resumo

No manejo florestal, a remoção das árvores inferiores de um povoamento através de desbastes visa favorecer o crescimento das árvores remanescentes, devido ao aumento da disponibilidade de luz, água e nutrientes. O lodo de esgoto é um resíduo orgânico gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) e, geralmente, descartado em aterros sanitários. Do ponto de vista ambiental, a aplicação do lodo em plantações florestais pode tornar-se uma das alternativas mais adequadas para a sua disposição final, podendo ser aplicado nas operações iniciais de plantio, bem como em áreas de desbaste, visando melhorar a fertilidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a fertilidade do solo, o estado nutricional e o crescimento do tronco (em circunferência) de árvores remanescentes após desbaste, em plantios de *Eucalyptus grandis* adubados há catorze anos com lodo de esgoto, gerado pela ETE de Barueri/SP. O experimento foi conduzido no município de Itatinga-SP, em dois talhões de eucalipto com os seguintes solos: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE). Em cada talhão, o delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 4 repetições e 3 tratamentos, sendo: 1) Testemunha, sem qualquer adubação (T) e 2) Efeito residual da fertilização mineral convencional (FM) e 3) Efeito residual da adubação com 20 t ha^{-1} base seca de lodo de esgoto (LE). Em ambos os solos, o plantio das mudas de eucalipto e a adubação com o lodo foram realizados em março/1998. O povoamento cultivado no LVA foi desbastado em outubro/2009 e, no LVE, em novembro/2010. As árvores remanescentes do desbaste foram mensuradas quanto à circunferência do tronco à altura do peito (CAP), com a utilização de faixas dendrométricas de aço inox (providas de nônio) fixadas ao tronco. O crescimento em circunferência (CAP) foi medido a cada 15 dias. Em maio/2011, foi avaliada a fertilidade do solo e, em março/2012, foram coletadas as folhas das copas para a análise nutricional das árvores. Observou-se que o efeito residual do lodo de esgoto elevou o teor de fósforo (de 2 a 4 vezes) e cálcio (de 4 a 29 vezes) na camada de 0-5 cm do solo, bem como o teor de zinco e enxofre até a camada de 0-40 cm de profundidade. Consequentemente, as concentrações foliares de cálcio, fósforo e zinco foram significativamente superiores (de 30 a 150%) no tratamento LE em relação ao tratamento T. Constatou-se que o efeito residual do lodo de esgoto foi maior no Latossolo Vermelho Amarelo (mais arenoso), em comparação ao Latossolo Vermelho Escuro (mais argiloso). Apesar disso, a aplicação do lodo de esgoto não exerceu efeito residual significativo sobre o crescimento do tronco (em CAP) das árvores, durante os três anos e meio após o desbaste, em comparação aos tratamentos T e FM. A precipitação pluviométrica, a temperatura média e a umidade relativa do ar correlacionaram-se positivamente com os incrementos correntes da CAP dos troncos de eucalipto.

Palavras-chave: Eucalipto; Biossólido; Dendrômetro; Adubação Orgânica

Abstract

In forest management, the cut down of small trees in thinned eucalypt stands promote the growth of remaining trees, due to the increase of light, water and nutrients availability. Sewage sludge is an organic residue produced in wastewater treatment plants (ETEs, by its acronym Portuguese) and usually disposed in landfills. From an environmental point of view,

the application of sludge in forestry plantations can be one of the most suitable alternatives for final disposal and it can be applied in the initial planting operations, as well as in thinning areas, to improve soil fertility. The aim of this study was to evaluate soil fertility, nutritional status and trunk growth (in circumference) of remaining trees after thinning in *Eucalyptus grandis* stands, fertilized fourteen years ago with sewage sludge, generated by ETE Barueri/SP. The experiment was carried out in Itatinga/SP, in two eucalyptus stands, which one with a different type of Ferralsol (LVA and LVE, by its acronym Portuguese). In each plot, the experimental design consisted of randomized blocks with four replications and 3 treatments: 1) control, without any fertilization (C); 2) Long term effect of conventional mineral fertilization (MF) and 3) Long term effect of 20 t ha⁻¹ dry basis of sewage sludge (SS). In both soils, the planting of eucalyptus seedlings and sludge fertilization were performed in March/1998. The eucalypt stands in LVA and LVE were thinned in October/2009 and November/2010, respectively. In the remaining trees were measured: the trunk circumference at breast height (CAP, by its acronym Portuguese) using dendrometer bands (fitted with vernier) fixed to the trunk. The trunk growth was measured every 15 days. In May/2011, the soil fertility was evaluated and the leaves were sampled in March/2012, for the trees nutrition analysis. It was noticed that the long term effect of sewage sludge increased the phosphorus content (2 to 4 times) and calcium content (4 to 29 times) in the 0-5 cm soil layer, as well as zinc and sulfur content were increased in the 0-40 cm soil layer. Consequently, the calcium, phosphorus and zinc concentrations in leaves were significantly greater (from 30 to 150%) than MF and C treatments. In this study, the long term effect of sewage sludge was greater in LVA (more sand) than in the LVE (more clay). Nevertheless, the application of sewage sludge did not effect the growth of eucalypt trunk throughout the first three years and half after thinning than C and MF treatments. The rainfall, temperature and relative humidity were positively correlated with the CAP increments of eucalyptus trunks.

Keywords: Eucalypt; Biosolids; Dendrometer; Organic fertilization

2.1 Introdução

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, a área ocupada por reflorestamentos comerciais no Brasil totalizou em 2012 cerca de 6.700.000 ha, sendo 76,6% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 23,4% aos plantios de *Pinus* (ABRAF, 2013). Segundo esta associação, os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como detentores de 87,1% da área total de plantios florestais.

Atualmente, o gênero *Eucalyptus* é uma das principais essências florestais plantadas no Brasil (TREVISAN et al., 2007), o que se deve, de um modo geral, às suas características de rápido crescimento, alta produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicação para diferentes finalidades, como por exemplo, madeira para a produção de celulose, materiais de construção civil e móveis.

De acordo com Mora e Garcia (2000), os solos utilizados para reflorestamentos comerciais são em sua grande maioria de baixa fertilidade natural; sabendo-se, contudo, que

os eucaliptos absorvem grande quantidade de nutrientes durante o seu crescimento, estocando tais elementos na biomassa aérea (folhas, galhos, casca e lenho) e radicular.

Nas ultimas décadas, grandes quantidades de fertilizantes têm sido aplicadas ao solo em plantios florestais sob manejo intensivo (GONÇALVES et al., 2004); contudo, atualmente, a racionalização das aplicações de fertilizantes nos reflorestamentos tem se tornado essencial para que haja viabilidade econômica e ambiental neste tipo de empreendimento (LACLAU et al., 2009).

A elevação dos custos com fertilizantes minerais e, por outro lado, as grandes quantidades de lodo de esgoto produzidas mundialmente nas estações de tratamentos (ETEs) têm incentivado a utilização deste resíduo como adubo orgânico no meio agrícola, favorecendo também a sua disposição final (MELO et al., 2007). A aplicação do lodo de esgoto em plantios florestais, como fertilizante e condicionador do solo, tem se apresentado como uma das alternativas de disposição mais atraentes tendo em vista os seus atributos, tais como: altos teores de matéria orgânica (40-60%), nitrogênio (4%), fósforo (2%), e também micronutrientes em geral (VEGA et al., 2004). Além disso, tem-se observado um efeito positivo sobre a produção de madeira, através de processos de cultivo que não afetam a cadeia alimentar humana (MAGESAN; WANG, 2003).

Atualmente, em virtude das inovações tecnológicas e maior fiscalização ambiental, o lodo de esgoto produzido pelas ETEs tende a apresentar baixa concentração de elementos potencialmente tóxicos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, tornando-se uma opção efetiva para substituição parcial ou total dos fertilizantes minerais, usualmente aplicados nas plantações florestais de rápido crescimento (FROST; KETCHUM JR., 2000).

Segundo Weetman et al. (1993), a adubação de plantios florestais com lodo de esgoto pode promover a longo prazo, por meio do seu efeito residual, melhorias na fertilidade do solo e proporcionar maior produção de madeira, devido à gradual mineralização da matéria orgânica contida no lodo e à lenta liberação de nutrientes para o solo, superando inclusive os efeitos da fertilização mineral convencional.

Entre os tratos silviculturais que possibilitam alterações nas condições e taxas de crescimento das árvores, destacam-se a aplicação de fertilizantes e a prática do desbaste, que podem ser utilizados para aumentar a quantidade e melhorar a qualidade da madeira produzida pelos povoamentos florestais (LIMA; GARCIA, 2010).

Segundo Campos e Leite (2009), o desbaste é a remoção de uma proporção de árvores num povoamento florestal, a fim de se conseguir mais espaço de crescimento para as árvores remanescentes, aumentando a produção de madeira utilizável durante o ciclo de corte do

povoamento, além de garantir a produção contínua de madeira. No Brasil, o desbaste tem sido praticado preponderantemente em plantios de *Pinus*; entretanto, nos últimos anos, essa prática vem sendo utilizada também em plantações de eucalipto com o objetivo de obter multiprodutos, vislumbrando maiores retornos econômicos (RETSLAFF et al., 2012).

Após o desbaste, as plantas remanescentes apresentam aumento na taxa de crescimento devido à redução de competição entre elas e, conseqüentemente, a maior disponibilidade de luz, água e nutrientes proporcionada pelo novo espaçamento entre plantas (LEITE et al., 2005). Isto resulta na produção de árvores de grande porte, com melhoria da qualidade da madeira e agregação de valor ao produto final (DIAS et al., 2005).

Contudo, do ponto de vista ecológico e silvicultural, faltam ainda informações científicas relacionadas ao efeito residual do lodo de esgoto em plantios de eucalipto após a prática de desbaste. Portanto, foi objetivo desta pesquisa verificar se a adubação com lodo de esgoto em plantios de *E. grandis* poderia exercer, a médio e/ou longo prazo, efeito residual benéfico sobre a fertilidade do solo, a nutrição mineral e o crescimento em diâmetro do tronco de árvores remanescentes pós-prática de desbaste tardio.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição das áreas do estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, em duas áreas experimentais com tipos de solo distintos, sendo: 1) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com textura médio-arenosa, respectivo a área AE-16 e 2) Latossolo Vermelho Escuro franco argilo-arenoso (LVE), referente à área AE-30. Os atributos químicos e físicos de ambos os solos podem ser visualizadas na tabela 2.1.

Em março de 1998, as áreas AE-16 e AE-30 foram conduzidas para a experimentação com eucaliptos e adubação com lodo de esgoto (LE), conforme Guedes (2000), Guedes e Poggiani (2003) e Rezende (2005). Estes autores relatam que foi efetuado o plantio de mudas de *Eucalyptus grandis*, no espaçamento de 2 metros entre as plantas e 3 metros entre as linhas de plantio, de acordo com as práticas do cultivo mínimo (GONÇALVES et al., 2004). As mudas foram produzidas em tubetes com sementes procedentes de Coff's Harbour (Austrália) e, após o plantio, adubadas com doses de lodo de esgoto da ETE de Barueri/SP, variando entre 0 e 40 t ha⁻¹ (base seca).

Em 1998, o lodo de esgoto (LE) produzido pela ETE de Barueri era condicionado com cal hidratada e cloreto férrico, o que lhe conferia caráter alcalino e elevada concentração de

cálcio (Tabela 2.2). Em ambas as áreas experimentais as diferentes doses de lodo foram aplicadas nas entrelinhas de plantio, numa faixa com largura aproximada de 2 m.

Tabela 2.1 - Atributos químicos e físicos do Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Escuro, em diferentes profundidades (Prof.), antes da instalação dos experimentos (em 1998) nas áreas experimentais AE-16 e AE-30

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	M.O g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	K -----	Ca -----	Mg mmolc dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	CTC -----	V %
Latossolo Vermelho Amarelo - LVA										
0 - 5	3,9	39,6	3	0,3	2	1	42	3,3	46	8
5 - 10	3,9	30,3	4	0,4	3	1	58	4,4	63	8
10 - 20	3,8	19,8	6	0,3	3	2	63	5,3	68	8
20 - 40	3,8	10,5	6	0,2	3	2	44	5,2	49	11
Latossolo Vermelho Escuro - LVE										
0 - 5	3,9	32,6	6	0,9	2	3	75	5,9	80	7
5 - 10	3,8	29,1	9	0,4	9	5	74	14,4	88	16
10 - 20	3,9	16,3	3	0,3	2	2	68	4,3	72	5
20 - 40	3,7	15,1	4	0,2	5	2	66	7,2	73	10
Prof. (cm)	B -----	Cu -----	Fe mg dm ⁻³	Mn -----	Zn -----	Areia Total -----	Silte %	Argila Total -----		
Latossolo Vermelho Amarelo - LVA										
0 - 20	0,20	1,6	71	0,4	1,6	83	5,0	12,0		
20 - 40	0,18	1,6	42	0,2	0,4	83	5,0	12,0		
Latossolo Vermelho Escuro - LVE										
0 - 20	0,20	5,0	31	2,4	0,6	63	11,0	26,0		
20 - 40	0,35	4,4	42	2,2	0,4	82	5,0	13,0		

Nota: Análises química e física do solo realizadas segundo metodologias propostas por Raji et al. (1987) e Camargo et al. (1986), respectivamente.

O delineamento experimental utilizado em ambas as áreas foi em blocos, com 4 repetições e parcelas aleatorizadas. Os tratamentos testados na área AE-16 foram: 1- Testemunha absoluta, sem qualquer tipo de adubação; 2- Fertilização mineral convencional; 3, 4, 5, e 7- Adubação com 5, 10, 15, 20 e 40 t ha⁻¹ de LE, respectivamente, complementada com KCl; 8- Adubação com 10 t ha⁻¹ de LE sem complementação mineral; 9- Adubação com 10 t ha⁻¹ de LE, complementada com KCl e P₂O₅.

Por sua vez, os tratamentos testados na área AE-30 foram: 1- Testemunha absoluta, sem adubação; 2- Fertilização mineral convencional; 3 e 4- Adubação com 10 e 20 t ha⁻¹ de LE, complementada com KCl; 5- Adubação com 10 t ha⁻¹ de LE, com incorporação de KCl; 6- Adubação com 10 t ha⁻¹ de LE, complementada com KCl e P₂O₅ e 7- Adubação com 10 t ha⁻¹ de LE, complementada com KCl, P₂O₅ e NH₄NO₃.

Tabela 2.2 - Características químicas do lodo de esgoto produzido em 1998 pela ETE de Barueri-SP, quando o condicionamento era efetuado com cal e cloreto férrico

Atributos	Unidade	Valores	Atributos	Unidade	Valores
pH em CaCl ₂ a 0,01	-	10,6	Sódio (Na) _{total}	g kg ⁻¹	0,58
Umidade _{total} (65°C)	%	62,86	Enxofre (S) _{total}	g kg ⁻¹	5,3
Matéria orgânica	g kg ⁻¹	116,17	Ferro (Fe) _{total}	mg kg ⁻¹	55.056
Carbono total	g kg ⁻¹	172,26	Cobre (Cu) _{total}	mg kg ⁻¹	900
Nitrogênio total	g kg ⁻¹	18,66	Manganês (Mn) _{total}	mg kg ⁻¹	300
Nitrogênio	g kg ⁻¹	5,38	Zinco (Zn) _{total}	mg kg ⁻¹	1.632
Fósforo (P ₂ O ₅) _{total}	g kg ⁻¹	9,40	Cádmio (Cd) _{total}	mg kg ⁻¹	21
Potássio (K ₂ O) _{total}	g kg ⁻¹	1,96	Cromo (Cr) _{total}	mg kg ⁻¹	268
Cálcio (Ca) _{total}	g kg ⁻¹	86,40	Chumbo (Pb) _{total}	mg kg ⁻¹	200
Magnésio (Mg) _{total}	g kg ⁻¹	3,80	Níquel (Ni) _{total}	mg kg ⁻¹	222

Nota: Método empregado para os metais pesados: SW 3051, EPA – U.S, determinação por ICP-AES.

Todos os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

A fertilização mineral recomendada (em 1998) para a implantação do tratamento FM, nas áreas AE-16 e AE-30, foi: 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (aplicado a lanço em área total), 110 kg ha⁻¹ de fertilizante NPK 0-45-0 (disposto no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (disposto no sulco de plantio) e 80 kg ha⁻¹ de NPK 20-0-20 (aplicado ao redor das mudas após 45 dias do plantio). Além disso, aos 6 e 12 meses após o plantio das mudas no campo, foram aplicados 180 kg ha⁻¹ e 240 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% de Boro + 0,5% de Zinco (numa faixa de 40 cm na entre linha de plantio), respectivamente.

Em cada área, as parcelas continham 36 árvores na área útil (onde efetivamente foram realizadas as avaliações) e 64 árvores na bordadura dupla (estabelecida para evitar a influência de um tratamento em outro), totalizando 600 m² (30 x 20 metros). Com isso, área útil efetiva foi de 216 m².

Nesta pesquisa, iniciada em 2009, o efeito residual do lodo de esgoto foi estudado em ambas as áreas AE-16 e AE-30, mas incluiu apenas as parcelas submetidas aos tratamentos: 1- Testemunha (T), 2- Fertilização mineral convencional (FM) e 3- Adubação com 20 t ha⁻¹ de Lodo de esgoto (LE). O delineamento experimental adotado foi o de blocos, com 4 repetições e parcelas aleatorizadas, num esquema fatorial 2X3. Os fatores em estudo foram: 2 tipos de solo (LVA e LVE) e 3 situações relacionadas a práticas de fertilização do solo (T, FM e LE) (efetuadas em 1998).

Após delimitação das parcelas em ambas as áreas AE-16 e AE-30, foi realizada a contagem e a localização das árvores remanescentes em cada uma das parcelas. Em seqüência, foi efetuado o inventário florestal por meio da mensuração da altura total e da circunferência a altura do peito (CAP) de cada uma das árvores no campo.

Com base no inventário, as árvores inferiores existentes em cada parcela foram selecionadas, marcadas com tinta e, em seguida, abatidas com motosserra. Após o abate, permaneceram em cada parcela 22 árvores superiores, sendo 8 árvores na área útil e 14 árvores na bordadura dupla, caracterizando desta forma um desbaste de 78%. O critério utilizado no desbaste levou em consideração o porte da árvore, a retidão dos troncos e a disposição espacial dos indivíduos dentro de cada parcela, de modo que houvesse uma distância mínima de 4 metros entre uma árvore e outra.

Os desbastes nas áreas AE-16 e AE-30 foram realizados nos meses de outubro/2009 e novembro/2010, respectivamente. Portanto, as análises dos resultados de crescimento levaram em consideração os diferentes períodos de instalação e evolução dos experimentos.

2.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo

As variações do regime pluviométrico e das temperaturas máxima e mínima ao longo do período de estudo (Figura 2.1), entre outubro/2009 e março/2013, foram similares ao padrão apresentado pela normal da cidade de Itatinga-SP, conforme Rolim e Sentelhas (1999).

Os períodos de maior precipitação ocorreram entre os meses de outubro a março, tanto no 1º semestre da condução da pesquisa (precipitação_{total} de 1.425,9 mm) quanto nos 3º, 5º e 7º semestres (precipitação_{total} de: 1.059,8 mm; 1.009,8 mm e 1089,6 mm, respectivamente).

Os períodos de menor precipitação ocorreram entre os meses de abril a setembro, tanto no 2º semestre da pesquisa (precipitação_{total} de 260,4 mm) quanto no 4º e 6º semestre (precipitação_{total} de 255,5 e 628,51 mm, respectivamente). Destaca-se que a precipitação total no 6º semestre foi consideravelmente atípica, principalmente pela elevada quantidade de chuvas no mês de junho/2012 (cerca de 300 mm).

Os resultados indicam haver na região de Itatinga/SP dois períodos climáticos distintos, denominados nesta pesquisa como: “Período de maior precipitação”, com temperaturas mais elevadas típicas de verão e “Período de menor precipitação”, com temperaturas mais baixas típicas de inverno.

As oscilações climáticas sazonais, além de afetar a fenologia e o crescimento das plantas, influenciam também nas variações da concentração dos nutrientes nas folhas, galhos, lenho, casca e demais componentes das árvores (BELLOTE; SILVA, 2005). Segundo Tomazello Filho, Botosso e Lisi 2001, as árvores têm mostrado reação às variáveis ambientais (temperatura, precipitação, etc.) que afetam seus inúmeros processos fisiológicos (respiração, fluxo de seiva, transpiração, etc.) refletindo na sua atividade cambial e no crescimento em circunferência do tronco.

Figura 2.1 - Precipitação total, temperaturas médias mínima e máxima mensais observadas entre os meses de setembro/2009 a março/2013, durante o período de estudo nas áreas AE-16 e AE-30 após o desbaste, conforme a estação meteorológica da EECFL. ■ Indicação de ocorrência de geada no período de 27-28/06/2011. ▲ Indicação de ocorrência de geada no período de 04-05/08/2011

Observou-se, também, que nos meses de junho e agosto de 2011 ocorreram geadas com temperaturas mínimas absolutas de $-1,9^{\circ}\text{C}$ e $-1,0^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Figura 2.2). Na geada de junho/2011, foram registradas temperaturas abaixo de 0°C das 0h às 8h do dia 28/06/11, totalizando 8 horas contínuas de frio intenso. Por sua vez, na geada de agosto/2011, foram registradas temperaturas abaixo de 0°C das 4h30 às 7h30 do dia 05/08/11, compreendendo 3 horas ininterruptas de clima gélido.

Figura 2.2 – Variação da temperatura média nos dias com ocorrência de geada, nos meses de junho/2011 (A) e agosto/2011 (B)

Após as geadas, as temperaturas começaram a se elevar depois das 8h e atingiram temperaturas próximas de 13°C às 12h00min, caracterizando uma amplitude térmica de aproximadamente 15°C .

2.2.3 Avaliação da fertilidade do solo

Para esta pesquisa, a avaliação da fertilidade do solo em ambas as áreas (AE-16 e AE-30) foi realizada em maio de 2011, ou seja, 13 anos depois da aplicação do lodo de esgoto nos plantios de eucalipto.

A amostragem do solo foi efetuada na área útil de cada parcela, em 16 pontos distribuídos aleatoriamente nas linhas de plantio, para os tratamentos T e FM, e nas entrelinhas de plantio, para o tratamento LE. Neste caso, preferiu-se amostrar o solo nos locais onde cada prática de adubação foi efetuada originalmente, ou seja, onde possivelmente seriam observados os efeitos residuais mais proeminentes. Em cada ponto de amostragem, foram retiradas amostras de terra nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade do solo.

Na camada de 0-5 cm, as amostras foram coletadas com o auxílio de uma espátula de aço inoxidável e, nas demais camadas, foi utilizado um trado holandês. As amostras coletadas em cada parcela foram agrupadas por camada, misturadas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 40-45°C, até atingirem peso constante.

Após a secagem, as amostras de terra foram peneiradas (malha de 2 mm), homogeneizadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises Químicas – Pesquisa, do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. No laboratório, as análises para a avaliação da fertilidade do solo foram realizadas de acordo com Raij et al. (2001), sendo:

- 1) O pH do solo (acidez ativa) foi determinado em suspensão de solo em 0,01 M de cloreto de cálcio, por meio de um peagâmetro.
- 2) A acidez total, constituída pelos íons H^+ adsorvidos à fase sólida do solo e pela hidrólise do alumínio ($Al^{3+} + H^+$), foi determinada na mesma suspensão de solo em 0,01 M de $CaCl_2$, acrescida de solução tampão SMP, por meio de um peagâmetro.
- 3) O alumínio (Al^{3+}), também conhecido como acidez trocável, foi extraído pelo mecanismo de troca iônica com KCl e determinado por titulometria, com 0,025 mol L^{-1} de NaOH e mistura indicadora de azul de bromotimol.
- 4) A matéria orgânica (MO) foi determinada pelo método Walkley-Black modificado, com a oxidação do carbono orgânico pelo dicromato de potássio em meio fortemente ácido. Após a digestão das amostras, a MO foi determinado por colorimetria em espectrofotômetro, com filtro de transmissão máxima de 650 nm.
- 5) O Fósforo, cálcio, magnésio e potássio foram extraídos com uma mistura de resinas trocadoras de íons catiônicos e aniônicos, saturadas com bicarbonato de sódio. Após o processo de extração, o fósforo (P_{resina}) foi determinado por colorimetria, com auxílio de um espectrofotômetro a 885 nm. O cálcio (Ca) e magnésio (Mg), misturados a solução padrão de lantânio, foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (AAS, em inglês), com lâmpadas de cátodo oco para Ca e Mg. Por sua vez, o potássio contido no extrato foi determinado diretamente por fotometria de chama, em AAS.
- 6) O enxofre contido nas amostras de solo, na forma de sulfatos ($S-SO_4^{2-}$), foi extraído por uma solução de fosfato de cálcio a 0,01 mol L^{-1} e determinado, após adição de cloreto de bário, por turbidimetria em um espectrofotômetro.
- 7) O nitrogênio (N) total foi determinado pelo método de micro-Kjeldahl, onde o N orgânico é convertido em NH_4^+ por digestão com H_2SO_4 em mistura com substâncias que agem como catalisadoras (Cu e Se) ou que promovem a conversão e ajudam a

manter a alta temperatura durante a digestão (K_2SO_4). A determinação do N_{total} em cada amostra de terra foi efetuada através da retrotitulação dos extratos com solução padronizada de H_2SO_4 .

- 8) Os micronutrientes Fe, Mn, Cu e Zn foram extraídos em solução contendo DTPA em pH 7,3 e a determinação destes elementos foi efetuada em espectrofotômetro de absorção atômica (AAS).
- 9) Outros atributos do solo foram determinados de forma indireta, através dos seguintes cálculos: a soma de bases (SB) foi determinada pela somatória dos teores de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} ; a capacidade de troca catiônica (CTC) foi obtida pela soma da SB e da acidez total ($H^+ + Al^{3+}$); a saturação por bases (V%) foi obtida pela expressão $(SB/CTC)*100$ e, por fim, a saturação pelo alumínio (m%) foi calculada pela expressão $(Al^{3+}/CTC)*100$.

2.2.4 Crescimento do tronco em circunferência

Em ambas as áreas AE-16 e AE-30, o crescimento do tronco das árvores em circunferência a altura do peito (CAP) foi avaliado por meio do uso de faixas dendrométricas, instaladas no tronco de 3 árvores por parcela (Figura 2.3) à 1,30 m de altura do solo. De modo geral, o crescimento das árvores em altura não é afetado significativamente pelo desbaste tardio (SULLIVAN et al., 2006), o que torna dispensável a sua avaliação.

Figura 2.3 – Árvore com placa de identificação (nº do Bloco/Tratamento/Árvore) e faixa dendrométrica instalada em seu tronco (A). Detalhe da faixa dendrométrica instalada no tronco de uma das árvores avaliadas no subprojeto 1 (B)

As árvores foram selecionadas com base na distribuição diamétrica dos indivíduos remanescentes após desbaste, sendo escolhida uma árvore da classe inferior, média e superior. Além disso, buscou-se selecionar árvores visualmente saudáveis, com fustes retos e distantes uma da outra em pelo menos 4 metros.

As faixas dendrométricas foram confeccionadas de acordo com a metodologia descrita por Sette Junior et al. (2010), sendo constituídas de: fita de aço inoxidável de 12,7 x 0,15 mm (largura e espessura), com escala em mm e nônio com precisão de leitura de 0,2 mm, além de uma mola de aço inoxidável de 100 x 8 mm (comprimento e diâmetro) para tração.

As avaliações na área AE-16 ocorreram por um período de 40 meses (novembro/2009 a abril/2013) e, na área AE-30, por um período de 27 meses (fevereiro/2011 a abril/2013). A leitura do deslocamento do nônio sobre a escala da faixa dendrométrica foi realizada a cada 15 dias, no período da manhã e seguindo um mesmo percurso.

2.2.5 Estado Nutricional das Plantas

A análise do estado nutricional dos eucaliptos foi efetuada em março de 2012, ou seja, 14 anos após a aplicação do lodo de esgoto (em 1998). Em cada área (AE-16 e AE-30) foi abatida 1 árvore média por parcela, totalizando 4 árvores por tratamento/área experimental. Em seguida, foram coletadas de cada árvore 200 folhas sem qualquer injúria, localizadas na base do terço superior da copa e correspondentes aos quatro pontos cardeais, conforme metodologia proposta por Bellote e Silva (2005).

Além das folhas, foram coletados também discos do tronco com ± 3 cm de espessura, a partir da base e daí em diante a cada 12,5% da altura comercial ($\varnothing \leq 6$ cm) de cada árvore. Em seguida, a casca e o lenho de cada disco do tronco foram separados com o auxílio de um facão. Após isto, foram retiradas 4 cunhas perpendiculares entre si de lenho e 4 porções de casca referentes a cada disco de tronco amostrado. As cunhas de lenho e as porções de casca foram agrupadas por parcela.

As amostras de cada parcela foram secas a 60-65°C em estufa de circulação forçada de ar, até atingirem peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais provenientes da moagem foram condicionados em sacos plásticos previamente identificados e em seguida encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes.

No laboratório, conforme metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989), as amostras vegetais foram digeridas das seguintes formas: 1) Digestão sulfúrica, para a

quantificação do nitrogênio; 2) Digestão por via seca (incineração), para a quantificação do boro e 3) Digestão nítrico-perclórica, para a quantificação dos demais nutrientes. Após a digestão das amostras, cada nutriente foi determinado da seguinte forma: o nitrogênio foi determinado pelo método de micro-Kjeldahl; o fósforo e o boro foram determinados por colorimetria; o enxofre foi determinado por turbidimetria e o potássio por fotometria de chama; por fim, os elementos cálcio, magnésio, ferro, cobre, manganês e zinco foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

2.2.6 Análises estatísticas

Inicialmente, os resultados foram aferidos quanto à presença de “outliers”, heterogeneidade da variância e escala da resposta. Nos casos onde foram necessárias transformações de dados, utilizou-se o método de potência ótima de Box-Cox. Depois de verificadas as pressuposições básicas estatísticas, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, comparados estatisticamente entre si através do teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Os valores das temperaturas média, máxima e mínima (°C), precipitação pluviométrica (mm), e umidade relativa média, máxima e mínima do ar (%), mensuradas na Estação Meteorológica de Itatinga-SP, entre o período de outubro/2009 a abril/2013, foram agrupados a cada 15 dias de modo a coincidir com as leituras das faixas dendrométricas. Depois disso, foi efetuada a análise de correlação de Pearson entre os resultados de incremento da circunferência dos troncos à altura do peito e as variáveis climáticas. Para as análises utilizou-se o software estatístico SAS (9.1) for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Fertilidade do solo, 13 anos após adubação com lodo de esgoto

A fertilidade do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e do Latossolo Vermelho Escuro (LVE), nas respectivas áreas experimentais AE-16 e AE-30, foi avaliada 13 anos depois da aplicação do lodo de esgoto (em 1998) nos plantios de eucalipto.

Como em 1998, o lodo de esgoto produzido pela ETE de Barueri-SP havia sido condicionado com cal, um dos principais efeitos residuais verificado em ambos latossolos foi a elevação do pH (Tabela 2.3). Está elevação ocorreu apenas na camada superficial do solo (0-5 cm), chegando a superar em 20% o pH observado no tratamento testemunha (T).

Tabela 2.3 - Atributos químicos do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE), submetidos aos tratamentos: Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e Efeito residual da adubação com lodo de esgoto, aplicadas há 13 anos em 1998

(continua)

Tratamento	Prof. 0 – 5 cm		Prof. 5 – 10 cm		Prof. 10 – 20 cm		Prof. 20 – 40 cm	
	LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE
<i>pH em 0,01 M de CaCl₂</i>								
<i>T</i>	3,46 Ab	3,69 Ab	3,82 Aa	3,88 Aa	3,84 Aa	3,79 Aa	3,84 Aa	3,78 Aa
<i>FM</i>	3,52 Ab	3,99 Aab	3,85 Aa	3,93 Aa	3,85 Aa	3,84 Aa	3,85 Aa	3,81 Aa
<i>LE</i>	4,24 Aa	4,38 Aa	3,91 Aa	4,12 Aa	3,94 Aa	3,97 Aa	3,86 Aa	3,85 Aa
<i>Matéria orgânica (g dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	37,3 Aa	38,5 Aa	16,3 Ba	21,5 Aa	13,9 Ba	18,0 Aa	12,9 Aa	15,1 Aa
<i>FM</i>	31,6 Aa	40,3 Aa	14,6 Ba	21,9 Aa	14,0 Ba	19,7 Aa	11,5 Ba	16,2 Aa
<i>LE</i>	36,6 Aa	42,1 Aa	17,6 Aa	21,4 Aa	16,2 Aa	19,7 Aa	12,0 Aa	13,0 Aa
<i>Fósforo resina (mg dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	5,5 Bb	7,3 Ab	4,0 Ba	5,3 Aa	4,4 Aa	4,9 Aa	3,9 Aa	3,8 Aa
<i>FM</i>	5,6 Bb	9,6 Ab	4,3 Ba	6,5 Aa	4,2 Ba	6,4 Aa	4,2 Aa	4,4 Aa
<i>LE</i>	24,3 Aa	16,3 Ba	4,7 Ba	6,0 Aa	4,8 Aa	5,8 Aa	4,6 Aa	3,8 Aa
<i>Enxofre (S-SO₄²⁻) (mg dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	4,8 Ba	8,0 Aa	5,5 Ba	9,6 Aa	5,2 Ba	9,2 Aa	4,9 Bab	9,1 Ab
<i>FM</i>	4,1 Ba	6,5 Aa	4,7 Ba	6,4 Aa	4,4 Ba	7,4 Aa	4,3 Bb	9,4 Ab
<i>LE</i>	5,3 Aa	6,7 Aa	5,6 Ba	7,8 Aa	5,8 Ba	9,3 Aa	6,6 Ba	14,9 Aa
<i>Potássio (K⁺) (mmolc dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	0,45 Ba	0,75 Aa	0,37 Ba	0,55 Aa	0,29 Ba	0,43 Aa	0,27 Ba	0,38 Aa
<i>FM</i>	0,43 Ba	0,88 Aa	0,30 Ba	0,57 Aa	0,31 Ba	0,58 Aa	0,29 Ba	0,40 Aa
<i>LE</i>	0,45 Ba	0,84 Aa	0,35 Ba	0,61 Aa	0,35 Ba	0,48 Aa	0,27 Aa	0,33 Aa
<i>Cálcio (Ca²⁺) (mmolc dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	0,68 Ab	2,77 Ab	0,20 Ab	0,54 Ab	0,27 Bb	0,76 Aa	0,25 Ab	0,25 Ab
<i>FM</i>	2,42 Ab	5,36 Ab	0,36 Ab	1,12 Aab	0,31 Ab	0,76 Aa	0,26 Ab	0,32 Ab
<i>LE</i>	19,75 Aa	21,14 Aa	2,84 Aa	4,47 Aa	1,99 Aa	4,06 Aa	1,10 Aa	2,05 Aa
<i>Magnésio (Mg²⁺) (mmolc dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	0,84 Ab	1,73 Ab	0,52 Bb	1,27 Aab	0,48 Ba	0,89 Ab	0,40 Ba	0,69 Ab
<i>FM</i>	4,81 Aa	6,26 Aa	1,02 Ba	3,08 Aa	0,79 Ba	2,88 Aa	0,63 Ba	1,57 Aa
<i>LE</i>	1,23 Bb	2,96 Aab	0,57 Bab	1,12 Ab	0,52 Ba	1,13 Ab	0,42 Ba	0,62 Ab
<i>Alumínio (Al³⁺) (mmolc dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	23,6 Aa	23,5 Aa	12,7 Aa	17,3 Aa	11,3 Ba	16,6 Aa	9,4 Ba	14,5 Aa
<i>FM</i>	18,1 Aa	20,6 Aa	10,9 Aa	15,4 Aa	10,8 Ba	15,1 Aa	8,6 Ba	14,6 Aa
<i>LE</i>	4,4 Ab	1,8 Ab	10,0 Aa	10,3 Aa	9,9 Aa	11,7 Aa	8,6 Ba	12,4 Aa
<i>Acidez potencial (Al³⁺+H⁺) (mmolc dm⁻³)</i>								
<i>T</i>	163,3 Aa	174,1 Aa	80,6 Ba	120,3 Aa	72,0 Ba	110,3 Aa	59,9 Ba	98,2 Aa
<i>FM</i>	138,9 Aab	135,3 Aa	72,0 Ba	113,6 Aa	64,7 Ba	109,9 Aa	58,3 Ba	101,0 Aa
<i>LE</i>	86,8 Ab	100,8 Aa	76,3 Aa	97,8 Aa	71,7 Ba	96,1 Aa	59,8 Ba	91,2 Aa

Tabela 2.3 - Atributos químicos do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE), submetidos aos tratamentos: Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e Efeito residual da adubação com lodo de esgoto, aplicadas há 13 anos em 1998

Tratamento	(conclusão)							
	Prof. 0 – 5 cm		Prof. 5 – 10 cm		Prof. 10 – 20 cm		Prof. 20 – 40 cm	
	LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Soma de bases (mmolc dm⁻³)</i>								
T	2,0 Ab	5,4 Ab	1,1 Bb	2,6 Aa	1,1 Ba	2,1 Ab	0,9 Aa	1,3 Aa
FM	8,6 Aab	12,9 Aab	1,8 Bab	5,0 Aa	1,5 Bab	4,4 Aab	1,2 Ba	2,4 Aa
LE	21,4 Aa	25,1 Aa	4,0 Aa	6,8 Aa	2,9 Aa	5,9 Aa	1,8 Aa	2,1 Aa
<i>Capacidade de troca catiônica (mmolc dm⁻³)</i>								
T	165,3 Aa	180,4 Aa	81,7 Ba	123,2 Aa	73,1 Ba	112,4 Aa	60,9 Ba	99,5 Aa
FM	149,1 Aa	149,6 Aa	74,0 Ba	119,1 Aa	66,3 Ba	114,7 Aa	59,6 Ba	103,5 Aa
LE	109,1 Aa	128,5 Aa	81,4 Aa	107,3 Aa	75,6 Ba	103,8 Aa	61,8 Ba	93,8 Aa
<i>Saturação por bases (%)</i>								
T	1,2 Ab	2,9 Ab	1,4 Ab	2,1 Aa	1,5 Aa	1,9 Aa	1,1 Aa	1,1 Ab
FM	5,5 Aa	8,5 Aab	2,3 Aab	4,2 Aa	2,2 Aa	3,7 Aa	1,1 Aa	1,2 Aa
LE	19,4 Aa	19,3 Aa	4,7 Aa	5,5 Aa	3,6 Aa	4,8 Aa	1,2 Aa	1,2 Aa
<i>Saturação por alumínio (%)</i>								
T	14,3 Aa	12,9 Aa	15,6 Aa	14,2 Aa	15,7 Aa	14,8 Aa	15,4 Aa	14,6 Aa
FM	12,1 Aa	12,1 Aa	15,0 Aa	12,9 Aab	16,3 Aa	13,0 Aab	14,4 Aa	14,1 Aa
LE	4,0 Ab	1,6 Ab	12,9 Aa	10,2 Ab	13,0 Aa	10,9 Ab	14,7 Aa	13,1 Ba
<i>Nitrogênio total (mg kg⁻¹)</i>								
T	1253,0 Aa	1673,0 Aa	...	...	...	...	...	...
FM	1158,5 Ba	1964,7 Aa	...	...	...	...	...	...
LE	1319,5 Ba	1806,0 Aa	...	...	...	...	...	...
<i>Cobre (mg dm⁻³)</i>								
T	0,43 Bb	2,09 Ab	0,63 Bb	2,31 Aa	0,64 Bb	2,31 Aa	0,60 Bb	2,67 Aa
FM	0,43 Bb	2,22 Ab	0,66 Bb	2,51 Aa	0,63 Bb	2,66 Aa	0,66 Bb	2,62 Aa
LE	3,07 Aa	3,62 Aa	1,34 Ba	2,71 Aa	1,20 Ba	2,56 Aa	0,83 Ba	2,35 Aa
<i>Ferro (mg dm⁻³)</i>								
T	122,1 Ab	95,1 Aa	59,4 Ab	43,5 Aa	52,9 Ab	35,2 Aa	37,1 Aa	30,7 Aa
FM	119,6 Ab	87,0 Ba	62,5	51,3 Aa	50,4 Ab	46,7 Aa	38,6 Aa	33,4 Aa
LE	148,2 Aa	144,1 Ba	82,3 Aa	55,2 Ba	71,1 Aa	43,0 Ba	44,6 Aa	27,6 Ba
<i>Manganês (mg dm⁻³)</i>								
T	0,77 Bc	5,71 Aa	0,33 Ba	2,06 Aa	0,31 Ba	1,81 Aa	0,26 Ba	1,33 Aa
FM	1,37 Bb	7,85 Aa	0,45 Ba	2,09 Aa	0,34 Ba	1,76 Aa	0,29 Ba	1,15 Aa
LE	4,70 Aa	14,45 Aa	0,71 Ba	3,44 Aa	0,61 Ba	2,88 Aa	0,39 Ba	1,49 Aa
<i>Zinco (mg dm⁻³)</i>								
T	0,30 Ac	0,50 Ac	0,11 Ab	0,27 Ac	0,09 Ab	0,20 Ab	0,11 Ab	0,08 Ab
FM	4,57 Ab	4,41 Ab	1,05 Aa	1,11 Ab	0,67 Aa	0,80 Aa	0,33 Aa	0,19 Aab
LE	15,83 Aa	10,83 Aa	3,01 Aa	2,74 Aa	2,22 Aa	1,81 Aa	1,02 Aa	0,36 Aa

Nota: Para cada atributo químico e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada profundidade e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

... Dado numérico não disponível

Contrariamente ao que se esperava, os teores de matéria orgânica (MO) no solo do tratamento LE não foram significativamente superiores em relação ao solo sem qualquer adubação ou sob efeito residual da fertilização mineral (Tabela 2.3). Vale destacar, entretanto, que o método empregado para a análise de MO nas amostras de solo (método da via úmida) permite quantificar apenas o carbono orgânico (CO) facilmente oxidável (CANTARELLA; QUAGGIO; RAIJ, 2001). Formas recalcitrantes de CO no solo (*e.g.* substâncias húmicas) ou que estejam “protegidas” pela formação de microagregados não são quantificadas pelo método da via úmida (DICK et al., 2009). Portanto, o efeito residual do lodo sobre o teor de MO poderia ser perceptível apenas nas frações recalcitrantes do CO em ambos os solos.

O teor de fósforo resina (P_{resina}) na camada de superficial (0-5 cm) de ambos os solos foi significativamente maior no tratamento LE comparado aos tratamentos T e FM. No solo LVA, o teor de P_{resina} no tratamento LE foi cerca de 4 vezes maior comparado aos demais tratamentos, ao passo que, no solo LVE, este teor foi cerca de duas vezes maior. Este efeito residual do lodo sobre o teor de P_{resina} não foi constatado nas demais profundidades dos solos.

Moffat, Mathews e Hall (1991) estudaram o efeito do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo em plantios de *Pinus nigra* var. *marítima* e verificaram que a concentração de fósforo na camada de 0-15 cm do solo foi 5 vezes maior no tratamento com $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de lodo, mesmo após 5 anos da sua aplicação, em comparação ao tratamento controle.

O enxofre (S-SO_4^{2-}), por apresentar-se na forma aniônica na solução do solo, tende a lixiviar para as camadas mais profundas em solos fortemente intemperizados (RAIJ, 2008); por isso, os teores S-SO_4^{2-} no tratamento LE foram significativamente maiores aos demais tratamentos apenas na camada de 20-40 cm de ambos os solos. Nas demais camadas superiores do solo (0-20 cm), os teores de S-SO_4^{2-} foram similares entre os tratamentos e maiores no LVE comparados ao LVA.

Os teores de cálcio (Ca^{2+}) no tratamento com lodo de esgoto foram significativamente superiores aos tratamentos T e FM, em todas as profundidades de ambos os solos. No tratamento LE, os teores de Ca^{2+} foram de 4 a 29 vezes maiores em comparação ao tratamento T, sendo constadas maiores diferenças no LVA em relação ao LVE. Este resultado se deve ao tipo de condicionamento do lodo (com CaO e FeCl_3) na época de sua aplicação (em 1998), o que acarretou uma adição de grande quantidade de cálcio ao solo (1728 kg ha^{-1}).

Em contrapartida, o teor de magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-5 cm de ambos os solos foi cerca de 4 vezes maior no tratamento FM comparado aos tratamentos T e LE. Neste caso, a calagem efetuada há 13 anos no tratamento FM continua agindo sobre a fertilidade de ambos os solos, principalmente no LVE, proporcionando maior teor de Mg^{2+} .

Constatou-se que os teores de cobre (Cu) na camada de 0-5 cm nos dois tipos de solo foram cerca de 6 vezes maiores no tratamento LE em comparação aos tratamentos T e FM. No solo LVA, o efeito residual do lodo de esgoto sobre o teor de Cu propagou-se até a camada mais profunda (20-40 cm), sendo de 30 a 100% superior aos tratamentos T e FM. Por sua vez, o teor de zinco (Zn) na camada de 0-5 cm de ambos os solos também foi superior nos tratamentos LE, chegando a ser 50 e 35 vezes maior, respectivamente, que a concentração de Zn nos tratamentos T e FM.

Roijs et al. (2012), ao estudarem o efeito do lodo de esgoto sobre as propriedades químicas de um solo com textura médio-argilosa, constaram que a aplicação de lodo por 16 anos consecutivos elevou em 30% a concentração de cobre e zinco no solo em comparação ao tratamento controle. Segundo esses autores, a adubação com uma determinada quantidade de lodo de esgoto pode, em pequenas doses distribuídas ao longo do tempo, exercer o mesmo efeito benéfico sobre a fertilidade do solo se comparada a uma única aplicação concentrada de lodo; além disso, minimiza possíveis impactos ambientais negativos.

2.3.2 Crescimento do tronco em circunferência

Logo após o desbaste nas áreas AE-16 e AE-30, no início desta pesquisa, os eucaliptos remanescentes apresentavam tamanhos semelhantes (CAP e Altura) entre os diferentes tratamentos nas respectivas áreas experimentais (Tabela 2.4). Em contrapartida, os tamanhos das árvores de um mesmo tratamento eram significativamente diferentes entre as duas áreas.

Tabela 2.4 – Circunferência à altura do peito (CAP), altura total e volume de madeira das árvores remanescentes de *Eucalyptus grandis* nas áreas AE-16 e AE-30, após os desbastes de 2009 e 2010, respectivamente, de acordo com os tratamentos (TRAT.): Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE)

SOLO/ÁREA	TRAT.	CAP (cm)	Altura (m)	Volume do tronco (m ³ árvore ⁻¹)
LVA (AE-16)	T	62,2 b	23,0 b	0,34 b
	FM	65,8 b	24,6 b	0,39 b
	LE	62,3 b	23,8 b	0,34 b
LVE (AE-30)	T	87,6 a	40,8 a	1,32 a
	FM	86,5 a	41,9 a	1,30 a
	LE	89,2 a	42,5 a	1,41 a

Nota: Para cada atributo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). As siglas LVA e LVE correspondem aos seguintes tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Escuro, respectivamente.

Verifica-se que os valores médios da CAP, a altura do fuste e o volume de madeira das árvores remanescentes na área AE-30 foram cerca de 40%, 75% e 270%, respectivamente, superiores em relação aos eucaliptos remanescentes na área AE-16. Com base na tabela 2.4,

pode-se observar que a condição dos povoamentos quanto ao porte inicial das árvores, logo após o desbaste, era: homogênea entre os tratamentos dentro da mesma área experimental, mas diferenciada entre áreas experimentais para um mesmo tratamento. Estes resultados corroboram as diferenças de qualidade de sítio entre áreas, principalmente no que diz respeito à fertilidade do solo, em função do maior ou menor teor de argila.

Conforme mencionado no item 2.2.3, os desbastes nas áreas AE-16 e AE-30 (implantadas em 1998) foram realizados em momentos distintos (outubro/2009 e novembro/2010, respectivamente); assim, os resultados de crescimento são apresentados e discutidos separadamente para cada área de estudo.

A partir do momento em que foi efetuado o desbaste, os incrementos quinzenais do tronco das árvores em circunferência à altura do peito (CAP) foi, na maioria dos períodos, similar entre os tratamentos tanto na área AE-16 (Figura 2.4) quanto na área AE-30 (Figura 2.5). Estes resultados podem estar relacionados: (1) Ao fato das árvores com 11 anos (em LVA) ou 12 anos de idade (em LVE) possuírem um sistema radicular extenso, permitindo explorar um grande volume de solo e, conseqüentemente, absorver quantidades de nutrientes suficientes para assegurar a demanda nutricional e o crescimento contínuo; (2) Nesta fase adulta das árvores, o ciclo bioquímico (translocação interna de nutrientes na planta) está em plena atividade, permitindo que os eucaliptos dependam muito menos dos nutrientes prontamente disponíveis no solo para a sua nutrição (PRITCHETT, 1979) e (3) Logo após o desbaste, a alocação dos carboidratos é prioritariamente destinada à recomposição da copa, que está mais exposta à radiação, em detrimento do crescimento em altura e diâmetro do tronco das árvores (MONTE et al., 2009).

Na área AE-30, com Latossolo Vermelho Escuro (LVE), os tratamentos também proporcionaram incrementos da CAP relativamente equivalentes entre si, havendo poucos momentos em que os tratamentos LE e FM proporcionaram maior incremento da CAP em relação ao tratamento T (Figura 2.5). Por outro lado, na área com Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), o incremento quinzenal da CAP das árvores, após a prática de desbaste, foi em alguns momentos significativamente maior no tratamento T em comparação os demais tratamentos (Figura 2.4).

De acordo a figura 2.4, os incrementos quinzenais da CAP do tronco das árvores cultivadas em LVA foi em média 140% maior (cerca de 1 mm superior) no tratamento T, superando os demais tratamentos em 50 a até 400% (de 0,6 a 1,4 mm). Comparativamente, as maiores diferenças entre os incrementos da CAP nos tratamentos T, FM e LE foram observadas nos períodos de menor precipitação ou até ausência de chuvas.

Figura 2.4 – Crescimento quinzenal da CAP dos troncos das árvores de *E. grandis*, cultivadas após desbaste (2009) em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), em função dos tratamentos: Testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE), aplicadas há 13 anos em 1998. Para um mesmo dia (direção vertical), entre tratamentos, médias acompanhadas por retângulos de mesma cor (branco ou preto) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$), assim como às médias sem retângulo não diferem entre si pelo teste F ($P > 0,05$)

Figura 2.5 – Crescimento quinzenal da CAP dos troncos das árvores de *E. grandis*, cultivadas após desbaste (2010) em Latossolo Vermelho Escuro (LVE), em função dos tratamentos: Testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE), aplicadas há 13 anos em 1998. Para um mesmo dia (direção vertical), entre tratamentos, médias acompanhadas por retângulos de mesma cor (branco ou preto) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$), assim como às médias sem retângulo não diferem entre si pelo teste F ($P > 0,05$)

Por estarem estabelecidas em um sítio de baixa fertilidade natural, as árvores cultivadas no tratamento T, provavelmente, tornaram-se mais rústicas e resistentes às condições ambientais adversas (ex. períodos de déficit hídrico), permitindo que elas mantivessem maiores taxas de crescimento do tronco em comparação aos tratamentos adubados com fertilizante mineral ou com lodo de esgoto.

Segundo GONÇALVES e MELLO (2005), a alocação de fotoassimilados para as raízes é, nas árvores, determinada pela maior ou menor disponibilidade de água e nutrientes no solo, sendo comum observar-se uma maior produção de biomassa radicular em relação à biomassa aérea em sítios de baixa fertilidade natural ou que não foram adequadamente manejados (ex. preparo de solo e adubação). Consequentemente, plantas com sistema radicular mais desenvolvido possuem maior habilidade e abrangência para a captação de água e nutrientes do solo (PRITCHETT, 1979), o que as torna menos sensíveis às condições de estresse hídrico (MARTINS et al., 2004).

De modo geral, observa-se que os incrementos da CAP (Figura 2.4 e 2.5), ao longo do período experimental, foram significativamente superiores no período de outubro a março, quando há predominância de chuvas prolongadas e temperaturas elevadas, se comparado ao período de abril a setembro (com estiagem e frio). Segundo Sette Junior et al. (2010), o período de máximo crescimento do tronco das árvores pode ser relacionado aos altos níveis de precipitação e temperatura e ao baixo déficit de pressão de vapor, ao estágio fenológico das árvores (copa formada, folhas maduras com limbo expandido) e à disponibilidade de água no solo e de horas de luz/dia.

Em ambos os solos (LVA e LVE), as árvores submetidas aos três tratamentos apresentaram picos de incremento corrente da CAP entre janeiro e fevereiro, com valores entre 3 a 4 mm por quinzena. Por outro lado, as menores taxas de incremento da CAP foram observadas nos períodos de menores temperaturas e precipitação (ex. agosto), sendo observada inclusive a estagnação completa do crescimento da CAP dos eucaliptos.

Entretanto, no experimento conduzido em LVE, não foi constatada a estagnação completa do crescimento (incremento da CAP $\leq 0,00$ mm) dos eucaliptos, como observado na área experimental com LVA; visto que nesta área, as árvores cultivadas nos tratamentos FM e LE apresentaram incrementos médios da CAP negativos ao 315° e o 405° dia após o desbaste (entre os meses de agosto e setembro/2010).

A obtenção de valores negativos no cálculo de incremento da CAP pode indicar ausência de crescimento das árvores e/ou contração da casca devido à perda de água, principalmente durante períodos de elevado déficit hídrico. A princípio, a retratibilidade se

deve ao fato das moléculas de água estarem ligadas por pontes de hidrogênio às microfibrilas dos polissacarídeos que formam a casca ou madeira, e quando estas são forçadas a sair, deixam um espaço vazio, e as forças de coesão tendem a reaproximar as microfibrilas, causando a contração da madeira como um todo (OLIVEIRA; TOMAZELLO FILHO; FIEDLER, 2010).

Segundo Sette Junior et al. (2010), as árvores expressam o estímulo em crescimento do tronco em resposta às variáveis climáticas após um intervalo de tempo considerado como “período de defasagem” (*lag fase*, em inglês). Ao realizar a análise de correlação de Pearson, verificou-se que a precipitação, a temperatura média e a umidade média relativa do ar correlacionaram-se significativamente com os incrementos correntes da CAP observados. Isto ocorreu semelhantemente para todos os tratamentos e em ambos os solos (LVA e LVE), de acordo com as seguintes *lag fases*:

- 1) A umidade relativa do ar média correlacionou-se positivamente com o incremento corrente da CAP ($r_{\text{médio}} = 0,350$ e $p < 0,02$) sem período de defasagem;
- 2) A precipitação correlacionou-se positivamente com o incremento corrente da CAP ($r_{\text{médio}} = 0,276$ e $p < 0,01$) com período de defasagem de 28 dias;
- 3) A temperatura média do ar correlacionou-se diretamente com o incremento corrente da CAP ($r_{\text{médio}} = 0,363$ e $p < 0,01$) com período de defasagem de 42 dias.

Estes resultados estão em consonância com Laclau et al. (2003), segundo os quais às árvores de eucalipto formam raízes finas e produzem fotoassimilados em resposta às variações climáticas, ativando o crescimento em diâmetro do tronco após uma defasagem de aproximadamente 28 dias, principalmente, em resposta às variações da precipitação.

Observa-se na figura 2.6, que após 720° dia de avaliação, as árvores de *E. grandis* cultivadas em LVA já apresentavam incrementos acumulados da CAP significativamente superiores no tratamento T em relação ao tratamento FM. Com isso, o incremento acumulado da CAP ao 1305° dia foi 50 mm maior no tratamento T ou, em outras palavras, 50% superior em comparação ao tratamento FM. No entanto, o incremento acumulado da CAP em LE foi estatisticamente similar aos demais tratamentos, atingindo um valor médio 126 mm ao final dos três anos e meio de avaliação.

Figura 2.6 – Crescimento acumulado da CAP dos troncos das árvores de *E. grandis*, cultivadas após desbaste em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), entre 11/09 e 03/13, em função dos tratamentos: Testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE), aplicadas há 13 anos em 1998. Para o período final de avaliação, no 1305º dia, médias acompanhadas por uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$)

Sette Junior et al. (2012), ao estudarem o incremento da circunferência do tronco em resposta às variações climáticas e à prática de fertilização, verificaram que o tratamento controle (sem adubação) também apresentou o crescimento quinzenal e o crescimento acumulado maior em relação aos tratamentos com fertilização mineral ou com aplicação de lodo de esgoto. Os mesmos autores explicam que este resultado poderia estar atrelado ao estoque natural de nitrogênio no solo, o que possibilitou às árvores do tratamento T obter um adequado crescimento ao longo do tempo.

No Latossolo Vermelho Escuro, não foram constatadas diferenças significativas ao longo do tempo entre os tratamentos quanto ao incremento acumulado da CAP (Figura 2.7), que ao final do período de avaliação (ao 810º dia) alcançou o valor médio de 90 mm para os três tratamentos. Neste caso, a falta de resposta das árvores ao efeito residual do lodo de esgoto pode ser atribuída à maior fertilidade natural do Latossolo Vermelho Escuro (com maior teor de argila), que de certa forma pode ter minimizado a evidência do efeito residual do lodo sobre o crescimento das plantas.

O fato das árvores remanescentes, após o desbaste, não terem apresentado respostas positivas ao efeito residual do lodo de esgoto, principalmente quando cultivadas em LVE, não

comprova a hipótese inicial desta pesquisa. Talvez, alguma resposta positiva poderia ter sido observada caso fossem aplicadas ao solo doses mais elevadas (> 20 toneladas por hectare) de lodo de esgoto.

Figura 2.7 – Crescimento acumulado da CAP dos troncos das árvores de *E. grandis*, cultivadas após desbaste em Latossolo Vermelho Escuro (LVE), entre 02/11 e 03/13, em função dos tratamentos: Testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE), aplicadas há 13 anos em 1998. Para o período final de avaliação, no 810º dia, médias acompanhadas por uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Moffat, Mathews e Hall (1991) ressaltam a capacidade que árvores adultas (com mais de 30 anos) têm de responder à adubação com lodo de esgoto, mesmo vários anos após a sua aplicação ao solo. Estes autores, ao estudarem os efeitos do lodo sobre o crescimento de árvores de *Pinus nigra* var. *maritima*, com aproximadamente 32 anos de idade, verificaram que a adubação com 200 e 400 m³ ha⁻¹ de lodo proporcionou (após 5 anos) maior volume de madeira (cerca de 50%) em comparação ao tratamento sem qualquer adubação. No entanto, vale ressaltar, que as doses de lodo utilizadas no estudo de Moffat, Mathews e Hall (1991) foram muitas vezes superiores à dose de lodo aplicada nesta pesquisa.

2.3.3 Nutrição mineral das árvores de *E. grandis*

Mesmo depois de 14 anos da aplicação do lodo de esgoto ao solo, a concentração foliar de fósforo nas árvores de *E. grandis* cultivadas em LVA foi aproximadamente 35% superior no tratamento LE em relação à testemunha (Tabela 2.5). Além disso, a concentração

de fósforo (P) na casca das árvores também foi superior no tratamento LE, superando em até 3 vezes a concentração de P na casca das árvores do tratamento T.

Tabela 2.5 – Concentração de nutrientes nas folhas, lenho e casca das árvores de *E. grandis*, cultivadas em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE), nos tratamentos (TRAT.): Testemunha (T); Efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com lodo de esgoto (LE)

Nutriente	TRAT.	----- FOLHAS -----		----- LENHO -----		----- CASCA -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE
Nitrogênio (g kg ⁻¹)	T	14,01 Ba	18,89 Aa	1,25 Aa	1,04 Aa	3,08 Aa	3,30 Aa
	FM	15,14 Ba	18,02 Aa	1,12 Aa	1,19 Aa	2,95 Ba	3,42 Aa
	LE	16,03 Ba	18,55 Aa	1,20 Aa	1,04 Aa	3,13 Aa	3,25 Aa
Fósforo (g kg ⁻¹)	T	0,835 Bb	1,128 Aa	0,517 Aa	0,258 Ba	0,285 Ab	0,261 Aa
	FM	0,875 Aab	0,997 Aa	0,330 Aa	0,309 Aa	0,410 Aab	0,460 Aa
	LE	1,123 Aa	1,074 Aa	0,345 Aa	0,279 Aa	0,850 Aa	0,445 Aa
Potássio (g kg ⁻¹)	T	3,2 Aa	3,9 Aa	0,2 Aa	0,2 Aa	1,7 Aa	1,7 Aa
	FM	3,5 Aa	3,7 Aa	0,2 Aa	0,2 Aa	1,7 Aa	1,6 Aa
	LE	2,6 Ba	3,8 Aa	0,2 Aa	0,2 Aa	1,4 Aa	2,0 Aa
Cálcio (g kg ⁻¹)	T	4,77 Ab	4,75 Aab	0,21 Ab	0,22 Ab	17,69 Ab	19,23 Ab
	FM	4,41 Ab	4,16 Ab	0,21 Ab	0,27 Aab	14,82 Ab	21,12 Ab
	LE	10,44 Aa	6,40 Aa	0,48 Aa	0,47 Aa	37,12 Aa	33,84 Aa
Magnésio (g kg ⁻¹)	T	1,69 Aab	1,90 Aa	0,058 Aab	0,047 Aa	1,49 Aa	1,42 Aa
	FM	1,78 Aa	1,68 Aa	0,063 Aa	0,064 Aa	1,51 Aa	2,16 Aa
	LE	1,13 Ab	1,47 Aa	0,035 Ab	0,052 Aa	0,87 Ba	1,87 Aa
Enxofre (g kg ⁻¹)	T	0,862 Aa	0,949 Aa	0,667 Aa	0,532 Aa	0,360 Aa	0,417 Aa
	FM	1,043 Aa	1,032 Aa	0,305 Aab	0,384 Aa	0,359 Aa	0,363 Aa
	LE	1,094 Aa	1,187 Aa	0,273 Ab	0,282 Aa	0,359 Aa	0,373 Aa
Boro (mg kg ⁻¹)	T	17,66 Aab	19,15 Aa	2,34 Aa	2,01 Aab	8,10 Aa	8,53 Aa
	FM	27,50 Aa	19,05 Aa	2,44 Aa	2,94 Aa	8,06 Aa	8,36 Aa
	LE	12,69 Ab	16,27 Aa	2,46 Aa	1,23 Bb	7,51 Aa	7,89 Aa
Cobre (mg kg ⁻¹)	T	8,28 Aa	8,48 Aa	0,80 Aa	0,79 Aa	2,48 Ab	2,65 Aa
	FM	7,28 Aa	8,88 Aa	0,68 Aa	0,78 Aa	2,55 Ab	2,68 Aa
	LE	8,15 Aa	7,70 Aa	0,94 Aa	0,68 Aa	3,55 Aa	3,08 Aa
Ferro (mg kg ⁻¹)	T	85,63 Aa	88,63 Aa	6,55 Aa	4,99 Aa	51,43 Aa	73,13 Aa
	FM	83,68 Aa	90,65 Aa	5,14 Aa	5,04 Aa	81,38 Aa	64,78 Aa
	LE	58,58 Aa	86,73 Aa	3,60 Aa	4,24 Aa	61,08 Aa	52,63 Aa
Manganês (mg kg ⁻¹)	T	238,7 Aa	504,4 Aa	13,91 Aa	19,15 Aa	316,0 Aa	444,8 Aab
	FM	193,2 Bab	275,1 Ab	10,00 Aa	14,71 Aab	191,2 Bab	608,7 Aa
	LE	130,5 Ab	308,2 Aab	3,43 Bb	9,31 Ab	70,6 Bb	350,6 Ab
Zinco (mg kg ⁻¹)	T	8,88 Ab	10,08 Aa	1,59 Aa	1,10 Aa	3,78 Aa	6,58 Aa
	FM	8,61 Ab	8,95 Aa	1,16 Aa	1,16 Aa	3,23 Ba	7,23 Aa
	LE	14,53 Aa	10,30 Aa	1,53 Aa	1,44 Aa	6,35 Ba	9,95 Aa

Nota: Para cada nutriente, tipo de solo e componente aéreo das árvores (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada nutriente, componente aéreo das árvores e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Moffat, Mathews e Hall (1991) estudaram o efeito do lodo de esgoto sobre a nutrição mineral em plantios de *Pinus nigra* var. *marítima* e verificaram que a concentração de fósforo nas acículas foi, 5 anos após da adubação com lodo, 50% maior em comparação ao tratamento controle, sem qualquer adubação.

Observa-se na tabela 2.5, que as concentrações de cálcio nas folhas, lenho e casca das árvores de *E. grandis* cultivadas em ambos os solos (LVA e LVE) foram significativamente superiores no tratamento LE em comparação ao tratamento T e, em alguns casos, também em relação ao efeito residual da fertilização mineral (FM). Dessa forma, as concentrações de cálcio (Ca) no lenho chegaram a ser 100% maiores no tratamento LE em relação aos demais tratamentos e, na casca e folhas, esta diferença subiu para 140%.

No Latossolo Vermelho Amarelo, a concentração de magnésio (Mg) nas folhas e lenho das árvores de *E. grandis* foi significativamente menor (até 80%) no tratamento LE em relação ao tratamento FM. Isto pode ser atribuído à calagem do solo (em 1998) no tratamento FM e, conseqüentemente, ao seu respectivo efeito residual positivo sobre o teor de magnésio no solo, bem como ao efeito residual positivo do lodo de esgoto sobre a concentração de cálcio. Segundo Vitti, Lima e Cicarone (2006), o Ca pode competir com o magnésio no solo pelos sítios de absorção da raiz das plantas.

Segundo a tabela 2.5, as concentrações de cobre (Cu) nas folhas, casca e lenho das árvores cultivadas em LVA e LVE foi similar entre os todos os tratamentos, com exceção da casca das árvores no tratamento LE-LVA, cuja concentração de Cu foi aproximadamente 40% superior àquelas observadas nos tratamentos T e FM.

Em ambos os solos, observou-se que a adubação com lodo de esgoto exerceu efeito residual negativo sobre a concentração de manganês (Mn) nas folhas, lenho e casca das árvores de *E. grandis*, alcançando concentrações até 4 vezes menores no tratamento LE (Tabela 2.5). Em contrapartida, a concentração foliar de zinco (Zn) nas árvores cultivadas em LVA foi cerca de 60% superior no tratamento LE comparado aos demais tratamentos. Contudo, as concentrações de Zn e Mn nas folhas mantiveram-se acima da faixa de deficiência ($Zn < 7 \text{ mg kg}^{-1}$ e $Mn < 100 \text{ mg kg}^{-1}$) preconizada por Silveira et al. (2005).

2.4 Conclusões

A adubação com lodo de esgoto em plantios de *E. grandis*, 13 anos após a sua aplicação em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE), exerceu efeito residual positivo sobre a fertilidade do solo, elevando significativamente o pH

e os teores de fósforo, cálcio, zinco e enxofre na camada de 0-40 cm de profundidade. Em geral, os efeitos residuais do lodo de esgoto foram maiores no Latossolo Vermelho Amarelo, com maior teor de areia, em comparação ao Latossolo Vermelho Escuro, com maior teor de argila.

O lodo de esgoto aplicado ao solo em 1998 não evidenciou efeito residual sobre o incremento quinzenal da circunferência do tronco à altura do peito (CAP) das árvores de *E. grandis*, bem como sobre o crescimento acumulado da CAP do tronco, após desbaste tardio das árvores, cultivadas em Latossolo Vermelho Amarelo ou em Latossolo Vermelho Escuro. A precipitação pluviométrica, a temperatura média e a umidade relativa do ar correlacionaram-se positivamente com os incrementos correntes da CAP.

A disposição do lodo de esgoto em plantios de *E. grandis*, mesmo após 14 anos da sua aplicação ao solo (LVA e LVE), propiciou efeito residual positivo sobre a concentração de cálcio nas folhas, lenho e casca das árvores remanescentes após o desbaste tardio (2009). Além disso, o efeito residual do lodo elevou também a concentração foliar de fósforo e zinco nas árvores cultivadas em LVA, mas reduziu a concentração de manganês nas folhas, lenho e casca das árvores cultivadas também em LVE.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013, ano base 2012**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 25 ago.2013.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONGALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 105-133.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, SP: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (IAC, Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.C. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. Viçosa, MG: UFV, 2009. 548p.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agronômico, 2001. p. 173-180.

DIAS, A.N.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; COUTO, L.; CARVALHO, A.F. de. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 731-739, 2005.

DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. XI – Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L.R.F. (Edit.). **Química e Mineralogia do Solo: Parte II - Aplicações**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 1-67.

FROST, H.L.; KETCHUM JR, L.H. Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer. **Advances in Environmental Research**, London, v. 4, n. 4, p. 347-355, 2000.

GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACALU, J.P., SMETHURST, P., GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 45–61, 2004.

GONGALVES, J. L. de M.; MELLO, S. L. de M. O sistema radicular das árvores. In: GONGALVES, J. L. de M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 219-267.

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

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

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; NZILA, J. de D.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of eucalyptus and an adjacent savana ecosystem in Congo: chemical composition of rainfall, through fall and stem flow solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.176, n.1/3, p.105-119, 2003.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L. de M.; MAQUÈRE, V.R.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M. de C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1771-1785, 2009.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; SOUZA, A.L. de; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 271-280, 2005.

LIMA, I.L. de; GARCIA, J.N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 551-559, 2010.

MARTINS, L.F. da S.; POGGIANI, F.; OLIVEIRA, R.F. de; GUEDES, M.C.; GONÇALVES, J.L. de 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.

MAGESAN, G. N.; WANG, H. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: an overview. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 41, n. 1, p. 557-569, 2003.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A de. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MELO, W.J. de; AGUIAR, P. de S.; MELO, G.M.P. de; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Nickel in a tropical soil treated with sewage sludge and cropped with maize in a long-term field study. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 39, n. 6, p. 1341-1347, 2007.

MOFFAT, A.J.; MATHEWS, R.W.; HALL, J.E. The effects of sewage sludge on growth and foliar and soil chemistry in pole-stage Corsican pine at Ringwood Forest, Dorset, UK. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 21, n. 6, p. 902-909, 1991.

MONTE, M.A.; REIS, M. das G.F.; REIS, G.G. dos; LEITE, H.G.; CACAU, F.V.; ALVES, F. de F. Crescimento de um clone de eucalipto submetido a desrama e desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 777-787, 2009.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, SP: SBS, 2000. 112p.

OLIVEIRA, J.T. da S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N.C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PRITCHETT, W.L. **Properties and management of forest soils**. New York, USA: John Wiley, 1979. 550p.

RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1987. 170p.

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

RAIJ, B.van. **Gesso na agricultura**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2008. 233p.

RETSLAFF, F.A. de S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A.N.; BERNETT, L.G.; FIGURA, M.A. Prognose do crescimento e da produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no sul do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 719-732, 2012.

REZENDE, C.I. de O. **Influência da aplicação do lodo de esgoto (biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do sub-bosque, na serapilheira e no solo de um talhão de *E. grandis***. 2005. 81p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agrossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

ROIJ, N.; SIERRA, J.; MARTÍ, E.; MARTÍ, E.; SCHUHMACHER, M.; DOMINGO, J.L. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 158, n. 1, p. 41-48, mar. 2012.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. **Balanço hídrico normal por Thorntwaite e Mather (1955)**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP – Departamento de Ciências Exatas: Área de Física e Meteorologia, 1999 (programa para Excel v. 6). 1 CD-ROM.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2002-2003.

SETTE JUNIOR, C.R.; FILHO, M.T.; DIAS, C.T. dos S.; LACLAU, J.P. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. EX. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.6, p.979-990, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOUSADA, J.L.; LACLAU, J.P. Sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* pelo uso de dendrômetros. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 763-775, 2012.

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: GONGALVES, J. L. de M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 79-104.

SULLIVAN, T.P.; SULLIVAN, D.S.; LINDGREN, P.M.F.; RANSOME, D.B. Long-term responses of ecosystem components to stand thinning in young lodgepole pine forest: III - Growth of crop trees and coniferous stand structure. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.228, n.1-3, p.69-81, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P.C.; LISI, C.S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W. (Org.). **Indicadores Ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo, SP: EDUC/COMPED/INEP, 2001. p. 117-143.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J.; SCHNEIDER, P.R.; MENEZES, L.F. de. Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 377-387, 2007.

VEGA, F.V.A.; BOVI, M.L.A.; BERTON, R.S.; GODOY JUNIOR, G.; CEMBRANELLI, M. de A.R. Aplicação de biossólido na implantação da cultura da pupunheira. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 131-135, 2004.

VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, Magnésio e Enxofre. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-325.

WEETMAN, G.F.; McDONALD, M.A.; PRESCOTT, C.E; KIMMINS, J.P. Responses of western hemlock, Pacific silver fir, and western red cedar plantations on northern Vancouver Island to applications of sewage sludge and inorganic fertilizer. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, n. 9, p. 1815-1820, 1993.

3 BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* CONDUZIDOS POR TALHADIA, SOB EFEITO RESIDUAL DE DOSES DE LODOS DE ESGOTO (ÚMIDO E SECO)

Resumo

A aplicação de lodo de esgoto em plantios de eucalipto tem apresentado bons resultados, principalmente, quando complementada com cloreto de potássio (KCl). Esta complementação é, muitas vezes, necessária devido à reduzida concentração de K nos lodos, produzidos pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Comparada à fertilização mineral, a adubação com o lodo de esgoto tende a disponibilizar mais vagarosamente os nutrientes para as plantas, devido à sua lenta degradação e efeito residual sobre a fertilidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito residual de dois tipos de lodos de esgoto (úmido/torta e seco/granulado) sobre um povoamento de *Eucalyptus grandis* conduzido por talhadia, ou seja, após a colheita do 1º ciclo de cultivo e manejo das rebrotas. O povoamento inicial de eucalipto foi implantado e adubado com os lodos em março/2003 e colhido em novembro/2008. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 3 repetições e 8 tratamentos, sendo: 1) Testemunha, sem qualquer adubação (T); 2) Efeito residual da fertilização mineral (FM) e 3, 4, 5, 6, 7 e 8) Efeito residual das adubações com 10, 20 e 30 t ha⁻¹ base seca dos lodos de esgoto úmido e seco (L10U, L20U, L30U, L10S, L20S e L30S). Além do manejo das brotações, foi realizada também a adubação potássica das parcelas em novembro 2008, com exceção do tratamento T. Em 2011, após 32 meses de condução por talhadia, avaliou-se novamente a fertilidade do solo e as brotações de eucalipto quanto à produção de biomassa aérea e aos estoques de nutrientes nas folhas, galhos, casca e lenho das árvores. O efeito residual dos lodos de esgoto úmido e seco, independentemente da dose aplicada o solo, elevou os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca) e zinco (Zn), principalmente, na camada de 0-5 cm do solo. Nas camadas mais profundas do solo (20-40 cm), o efeito residual dos lodos elevou também o teor de zinco, chegando a ser até 70 vezes maior em relação aos tratamentos T e FM. O efeito residual dos dois tipos de lodo também propiciou o incremento significativo da biomassa das árvores em relação à testemunha (com 13,5 t ha⁻¹), principalmente, no tratamento L10S onde a produção (com 24,5 t ha⁻¹) foi duas vezes maior. Os estoques de fósforo e nitrogênio na biomassa aérea das árvores foram até 100% maiores no tratamento L10S em comparação à testemunha (T). O efeito residual dos lodos elevou também os estoques de cálcio e zinco (até 4 vezes mais) na biomassa aérea, principalmente, no lenho e casca dos eucaliptos. Isto permite pressupor, que em sistemas de talhadia de rotações de ciclo curto, os elementos Zn e Ca, adicionados ao sítio de cultivo com o lodo de esgoto, poderiam se exportados por meio das sucessivas colheitas da madeira, reduzindo o seu acúmulo no solo.

Palavras-chave: Brotação de eucalipto; Biossólido; Cultivo de Ciclo Curto

Abstract

The application of sewage sludge in eucalypt plantations has shown good results, especially with potassium chloride (KCl) supplementation. This supplement is often required due to the reduced concentration of potassium (K) in the sludge produced by wastewater treatment plants. Compared with mineral fertilization, the sewage sludge tends to slowly release nutrients to the plants, due to its slow degradation and long term effect on soil fertility. The aim of this study was to evaluate the long term effect of two types of sewage sludge (wet

and dry) on *Eucalyptus grandis* coppice plantation, after the harvesting of the first cycle and sprouting management. The initial eucalyptus stand was established and fertilized with sludge in March/2003 and harvested in November/2008. The experimental design consisted of randomized blocks, with 3 replications and 8 treatments: 1) control, without fertilization (C) 2) Long term effect of mineral fertilization (MF) and 3, 4, 5, 6, 7 and 8) Long term effect of 10, 20 and 30 t ha⁻¹ dry basis of wet and dry sewage sludge (S10W, S20W S30W, S10D, S20D and S30D). Besides the sprouting management, the plots were fertilized with potassium in November/2008, except the control. In 2011, after 32 months of coppicing, we evaluated: the soil fertility, the aboveground biomass and nutrient stock in leaves, twigs, stem bark and stem wood of the eucalyptus sprouts. The long term effect of wet and dry sewage sludge, regardless of doses, increased the nitrogen (N), phosphorus (P), calcium (Ca) and zinc (Zn) content in soil, especially at 0-5 cm layer. In the deeper soil layers (20-40 cm), the long term effect of sludge also increased the zinc content, reaching up to 70 times greater than C and MF treatments. The long term effect of the two types of sludge also provided a significant increase in biomass production than in the control (with 13.5 t ha⁻¹), mainly in the S10D treatment, in which the biomass production (with 24.5 t ha⁻¹) was two times greater. The phosphorus and nitrogen stocks in the aboveground biomass were 100% greater in the S10D treatment than in the control (C). The long term effect of the sludge also increased the calcium and zinc stocks (up to 4 times more) in aboveground biomass, especially in the eucalyptus stem wood and stem bark. This presumes that in coppice systems with short rotation cycle, the elements Zn and Ca, added in the site with sewage sludge fertilization, could be exported through the successive timber harvesting, reducing its accumulation in the soil.

Keywords: *Eucalyptus* sprout; Biosolids; Short Rotation Cycle

3.1 Introdução

As espécies do gênero *Eucalyptus* possuem, de forma geral, a capacidade de produzir brotos epicórmicos após a ocorrência de desfolha ou danos severos ao fuste, ocasionados por geada, passagem de fogo ou com a colheita da madeira (FLORENCE, 1996). Esses brotos surgem de gemas dominantes ou adventícias situadas ao redor da cepa ou na base do tronco, respectivamente; além disso, em muitas espécies de eucalipto, podem surgir também a partir de lignotúberes ou protuberâncias na base da cepa (REIS; REIS; 1997).

A condução da brotação de cepas de *Eucalyptus*, após o corte raso dos fustes, visando à regeneração dos povoamentos era uma prática comum na década de 1970 e no início dos anos 80; contudo, à medida que materiais genéticos de melhor qualidade e mais produtivos foram sendo introduzidos e utilizados em grande escala, a alternativa de reforma dos povoamentos passou a ser adotada, apesar dos maiores custos e dificuldades inerentes ao preparo das áreas para o plantio das mudas (FERREIRA; SILVA, 2008).

Com a crise econômica mundial de 2008, o setor agrícola brasileiro defrontou-se com inúmeras adversidades, como por exemplo, a queda dos preços das commodities agrícolas e

de outras matérias-primas, significativa elevação dos custos de produção e, posteriormente, com a ocorrência de adversidades climáticas (ex. seca, excesso de chuvas, geada, etc.) (TSUNECHIRO et al., 2009). Devido a isto, várias empresas florestais brasileiras, na tentativa de reduzir os custos de implantação, voltaram a adotar em determinadas áreas o cultivo conduzido sob sistema de talhadia.

A diferença que se pode esperar entre um povoamento propagado por meio do plantio de mudas e outro conduzido por brotação de touças advém do sistema radicular já estabelecido neste último caso (SIMS et al., 1999), podendo ele ser fonte de reservas orgânicas e minerais, que podem ser retranslocadas e utilizadas para a formação inicial de novas raízes e emissão de novas brotações (BARROS; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 1997).

O sistema de talhadia é essencialmente empregado para a produção de madeira de pequenas dimensões, usualmente utilizada na fabricação de palanques, compensados, celulose e geração de energia (TAILLIS; NIEDERWALD, 1989; FLORENCE, 1996). Quando aplicado em ciclos de curta rotação (2-4 anos), o sistema de talhadia pode proporcionar elevadas quantidades de biomassa e, em determinadas condições, desempenhar um importante papel na fitoremediação de solos adubados com resíduo (HOLM; HEINSOO, 2013), que porventura possam estar contaminados com metais pesados.

Explorações intensivas em rotações curtas, sem previsão de um período mínimo necessário para reposição de nutrientes, têm sido apontadas como as maiores responsáveis pela diminuição da fertilidade do solo (COBB et al., 2008). O estudo sobre silvicultura intensiva, em especial o que diz respeito à exportação de nutrientes através da colheita da biomassa florestal, é a base para o entendimento da dinâmica nutricional em uma plantação (VIERA; SCHUMACHER; BONACINA, 2011).

O cultivo de árvore em ciclos de curta rotação, por meio do sistema de talhadia, pode ser considerado um meio propício para a aplicação do lodo de esgoto visto que não há possibilidade de contaminação direta da cadeia alimentar humana pela presença de metais pesados (MAGESAN; WANG, 2003; DIMITRIOU et al., 2006). Segundo Vega et al. (2004), a disposição do lodo de esgoto em plantios florestais, como fertilizante e condicionador do solo, apresenta-se como uma das alternativas de disposição mais atraentes tendo em vista os seus atributos, tais como: altos teores de matéria orgânica (40-60%), nitrogênio (4%), fósforo (2%), e micronutrientes em geral.

Para aprimorar o tratamento do lodo de esgoto e viabilizar sua disposição final em aterros sanitários, bem como na agricultura, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) deu início a partir de 2002 ao condicionamento do lodo com

polieletrólito, seguido de secagem térmica para a produção de biossólido seco (granulado) (SILVA et al., 2008).

O lodo seco e granulado oferece diversas vantagens em relação ao lodo úmido, visto que, além de ser isento de patógenos (KELTY; MENALLED; CARLTON, 2004), o teor de umidade é muito menor, tornando mais econômico seu transporte até o local de disposição e facilitando operacionalmente sua distribuição mecanizada no campo (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006; PAIVA et al., 2009). Segundo BERTON et al. (1997), espera-se com a secagem do lodo que a disponibilidade dos metais pesados seja influenciada pelo menor contato do lodo com as partículas do solo e pela provável degradação, mais lenta, feita pelos microrganismos.

Neste trabalho, cogitou-se a hipótese de que a adubação com doses de lodo de esgoto úmido ou seco possam, mesmo alguns anos após sua aplicação, possa exercer efeitos residuais positivos sobre a produção de biomassa e o estoque de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis*, quando manejados em ciclos de curta rotação e em regime de talhadia.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido na área experimental AE-37 da Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP, localizada no município de Itatinga/SP. Em março de 2003, segundo Silva (2006), foi realizado na área AE-37 o plantio de mudas seminais de *Eucalyptus grandis* no espaçamento de 2 por 3 metros, visando avaliar a aplicação de lodo de esgoto úmido e seco, conforme os seguintes tratamentos: 1) Testemunha, sem qualquer adubação (T); 2) Fertilização mineral convencional (FM); 3, 4 e 5) Adubações com 10, 20 e 30 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto úmido (L10U, L20U e L30U) e 6, 7 e 8) Adubações com 10, 20 e 30 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto seco (L10S, L20S e L30S).

O solo da área AE-37 foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo com textura médio-arenosa e relevo suavemente ondulado, cujas características químicas são apresentadas na tabela 3.1. O delineamento experimental adotado foi em blocos, com três repetições e parcelas aleatorizadas. Cada parcela continha 36 árvores na área útil e 28 árvores na bordadura simples, totalizando 64 árvores por parcela. Portanto, a área útil de cada parcela foi de 216 m² e a área de bordadura foi de 168 m², totalizando 384 m².

Tabela 3.1 - Atributos químicos do solo em diferentes profundidades (Prof.) na área experimental AE-37, antes do plantio das mudas de *E. grandis*, conforme Silva (2006)

Prof. cm	pH CaCl ₂	M.O g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmolc dm ⁻³	SB	CTC
0 – 5	4,0	26	9	0,7	5	4	71	9,7	82
5 – 10	4,0	17	6	0,6	3	2	57	5,6	63
10 – 20	4,0	13	7	0,6	2	2	44	4,6	51

Prof. cm	Al ³⁺ mmolc dm ⁻³	V %	m	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe mg dm ⁻³	Mn	Zn
0 – 5	27	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5 – 10	24	8	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10 – 20	20	9	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Nota: Análise química do solo realizada segundo metodologia apresentada por Raij et al. (1987).

O lodo de esgoto foi fornecido pela ETE de Barueri-SP, que desde 2002 já condicionava o lodo com polieletrólito conferindo-lhe pH próximo a 7,0 (Tabela 3.2). As doses do lodo foram dispostas numa faixa de $\pm 0,5$ metro sobre a superfície do solo, nas linhas de plantio das mudas de eucalipto.

A fertilização mineral recomendada (em 2003) para o tratamento FM foi: 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (aplicado a lanço em área total), 110 kg ha⁻¹ de NPK 0-45-0 (disposto no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (disposto no sulco de plantio) e 80 kg ha⁻¹ de NPK 20-0-20 (aplicado ao redor das mudas após 45 dias do plantio). Além disso, aos 6 e 12 meses após o plantio das mudas no campo, foi aplicado 180 kg ha⁻¹ e 240 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% de Boro + 0,5% de Zinco (numa faixa de 40 cm na entre linha de plantio), respectivamente.

Tabela 3.2 - Características químicas dos lodos de esgoto úmido (LU) e seco (LS), produzidos pela ETE de Barueri/SP em 2003

Atributos	Unidade	LU	LS	Atributos	Unidade	LU	LS
pH em CaCl ₂ a 0,01 M	-	7,3	6,5	Enxofre (S) total	g kg ⁻¹	6,6	6,8
Umidade total (65°C)	%	76,04	4,14	Sódio (Na) total	g kg ⁻¹	0,58	0,90
Matéria orgânica total	g kg ⁻¹	546,4	530,2	Ferro (Fe) total	mg kg ⁻¹	39.000	45.200
Carbono total	g kg ⁻¹	307,9	294,5	Cobre (Cu) total	mg kg ⁻¹	570	700
Nitrogênio total	g kg ⁻¹	32,7	34,7	Manganês (Mn) total	mg kg ⁻¹	194	300
Relação C/N	-	9,4	8,5	Zinco (Zn) total	mg kg ⁻¹	2.380	3.200
Fósforo (P ₂ O ₅) total	g kg ⁻¹	32,7	38,4	Cádmio (Cd) total	mg kg ⁻¹	19	...
Potássio (K ₂ O) total	g kg ⁻¹	2,7	2,7	Cromo (Cr) total	mg kg ⁻¹	556	...
Cálcio (Ca) total	g kg ⁻¹	25,2	24,6	Chumbo (Pb) total	mg kg ⁻¹	130	...
Magnésio (Mg) total	g kg ⁻¹	4,9	3,9	Níquel (Ni) total	mg kg ⁻¹	204	...

Nota: Método empregado para os metais pesados: SW 3051, EPA – U.S, determinação por ICP-AES.

Todos os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

... Dado numérico não disponível.

Em abril de 2008, cinco anos após a implantação do povoamento florestal, foi realizado o corte raso das árvores de eucalipto em toda a área AE-37. Para tanto, os motosserristas foram orientados a efetuar o corte dos troncos entre 10 e 15 cm de altura da superfície do solo e, após isso, evitar qualquer dano mecânico às cepas tanto no momento da retirada das toras quanto na ocasião do enleiramento dos resíduos (ex. folhas) no campo.

Em novembro/2008, com o início do presente trabalho, as rebrotas das touças foram conduzidas de forma que permanecessem no campo apenas 1 fuste/cepa, sendo escolhidos de acordo com a sua superioridade em altura e vigor. Além disso, todas as parcelas foram sujeitas a práticas de manutenção, como por exemplo, combate às formigas e controle de plantas daninhas. Com exceção das parcelas do tratamento T, as demais parcelas foram adubadas com cloreto de potássio (KCL), aos 3 e 9 meses de idade das árvores, totalizando 150 kg ha⁻¹ de KCl. Esta adubação potássica foi necessária devido à baixa concentração de K nos lodos (Tabela 3.2) e à alta demanda das árvores por este elemento em especial.

Em dezembro de 2010, 32 meses após o início do experimento com *E. grandis* em regime de talhadia, foi realizada a avaliação da biomassa aérea das árvores e do estoque de nutrientes nos respectivos componentes arbóreos: folhas, galhos, casca e lenho.

3.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo

Entre janeiro/2008 e dezembro/2010, o regime pluviométrico e as variações térmicas máxima e mínima (Figura 3.1) seguiram o padrão estabelecido no balanço hídrico normal do município de Itatinga-SP, conforme Rolim e Sentelhas (1999).

A precipitação acumulada entre os meses de janeiro e março/2008, antes do corte raso das árvores na área AE-37, foi de 465,66 mm e as temperaturas médias máxima e mínima foram 31,9 e 13,9°C, respectivamente. Nos seis meses seguintes, a precipitação acumulada entre abril e setembro/2008 foi 533,98 mm e as temperaturas médias máxima e mínima foram de 30,1 e 4,9°C, respectivamente. Sob essas condições climáticas, a emissão e o crescimento inicial dos brotos de *E. grandis* não foram, provavelmente, limitadas por escassez hídrica ou por condições térmicas de frio intenso.

Segundo Ferreira e Silva (2008), a época do ano em que é realizado o corte da árvore para a regeneração das touças influencia sobremaneira o resultado final, uma vez que temperaturas extremas, ausência de chuvas, insolação excessiva ou inadequada, podem reduzir o número de brotos obtidos, bem como a sua qualidade.

Figura 3.1 - Precipitação acumulada, temperaturas médias mínima e máxima mensais observadas entre os meses de janeiro/2008 a jan./2011, durante o período de estudo na área experimental AE-37 da EECFI, onde foi conduzida a experimentação com brotações de *E. grandis*

Nos meses subsequentes, os períodos de maiores precipitação e temperaturas ocorreram entre os meses de outubro a março, enquanto os períodos de menores precipitação e temperaturas ocorreram entre os meses de abril a setembro. Neste intervalo, os meses de julho/2008 e agosto/2010 destacaram-se por não ocorrer precipitação pluviométrica e pelas baixas temperaturas, com valores médios da temperatura mínima de 3,7°C em julho e 5,1°C em agosto.

3.2.3 Avaliação da fertilidade do solo

A avaliação da fertilidade do solo na área AE-37 foi realizada em maio de 2011, ou seja, aproximadamente 8 anos depois da aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco no cultivo inicial do eucalipto. A amostragem do solo foi efetuada na área útil de cada parcela, em 16 pontos distribuídos aleatoriamente nas linhas de plantio das mudas de eucalipto, ou seja, nas faixas onde foram efetuadas as adubações com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral convencional. Em cada ponto de amostragem, foram retiradas amostras de terra nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade do solo.

Na camada de 0-5 cm, as amostras foram coletadas com o auxílio de uma espátula de aço inoxidável e, nas demais camadas, foi utilizado um trado holandês. As amostras coletadas em cada parcela foram agrupadas por camada, misturadas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 40-45°C, até atingirem peso constante.

Após a secagem, as amostras de terra foram peneiradas (malha de 2 mm), homogeneizadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises Químicas – Pesquisa, do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. No laboratório, as análises químicas para a avaliação da fertilidade do solo foram realizadas conforme metodologia proposta por Raij et al. (2001).

3.2.4 Quantificação da biomassa aérea e dos estoques de nutrientes

Em dezembro de 2010, após a condução das brotações de *E. grandis* por aproximadamente 2,5 anos, foi efetuada a avaliação da biomassa aérea das árvores e dos estoques de nutrientes nos respectivos componentes vegetais: folhas, galhos, lenho e casca.

Inicialmente, foi realizado o inventário florestal das árvores na área útil de cada parcela, onde foram mensuradas: a circunferência do tronco à altura do peito (CAP), em centímetros, e a altura total das árvores em metros. Para quantificar a altura foi utilizado o hipsômetro eletrônico modelo Vertex III, com precisão de 0,1 m, e a CAP foi determinada por meio de uma fita métrica com precisão de 0,1 cm.

Com base no inventário, foi efetuada a seleção das árvores para a amostragem da biomassa dos troncos e demais componentes aéreos. Para isso, foram considerados apenas os indivíduos arbóreos com 1 fuste remanescente por cepa e que estivessem sob as mesmas condições de competição intraespecífica, ou seja, rodeados por outras quatro árvores vivas.

Após esta seleção prévia, as árvores foram distribuídas em 6 classes de CAP com amplitude de aproximadamente 6 cm. Em cada classe de CAP foram selecionados dois fustes em cada parcela, totalizando 12 árvores (inferiores, médias e superiores) por tratamento e 48 indivíduos arbóreos em todo o experimento.

As árvores selecionadas foram abatidas com motosserra, por intermédio do corte do tronco próximo ao solo, e desmembradas em folhas, galhos e tronco. Os componentes arbóreos foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 kg e com capacidade máxima de 60 kg. Em seguida, foram recolhidas amostras vegetais da seguinte forma: 1) Em cada terço da copa (superior, médio e inferior), foram coletadas 30 folhas nas quatro direções cardeais, totalizando 90 folhas por árvore; 2) Nos mesmos pontos, buscou-se coletar também amostras de galhos finos ($\varnothing \leq 2$ cm) e grossos ($\varnothing > 2$ cm) e 3) A partir do plano de corte do tronco, foram coletados discos de madeira com ± 3 cm de espessura, nas distâncias de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura total das árvores.

Em laboratório, no mesmo dia de amostragem de cada árvore, os respectivos discos do tronco foram desmembrados em lenho e casca. Posteriormente, as amostras de lenho e casca assim como as de folhas e galhos foram pesadas separadamente. Após a contabilização dos pesos úmidos, as amostras foram secadas a 60-65°C em estufa de circulação forçada de ar até atingirem peso constante. Com base na biomassa úmida e seca foi possível estabelecer a umidade (em %) de cada componente arbóreo amostrado no campo. A divisão dos discos em lenho e casca permitiu estabelecer também a contribuição de cada um desses componentes no tronco de cada árvore.

Com base nos resultados obtidos com a amostragem das 48 árvores no experimento, foram estabelecidos modelos matemáticos genéricos por meio de regressão linear e das relações dendrométricas entre a CAP e a biomassa aérea do eucalipto. Estes modelos foram utilizados para estimar a biomassa seca de cada componente arbóreo aéreo (lenho, casca, galhos e folhas), considerando aqui uma densidade de 1667 árvores ha⁻¹, em cada tratamento.

Depois de estimadas as biomassas secas, as amostras de cada componente arbóreo foram agrupadas por parcela e moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais provenientes da moagem foram condicionados em sacos plásticos previamente identificados e em seguida encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da

ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes, de acordo com a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989).

A quantidade de nutrientes estocada em cada componente aéreo das árvores, de acordo com cada tratamento testado, foi estimada pela eq. 3.1.

$$EN_{ij} = CN_{ij} * BS_j \quad (3.1)$$

Onde:

EN_{ij} = Estoque do nutriente “i” no componente aéreo “j” da árvore (kg ha^{-1} ou mg ha^{-1});

CN_{ij} = Concentração do nutriente “i” no componente aéreo “j” da árvore (g kg^{-1} ou mg kg^{-1});

BS_j = Biomassa seca estimada do componente aéreo “j” da árvore (kg ha^{-1}).

3.2.5 Análises estatísticas

Inicialmente, os resultados foram verificados quanto às pressuposições básicas estatísticas (ex. normalidade, homogeneidade da variância etc.) e a necessidade de transformação dos dados, que foi realizada pelo método de potência ótima de Box-Cox. Depois dessa fase preliminar, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, comparados estatisticamente entre si através do teste de Tukey a 5% de nível de significância. Para as análises utilizou-se o software estatístico SAS (9.1) for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Fertilidade do solo, 8 anos após a adubação com lodo de esgoto

Conforme mencionado no item 3.2.1, os lodos de esgoto úmido e seco haviam sido inicialmente testados como fertilizantes em abril de 2003, quando o seu condicionamento na ETE já era efetuado com polieletrólito, ao invés da cal e cloreto férrico. Portanto, a avaliação do efeito residual dos lodos sobre a fertilidade do solo foi realizada em abril de 2011, ou seja, 8 anos após a sua aplicação nas linhas de plantio do eucalipto.

O efeito residual das doses de 10 e 20 t ha^{-1} do lodo de esgoto úmido (L10U e L20U) ficou evidente através da redução do pH (em média 0,2 unidades) nas camadas de 0-5, 5-10 e, principalmente, 10-20 cm do solo em relação ao tratamento FM (Tabela 3.3). A redução do pH do solo pode ser atribuída à produção de íons H^+ durante o processo de nitrificação (ROY;

COUILLARD, 1998), oxidação de sulfitos e produção de ácidos orgânicos durante a mineralização da matéria orgânica do lodo (GUEDES et al., 2006).

Tabela 3.3 - Atributos químicos do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, nos tratamentos: sem adubação (T), sob efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com as doses de 10, 20 e 30 t ha⁻¹ dos lodos de esgoto úmido (L10U, L20U e L30U) e seco (L10S, L20S e L30S)

(continua)									
Tratamento	pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P _{resina} ----- mg dm ⁻³ ----	S-SO ₄ ²⁻ ----- mg dm ⁻³ ----	N _{total} mg kg ⁻¹	K ⁺ ----- mmolc dm ⁻³ -----	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB
<i>Profundidade de 0-5 cm</i>									
T	3,50 ab	30,3 a	4,9 b	3,4 b	1098,1 a	0,61 a	1,46 c	0,80 b	2,7 c
FM	3,64 a	25,7 a	4,5 b	3,4 b	872,0 a	1,09 a	2,27 bc	1,85 a	5,6 ab
L10U	3,46 b	25,9 a	29,1 a	5,1 a	1007,2 a	0,68 a	1,42 c	0,74 b	2,7 c
L20U	3,46 b	23,2 a	56,5 a	4,8 ab	937,7 a	0,60 a	2,02 c	0,83 b	3,2 bc
L30U	3,49 ab	24,8 a	60,0 a	5,6 a	899,9 a	0,57 a	2,12 bc	0,73 b	3,3 bc
L10S	3,54 ab	26,2 a	35,6 a	5,2 a	1030,8 a	0,64 a	2,55 abc	0,98 ab	4,0 abc
L20S	3,55 ab	21,2 a	51,0 a	5,4 a	999,9 a	0,57 a	3,63 ab	1,07 ab	5,1 ab
L30S	3,62 ab	25,2 a	55,7 a	5,3 a	904,9 a	0,60 a	4,93 a	1,12 ab	6,6 a
<i>Profundidade de 5-10 cm</i>									
T	3,70 b	15,3 a	3,0 d	3,6 b	...	0,29 a	1,10 b	0,63 abc	2,0 c
FM	3,81 a	14,6 a	2,8 d	3,6 b	...	0,48 a	1,33 b	0,92 a	2,9 abc
L10U	3,64 b	15,2 a	3,6 cd	5,4 a	...	0,32 a	1,43 b	0,69 abc	2,4 bc
L20U	3,68 b	13,7 a	4,9 bc	6,1 a	...	0,29 a	1,67 b	0,59 bc	2,5 bc
L30U	3,62 b	16,2 a	5,9 bc	6,8 a	...	0,23 a	1,50 b	0,56 c	2,3 bc
L10S	3,65 b	16,1 a	6,6 b	5,8 a	...	0,30 a	1,67 b	0,65 abc	2,6 abc
L20S	3,65 b	16,1 a	18,7 a	5,5 a	...	0,27 a	2,83 a	0,86 ab	3,9 ab
L30S	3,71 ab	15,9 a	14,5 a	7,5 a	...	0,35 a	3,43 a	0,86 ab	4,8 a
<i>Profundidade de 10-20 cm</i>									
T	3,76 b	12,8 a	2,1 c	3,9 b	...	0,25 a	0,83 c	0,60 a	1,6 b
FM	3,83 a	14,1 a	2,0 c	3,9 b	...	0,40 a	1,10 bc	0,97 a	3,0 ab
L10U	3,72 bc	10,2 a	1,9 c	6,2 ab	...	0,26 a	1,53 bc	0,67 a	2,5 ab
L20U	3,72 bc	9,8 a	2,2 cb	8,4 a	...	0,22 a	1,70 abc	0,70 a	2,6 ab
L30U	3,70 c	12,3 a	2,6 cb	8,0 a	...	0,19 a	1,60 abc	0,63 a	2,4 ab
L10S	3,70 c	12,3 a	2,7 abc	6,9 a	...	0,24 a	1,93 abc	0,70 a	2,8 ab
L20S	3,69 c	13,0 a	6,3 ab	7,3 a	...	0,20 a	2,17 ab	0,73 a	3,0 ab
L30S	3,71 bc	12,3 a	10,1 a	9,2 a	...	0,26 a	2,83 a	0,83 a	4,0 a
<i>Profundidade de 20-40 cm</i>									
T	3,84 a	7,7 a	1,3 a	3,7 c	...	0,17 cd	0,77 c	0,47 a	1,4 c
FM	3,84 a	7,1 a	1,3 a	4,5 c	...	0,37 a	1,10 bc	0,87 a	2,6 abc
L10U	3,79 a	8,9 a	1,3 a	9,4 b	...	0,22 b	1,07 bc	0,53 a	1,8 bc
L20U	3,80 a	7,7 a	1,1 a	17,5 ab	...	0,16 d	1,23 bc	0,57 a	2,0 bc
L30U	3,80 a	7,6 a	1,3 a	18,5 a	...	0,21 bc	1,53 abc	0,70 a	2,4 abc
L10S	3,79 a	8,7 a	1,4 a	11,0 ab	...	0,22 b	1,37 abc	0,63 a	2,2 abc
L20S	3,79 a	8,8 a	1,7 a	11,0 ab	...	0,16 d	1,83 ab	0,77 a	2,8 ab
L30S	3,79 a	8,7 a	1,6 a	17,3 ab	...	0,25 ab	2,37 a	0,70 a	3,3 a

Tabela 3.3 - Atributos químicos do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, nos tratamentos: sem adubação (*T*), sob efeito residual da fertilização mineral (*FM*) e da adubação com as doses de 10, 20 e 30 t ha⁻¹ dos lodos de esgoto úmido (*L10U*, *L20U* e *L30U*) e seco (*L10S*, *L20S* e *L30S*)

(conclusão)									
Tratamento	Al ³⁺	Al ³⁺ +H ⁺	CTC	V%	m%	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----	mmolc dm ⁻³	-----			-----	mg dm ⁻³	-----	
Profundidade de 0-5 cm									
T	15,9 a	119,7 a	122,1 a	2,2 c	13,1 a	4,1 bc	156,1 ab	2,2 b	0,5 c
FM	12,2 ab	104,3 a	110,4 a	4,4 ab	11,1 a	2,6 c	95,1 b	4,7 a	0,3 c
L10U	15,6 a	132,0 a	134,8 a	2,0 c	11,8 a	6,2 ab	213,2 a	1,6 b	12,6 b
L20U	13,7 ab	109,0 a	112,5 a	2,8 bc	12,2 a	9,4 a	215,0 a	1,9 b	18,5 ab
L30U	14,9 ab	120,7 a	124,0 a	2,6 bc	12,0 a	10,0 a	190,9 a	1,7 b	21,3 ab
L10S	14,1 ab	121,3 a	125,6 a	3,2 abc	11,3 a	6,1 ab	185,9 a	1,9 b	20,9 ab
L20S	12,2 ab	120,7 a	126,0 a	4,0 ab	9,8 a	8,8 a	177,2 ab	2,7 b	32,4 ab
L30S	11,2 b	106,7 a	113,4 a	5,8 a	9,8 a	7,8 a	164,8 ab	2,3 b	36,1 a
Profundidade de 5-10 cm									
T	11,8 a	83,0 a	85,0 a	2,4 d	13,9 a	1,8 bc	81,4 a	0,7 a	0,3 b
FM	10,5 a	80,0 a	83,5 a	2,9 cd	12,7 a	1,3 c	66,5 a	1,1 a	0,2 b
L10U	11,8 a	84,0 a	86,4 a	2,8 cd	13,7 a	2,0 abc	115,7 a	1,0 a	8,2 a
L20U	11,3 a	72,0 a	74,5 a	3,3 abc	15,1 a	2,4 abc	89,4 a	0,9 a	11,8 a
L30U	12,5 a	82,3 a	84,9 a	2,7 cd	14,8 a	2,4 abc	110,7 a	1,0 a	12,0 a
L10S	11,6 a	83,3 a	85,9 a	3,0 bc	13,5 a	2,4 abc	97,3 a	0,9 a	9,7 a
L20S	11,1 a	82,3 a	86,4 a	4,5 ab	13,0 a	4,0 a	122,7 a	1,4 a	16,0 a
L30S	10,7 a	81,7 a	86,7 a	5,5 a	12,4 a	3,4 ab	114,3 a	1,0 a	16,0 a
Profundidade de 10-20 cm									
T	10,2 a	66,3 a	67,8 a	2,5 b	15,1 a	1,4 ab	62,6 a	0,7 a	0,3 b
FM	8,9 a	63,0 a	66,6 a	3,5 ab	13,4 a	1,1 b	53,2 a	0,9 a	0,2 b
L10U	10,1 a	66,3 a	68,8 a	3,6 ab	14,8 a	1,3 b	74,5 a	0,8 a	5,3 a
L20U	9,7 a	63,3 a	66,1 a	4,0 ab	14,7 a	1,5 ab	69,2 a	0,7 a	8,8 a
L30U	10,7 a	72,7 a	75,2 a	3,3 ab	14,2 a	1,3 b	77,6 a	0,8 a	10,0 a
L10S	10,4 a	71,0 a	73,9 a	3,9 ab	14,0 a	1,6 ab	66,7 a	0,7 a	6,8 a
L20S	10,3 a	69,3 a	72,2 a	4,3 ab	14,3 a	2,4 a	86,1 a	1,0 a	10,2 a
L30S	9,7 a	69,0 a	73,0 a	5,6 a	13,3 a	2,4 a	86,7 a	0,8 a	12,0 a
Profundidade de 20-40 cm									
T	8,3 a	51,3 a	52,7 a	2,6 b	15,8 a	1,1 ab	42,0 a	0,5 a	0,1 b
FM	7,3 a	50,0 a	52,4 a	5,0 a	13,9 a	0,9 b	39,3 a	0,5 a	0,1 b
L10U	8,7 a	54,3 a	56,1 a	3,2 ab	15,6 a	1,1 ab	52,4 a	0,6 a	4,1 a
L20U	8,0 a	49,7 a	51,8 a	3,8 ab	15,5 a	1,2 ab	40,4 a	0,5 a	5,9 a
L30U	8,6 a	53,3 a	55,7 a	4,4 ab	15,5 a	1,0 ab	45,0 a	0,5 a	6,2 a
L10S	8,7 a	54,3 a	56,6 a	3,9 ab	15,3 a	1,2 ab	51,6 a	0,5 a	4,2 a
L20S	8,5 a	54,3 a	57,2 a	4,7 a	15,0 a	1,5 a	52,3 a	0,7 a	7,0 a
L30S	9,0 a	56,3 a	59,5 a	5,5 a	15,0 a	1,6 a	55,5 a	0,5 a	6,6 a

Nota: Para cada atributo químico e profundidade do solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

... Dado numérico não disponível.

Na camada de 0-5 cm do solo, não foram constatados efeitos residuais do lodo de esgoto, independentemente da dose ou da forma de aplicação (úmido ou seco), sobre os teores de matéria orgânica (média de $25,3 \text{ g dm}^{-3}$) e de nitrogênio total (média de $968,8 \text{ mg kg}^{-1}$), em relação aos tratamentos T e FM.

Suhadolc et al. (2010), ao averiguarem os impactos de uma única aplicação de lodo de esgoto sobre os atributos do solo, constataram que 1 dia após a aplicação do lodo o teor de matéria orgânica (MO) elevou-se em 20% e que 3 meses depois esses teores voltaram aos mesmos patamares iniciais, similares ao tratamento controle. Esses autores atribuíram este resultado a lixiviação de boa parte da matéria orgânica para as camadas mais profundas do solo.

Os teores de fósforo resina (P_{resina}) foram, em quase todas as camadas do solo (exceção camada de 20-40 cm), maiores nos tratamentos com lodo de esgoto comparados aos tratamentos FM e T. Na camada de 0-5 cm do solo, o teor de P_{resina} foi cerca de 10 vezes maior nos tratamentos com lodo e, em alguns casos (ex. tratamento L30S), chegou a ser 5 vezes maior também na camada de 10-20 cm do solo.

Mantovi, Baldoni, e Toderi (2005), ao estudarem os efeitos do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo, verificaram que a adubação com lodo por 12 anos consecutivos, independentemente da dose (5 ou $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ou da forma de aplicação ao solo (líquido, seco ou compostado), elevou o teor de fósforo (P_{Olsen}) em cerca de 70 % em relação ao tratamento com fertilização mineral convencional ($P_{\text{Olsen}} = 26,67 \text{ mg kg}^{-1}$).

Mesmo não tendo sido condicionado com cal e cloreto férrico, as doses de 20 e 30 t ha^{-1} de lodo de esgoto úmido proporcionaram teores de cálcio (Ca^{2+}) superiores ao tratamento T, chegando a ser 2 a 3 vezes maiores em todas as camadas do solo. Por outro lado, o teor de magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-5 cm do solo foi no tratamento FM cerca de 2 vezes maior em relação aos tratamentos testemunha e aos tratamentos com lodo de esgoto úmido, independentemente da dose aplicada ao solo.

O teor de cobre (Cu) na camada de 0-5 cm do solo nos tratamentos L20S e L30S foi de 2 a 3 vezes maior se comparado aos tratamentos T e FM (Tabela 3.3). Nas demais camadas do solo, os teores de Cu observados nos tratamentos L20S e L30S foram superiores em comparação apenas ao tratamento FM. De acordo com Berton e Nogueira (2010), a adição de lodo aumenta a concentração de zinco (Zn) e cobre (Cu) disponíveis no solo e geralmente dispensa a suplementação destes micronutrientes via fertilização mineral. Por outro lado, elevadas quantidades disponíveis desses elementos no solo podem provocar efeitos tóxicos às

plantas, diminuindo seu potencial produtivo, ou acumulando-se em determinadas partes da planta.

O teor de zinco (Zn) em todas as camadas do solo foi significativamente maior nos tratamentos com lodo de esgoto, comparado aos tratamentos T e FM. Dimitriou et al. (2006), ao estudar a dinâmica de metais pesados em plantios de *Salix* sp. conduzidos por talhadia, verificaram que aplicação de lodo de esgoto elevou em até 40% o teor de zinco no solo em relação ao tratamento com fertilização mineral. Segundo esses autores, este efeito ocorreu principalmente nas camadas de 0-5 e 5-15 cm de profundidade do solo, mesmo após 3 anos da aplicação do lodo.

No tratamento L30S, o teor de zinco na camada de 0-5 cm do solo foi 72 vezes maior comparado aos tratamentos T e FM e, na camada de 20-40 cm, foi 66 vezes maior. Segundo Andrade e Mattiazzo (2000), a movimentação do zinco ao longo do perfil do solo e o seu acúmulo, muitas vezes em camadas mais profundas, podem ser atribuídos à possível complexação do Zn por substâncias orgânicas solúveis que percolam no solo.

3.3.2 Biomassa aérea e estoque de nutrientes

Comparando-se o efeito residual dos lodos de esgoto seco (S) e úmido (U), aplicados ao solo nas doses de 10, 20 e 30 t ha⁻¹, verificou-se que a biomassa seca de lenho produzida em L10S foi cerca de 80% maior (em torno de 7 t ha⁻¹) em comparação à biomassa produzida nos tratamentos T e L30U (Tabela 3.4). Da mesma forma, a biomassa de casca, folhas e galhos produzida em L10S foi significativamente maior em relação aos tratamentos T e L30U.

Tabela 3.4 – Biomassa seca (t ha⁻¹) dos componentes aéreos das árvores de *E. grandis*, conduzidas por talhadia e submetidas aos tratamentos: Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com 10, 20 e 30 t ha⁻¹ dos lodos de esgoto úmido (L10U, L20U e L30U) e seco (L10S, L20S e L30S)

Tratamento	Lenho	Casca	Galhos	Folhas	Total
T	8,70 b	1,12 b	1,80 b	1,22 b	13,53 b
FM	14,78 ab	1,99 ab	2,38 ab	1,98 ab	22,70 ab
L10U	13,86 ab	1,86 ab	2,31 ab	1,88 ab	21,29 ab
L20U	10,05 ab	1,32 ab	1,96 ab	1,41 ab	15,55 ab
L30U	8,78 b	1,14 b	1,83 b	1,25 b	13,62 b
L10S	15,97 a	2,17 a	2,53 a	2,14 a	24,45 a
L20S	10,37 ab	1,36 ab	1,95 ab	1,44 ab	16,05 ab
L30S	11,92 ab	1,58 ab	2,12 ab	1,63 ab	18,39 ab

Nota: Para cada componente arbóreo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Silva (2006), ao estudar o crescimento de *E. grandis* adubado com doses de lodo de esgoto seco e úmido, observou efeitos positivos do lodo sobre o crescimento das árvores. Este pesquisador constatou também que a dose de 10 t ha⁻¹ de lodo seco foi a mais adequada no cultivo das plantas, propiciando um volume de madeira equivalente ao obtido com a aplicação de 20 e 30 t ha⁻¹ dos lodos de esgoto úmido e seco.

Segundo Michell, Edwards e Ferrier (2000), os adubos orgânicos contrastam consideravelmente dos fertilizantes minerais que, ao serem fabricados, apresentam composição química definida e constante para um uso nutricional específico. Tendo isso em vista, a ausência de linearidade de resposta das árvores ao aumento das doses de lodo (úmido ou seco) pode ser justificada por um maior desbalanço nutricional nas doses de 20 e 30 t ha⁻¹ de lodo em comparação à dose de 10 t ha⁻¹.

De acordo com a tabela 3.5 e 3.6, o efeito residual do lodo de esgoto úmido ou seco alterou positivamente a concentração de nutrientes em alguns componentes arbóreos, principalmente no tratamento com 30 t ha⁻¹ de lodo. Neste contexto, a concentração de fósforo (P) na casca produzida nos tratamentos L10S e L30S foi cerca de duas vezes maior em comparação aos tratamentos T e FM (concentração média de P na casca = 0,410 g kg⁻¹).

As concentrações de cálcio (Ca) nas folhas e nos galhos no tratamento L30S foram até duas vezes maiores, principalmente, em relação às concentrações de Ca observadas no tratamento T. Apesar dos lodos de esgoto úmido e seco (aplicados em 2003) não terem sido condicionados com cal, a quantidade de cálcio adicionada ao solo no tratamento L30S foi consideravelmente elevada (745 kg ha⁻¹) se comparada ao tratamento FM (440 kg ha⁻¹).

Em contrapartida, a concentração de magnésio (Mg) nas folhas, lenho, galhos e casca no tratamento FM foi cerca de 50 a 90% superior, respectivamente, em relação às concentrações de Mg observadas nos demais tratamentos. Silva et al. (2008), ao estudarem a concentração foliar de nutrientes em plantios de *E. grandis* fertilizados com lodos de esgoto úmido e seco, verificaram que as concentrações de Mg foram similares entre os tratamentos com aplicação dos lodos; porém, inferiores aos valores obtidos no tratamento com fertilização mineral (2,5 g kg⁻¹). Os autores atribuíram estes resultados à calagem realizada exclusivamente no tratamento com fertilização mineral.

A concentração da maioria dos micronutrientes nos componentes aéreos das árvores (Tabela 3.6) foi similar entre os tratamentos, com exceção do zinco (Zn). Neste caso, a concentração de Zn no lenho produzido nos tratamentos com lodo de esgoto úmido e seco foi significativamente superior (cerca de 120%) comparado aos tratamentos T e FM.

Tabela 3.5 – Concentração de macronutrientes (g kg^{-1}) nos componentes aéreos das árvores de *E. grandis* conduzidas por talhadia, nos tratamentos: Testemunha (*T*); Efeito residual da fertilização mineral (*FM*) e da adubação com lodo de esgoto úmido (*L10U*, *L20U* e *L30U*) e seco (*L10S*, *L20S* e *L30S*)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
LENHO						
<i>T</i>	1,56 ab	0,348 a	0,5 a	0,348 a	0,125 b	0,361 a
<i>FM</i>	1,47 ab	0,477 a	0,7 a	0,395 a	0,184 a	0,388 a
<i>L10U</i>	1,38 b	0,516 a	0,5 a	0,363 a	0,106 b	0,409 a
<i>L20U</i>	1,53 ab	0,359 a	0,5 a	0,410 a	0,098 b	0,167 a
<i>L30U</i>	1,39 b	0,375 a	0,4 a	0,488 a	0,114 b	0,204 a
<i>L10S</i>	1,54 ab	0,278 a	0,6 a	0,447 a	0,123 b	0,168 a
<i>L20S</i>	1,93 a	0,454 a	0,6 a	0,452 a	0,123 b	0,281 a
<i>L30S</i>	1,64 ab	0,423 a	0,5 a	0,487 a	0,103 b	0,175 a
CASCA						
<i>T</i>	4,06 a	0,430 b	2,5 ab	5,900 a	1,278 b	0,185 a
<i>FM</i>	4,21 a	0,390 b	2,7 ab	9,090 a	2,252 a	0,200 a
<i>L10U</i>	4,15 a	0,431 b	3,3 a	10,565 a	1,512 ab	0,223 a
<i>L20U</i>	3,85 a	0,490 ab	2,1 ab	11,984 a	1,359 ab	0,182 a
<i>L30U</i>	3,66 a	0,513 ab	1,8 b	12,313 a	1,138 b	0,215 a
<i>L10S</i>	3,81 a	0,930 a	2,8 ab	10,565 a	1,433 ab	0,213 a
<i>L20S</i>	4,27 a	0,650 ab	1,7 b	9,254 a	1,495 ab	0,211 a
<i>L30S</i>	3,52 a	0,939 a	2,0 ab	14,691 a	1,427 ab	0,177 a
GALHOS						
<i>T</i>	4,77 a	0,406 a	2,9 a	1,804 c	0,571 b	0,176 a
<i>FM</i>	4,58 a	0,425 a	2,3 abc	2,968 ab	1,011 a	0,196 a
<i>L10U</i>	4,64 a	0,541 a	1,9 bcd	2,515 bc	0,580 b	0,158 a
<i>L20U</i>	4,61 a	0,492 a	1,5 d	2,875 ab	0,585 b	0,194 a
<i>L30U</i>	4,89 a	0,624 a	1,6 cd	3,348 ab	0,751 ab	0,237 a
<i>L10S</i>	4,88 a	0,534 a	2,6 ab	3,556 ab	0,716 ab	0,220 a
<i>L20S</i>	5,08 a	0,690 a	2,1 bcd	3,145 ab	0,780 ab	0,186 a
<i>L30S</i>	4,61 a	0,564 a	1,9 bcd	4,494 a	0,905 ab	0,215 a
FOLHAS						
<i>T</i>	17,63 a	1,598 a	4,1 a	3,651 b	2,058 b	0,869 abc
<i>FM</i>	19,03 a	1,656 a	4,5 a	5,130 ab	2,955 a	1,024 a
<i>L10U</i>	17,79 a	1,627 a	4,3 a	4,430 b	1,783 b	0,731 c
<i>L20U</i>	17,33 a	1,653 a	3,4 a	5,177 ab	1,727 b	0,775 bc
<i>L30U</i>	17,26 a	1,693 a	3,4 a	6,120 ab	2,033 b	1,045 a
<i>L10S</i>	18,03 a	1,669 a	4,2 a	5,433 ab	1,997 b	0,808 abc
<i>L20S</i>	18,49 a	1,740 a	3,7 a	6,165 ab	2,230 b	0,942 ab
<i>L30S</i>	18,60 a	1,755 a	3,3 a	7,438 a	2,211 b	0,958 ab

Nota: Para cada elemento químico e componente aéreo do eucalipto (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

No tratamento L30S, a concentração de Zn na casca e nos galhos do eucalipto foi até 9 vezes superior aos valores obtidos nos tratamentos T e FM. Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001), a concentração de zinco na planta é diretamente proporcional à quantidade de Zn disponível na solução do solo. Neste trabalho, a aplicação de 30 t ha^{-1} do lodo de esgoto seco adicionou ao solo cerca de 100 kg de Zn por hectare, ou seja, até 50 vezes mais zinco em comparação ao tratamento com fertilização mineral, que adicionou apenas $2,1 \text{ kg ha}^{-1}$.

Tabela 3.6 – Concentração de micronutrientes (mg kg⁻¹) nos componentes aéreos das árvores de *E. grandis* conduzidas por talhadia, nos tratamentos: Testemunha (*T*); Efeito residual da fertilização mineral (*FM*) e da adubação com lodo de esgoto úmido (*L10U*, *L20U* e *L30U*) e seco (*L10S*, *L20S* e *L30S*)

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>LENHO</i>					
<i>T</i>	4,613 a	1,46 a	8,839 ab	32,867 a	2,983 b
<i>FM</i>	2,840 a	1,69 a	13,914 a	28,933 a	3,171 b
<i>L10U</i>	3,480 a	1,39 a	8,645 ab	28,300 a	6,243 a
<i>L20U</i>	2,253 a	1,46 a	11,117 ab	28,517 a	8,471 a
<i>L30U</i>	2,107 a	2,17 a	10,603 ab	28,350 a	9,133 a
<i>L10S</i>	4,227 a	1,56 a	7,620 b	31,117 a	6,872 a
<i>L20S</i>	4,960 a	1,75 a	8,886 ab	25,333 a	7,132 a
<i>L30S</i>	2,973 a	1,34 a	7,437 b	23,883 a	9,504 a
<i>CASCA</i>					
<i>T</i>	15,280 a	4,183 a	50,200 a	460,400 a	4,533 b
<i>FM</i>	18,987 a	3,783 a	46,567 a	435,967 a	4,600 b
<i>L10U</i>	16,333 a	2,900 a	43,933 a	505,167 a	7,600 ab
<i>L20U</i>	17,440 a	3,000 a	38,800 a	397,833 a	5,967 ab
<i>L30U</i>	13,827 a	3,367 a	45,733 a	387,900 a	9,200 ab
<i>L10S</i>	17,813 a	3,633 a	41,900 a	476,100 a	6,867 ab
<i>L20S</i>	12,987 a	3,400 a	36,300 a	364,033 a	9,200 ab
<i>L30S</i>	17,613 a	3,667 a	47,100 a	378,833 a	11,767 a
<i>GALHOS</i>					
<i>T</i>	7,747 a	8,100 a	32,167 a	184,067 a	5,167 d
<i>FM</i>	7,480 a	8,000 a	34,033 a	197,267 a	5,233 d
<i>L10U</i>	7,293 a	7,500 a	34,133 a	221,667 a	9,067 dc
<i>L20U</i>	8,467 a	7,000 a	30,167 a	262,267 a	9,333 dc
<i>L30U</i>	9,760 a	6,967 a	38,067 a	227,200 a	12,400 bc
<i>L10S</i>	8,973 a	7,033 a	36,167 a	269,833 a	9,533 bcd
<i>L20S</i>	10,200 a	10,367 a	31,333 a	229,133 a	15,100 ab
<i>L30S</i>	8,347 a	8,133 a	29,833 a	241,733 a	18,200 a
<i>FOLHAS</i>					
<i>T</i>	25,040 a	9,000 ab	113,367 a	284,033 a	7,700 b
<i>FM</i>	30,107 a	8,133 ab	132,133 a	307,800 a	8,667 b
<i>L10U</i>	31,640 a	6,933 b	128,900 a	288,700 a	8,233 b
<i>L20U</i>	28,787 a	8,400 ab	106,400 a	320,333 a	10,200 b
<i>L30U</i>	28,600 a	10,333 a	121,233 a	315,100 a	13,867 ab
<i>L10S</i>	31,413 a	9,767 ab	111,900 a	332,633 a	11,967 b
<i>L20S</i>	28,320 a	8,400 ab	118,133 a	310,633 a	14,067 ab
<i>L30S</i>	30,387 a	9,500 ab	117,967 a	335,567 a	19,067 a

Nota: Para cada elemento químico e componente aéreo do eucalipto (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

Observa-se na figura 3.2 que os estoques de nutrientes nas árvores de *E. grandis*, conforme estimativas proporcionadas pela eq. 3.1, foram na maioria das vezes maiores nos tratamentos LE e FM em relação à testemunha absoluta (*T*). Os estoques de nitrogênio (*N*) e potássio (*K*) nos componentes arbóreos foram maiores (60-100%) nos tratamentos *L10S* e *FM*, ao passo que, os estoques de fósforo (*P*) foram maiores nos tratamentos *FM* e *L10U*, principalmente em relação aos tratamentos *T* e *L30U*. Neste caso, os maiores estoques de *N*, *K* e *P* podem ser atribuídos ao maior acúmulo de biomassa aérea do que à concentração destes elementos nas árvores, submetidas ao efeito dos tratamentos *FM*, *L10U* e *L10S*.

Os estoques de cálcio (Ca) foram, em todos os tratamentos com lodo de esgoto, cerca de duas vezes maiores em relação ao tratamento T; porém, similares ao tratamento FM. Apesar da pequena diferença entre os tratamentos, quanto às concentrações de Ca nos tecidos do eucalipto, o estoque de Ca na casca foi consideravelmente mais elevado em comparação aos demais componentes aéreos das árvores. Segundo Bellote e Silva (2005), a casca das árvores de *E. grandis* pode acumular significativas quantidades de cálcio em comparação ao demais componentes e, por isso, ser um importante reservatório deste elemento para suprir as futuras demandas nutricionais da planta.

Considerando os componentes aéreos do eucalipto, o estoque de magnésio (Mg) foi significativamente maior nas árvores do tratamento FM em relação aos demais tratamentos. Este resultado pode ser atribuído principalmente à maior concentração de Mg nos tecidos vegetais do eucalipto sob efeito residual da calagem, que foi efetuada exclusivamente no tratamento FM (em 2003), no plantio inicial dos eucaliptos.

Apesar do efeito residual dos lodos de esgoto úmido e seco sobre o teor de enxofre (S-SO_4^{2-}) no solo (Tabela 3.3), os estoques deste elemento (S) nos componentes aéreos do eucalipto foram significativamente inferiores nos tratamentos L20U, L30U, L20S e L30S, assim como no tratamento T, quando comparados aos tratamentos FM e L10S (Figura 3.2). Apesar disso, o estoque de S no lenho representou em todos os tratamentos cerca de 70% do estoque total na biomassa aérea das árvores de *E. grandis*.

Em geral, nota-se na figura 3.2, que os estoques de micronutrientes variaram proporcionalmente ao acúmulo da biomassa aérea em cada tratamento. Por isso, os estoques de cobre (Cu) e manganês (Mn) foram até 2 vezes maiores nos tratamentos FM e L10S em relação ao tratamento T, ao passo que, os estoques de zinco (Zn) chegaram a ser até 4 vezes maiores em L30S. Nesses casos, há de se destacar que os estoques de Cu, Mn e, principalmente, de Zn foram expressivamente maiores no tronco (lenho+casca) das árvores do que nas folhas e galhos, o que pode ser considerado desejável sob o ponto de vista ambiental (HOLM; HEINSOO, 2013), considerando-se a possibilidade de remoção destes elementos do sítio, por meio da colheita periódica da madeira.

Da mesma forma que Nissim et al. (2013) constatou que, ao longo do tempo, a fertilização com lodo de esgoto pode desempenhar importante papel sobre o crescimento e a produção de biomassa em plantios de *Salix viminalis*, também conduzidos em regime de talhadia. A análise dos resultados do presente trabalho também demonstrou haver, de fato, um significativo efeito residual positivo dos lodos de esgoto úmido e seco sobre o crescimento e os estoques de nutrientes contidos na biomassa aérea das árvores de *E. grandis*.

Figura 3.2 – Estoque de nutrientes em cada componente aéreo das árvores de *E. grandis*, conduzidas por talhadia e submetidas aos tratamentos: testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral e das doses 10, 20 e 30 t ha⁻¹ dos lodos de esgoto úmido (L10U, L20U e L30U) e seco (L10S, L20S e L30S). Para cada nutriente, médias do estoque total seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$)

O efeito residual do lodo de esgoto pode tornar-se mais efetivo e perdurar por maior período de tempo caso sejam adotadas as práticas do cultivo mínimo, quando a casca e demais componentes das árvores (folhas e galhos) são deixados sobre o solo do talhão, após a colheita da madeira (GONÇALVES et al., 2004). Ao manter estes materiais orgânicos no local de cultivo, promove-se a reciclagem de nutrientes, além de conservar a umidade e a matéria orgânica do solo (GONÇALVES et al., 2008).

Portanto, o efeito residual do lodo de esgoto bem como o manejo adequado dos resíduos florestais, visando à manutenção dos estoques de nutrientes dentro do sistema solo-planta, podem contribuir significativamente para assegurar a produtividade florestal e a sustentabilidade do ecossistema como um todo.

3.4 Conclusões

A adubação dos plantios de *E. grandis* com lodo de esgoto úmido ou seco, mesmo 8 anos após a sua aplicação, exerceu efeito residual positivo sobre a fertilidade do solo em relação aos plantios sem qualquer adubação, elevando os teores de fósforo, cálcio, enxofre e zinco. Todavia, o efeito residual dos lodos foi similar entre às aplicações na forma úmida e seca, bem como entre as doses de 10, 20 e 30 t ha⁻¹.

De maneira geral, o efeito residual do lodo de esgoto sobre o acúmulo de biomassa aérea pelos brotos de *E. grandis* foi positivo, principalmente na dose de 10 t ha⁻¹ de lodo seco, que propiciou um acréscimo de 80% na biomassa aérea em relação ao tratamento testemunha.

Entretanto, não se evidenciou efeito residual dos lodos de esgoto sobre a concentração dos nutrientes nos componentes aéreos dos eucaliptos (folhas, galhos, casca e lenho), com exceção do zinco, cuja concentração foliar elevou-se significativamente na dose 30 t ha⁻¹ de lodo seco.

A adubação com os lodos de esgoto úmido ou seco em plantios de *E. grandis* exerceu efeito residual positivo sobre o cultivo sucessivo do eucalipto em regime de talhadia, elevando os estoques de nutrientes (ex. fósforo e zinco) nos galhos, folhas, lenho e casca.

Considerando que determinados nutrientes contidos nos lodos de esgoto (ex. fósforo, cálcio e zinco) são absorvidos e estocados predominantemente no lenho e na casca das árvores de *E. grandis*, pressupõe-se que, em sistemas de cultivo de ciclo curto e talhadia, estes elementos sejam exportados do sítio por meio da colheita periódica da madeira, reduzindo assim a possibilidade de se acumularem no solo.

Referências

- ANDRADE, C.A. de; MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de bio sólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 59-72, dez. 2000.
- BARROS, N.F de; TEIXEIRA, P.C.; TEIXEIRA, J.L. Nutrição e produtividade de povoamentos de eucalipto manejados por talhadia. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 79-87, 1997.
- BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONGALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 105-133.
- BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S.; CAMARGO, O.A. de; BATAGLIA, O.C. Peletização do lodo de esgoto e adição CaCO_3 na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu e Ni pelo milho em três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 685-691, 1997.
- BERTON, R.S.; NOGUEIRA, T.A.R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. (Org.). **Uso Agrícola de Lodo de Esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do Conama**. Botucatu, SP: FEPAF, 2010. p. 31-50.
- COBB, W.R.; WILL, R.E.; DANIELS, R.F.; JACOBSON, M.A. Aboveground biomass and nitrogen in four short-rotation woody crop species growing with different water and nutrient availabilities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n.12, p.4032-4039, 2008.
- DIMITRIOU, I.; ERIKSSON, J.; ADLER, A.; ARONSSON, P.; VERWIJST, T. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and Wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice. **Environmental Pollution**, Barking, v. 142, n. 1, p. 160-169, 2006.
- FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. da. Condução de plantios de *Eucalyptus* em sistema de talhadia. In: FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. da (Org.). **Formação de Povoamentos Florestais**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2008. p. 85-97.
- FLORENCE, R.G. **Ecology and Silviculture of Eucalyptus Forests**. Collingwood/AUS: CSIRO, 1996. 413p.
- GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACALU, J.P., SMETHURST, P., GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 45–61, 2004.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.
- GUEDES, M.C.; ANDRADE, C.A. de; 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**, Campinas, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006.

HOLM, B.; HEINSOO, K. Municipal wastewater application to short rotation coppice of willows – treatment efficiency and clone response in Estonian case study. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, 2013. In press.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace Elements in Soils and Plants**. 3rd.ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 413p.

KELTY, M.J.; MENALLED, F.D.; CARLTON, M.M. Nitrogen dynamics and red pine growth following application of pelletized biosolids in Massachusetts, USA. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, n. 7, p. 1477-1487, 2004.

MAGESAN, G.N.; WANG, H. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: an overview. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 41, p. 557-569, 2003.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A de. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MANTOVI, P.; BALDONI, G.; TODERI, G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. **Water Research**, New York, v. 39, n. 2/3, p. 289-296, 2005.

MITCHELL, D.S.; EDWARDS, A.C.; FERRIER, R.C. Changes in fluxes of N and P in water draining a stand of Scots pine treated with sewage sludge. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, n. 1/3, p. 203-213, 2000.

NISSIM, W.G.; PITRE, F.E.; TEODORECU, T.I.; LABRECQUE, M. Long-term biomass productivity of willow bioenergy plantations maintained in southern Quebec, Canada. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 56, n.1, p. 361-369, 2013.

PAIVA, A.V. de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L. de M.; FERRAZ, A. de V. Crescimento de mudas de espécies arbóreas nativas, adubadas com diferentes doses de lodo de esgoto seco e com fertilização mineral. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 499-511, 2009.

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

REIS, G.G. dos; REIS, M. das G.F. Fisiologia da brotação de eucalipto com ênfase nas suas relações hídricas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 9-22, 1997.

ROY, M.; COUILLARD, D. Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil. **Water Research**, New York, v. 32, n. 5, p. 1642-1652, 1998.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2002-2003.

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

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

SIMS, R.E.H.; SENELWA, K.; MAIAVA, T.; BULLOCK, B.T. *Eucalyptus* species for biomass energy in New Zealand – Part II: Coppice performance. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 17, n.4, p. 333-343, 2013.

SUHADOLC, M.; SCHROLL, R.; HAGN, A.; DÖRFLER, U.; SCHLOTER, M.; LOBNIK, F. Single application of sewage sludge – Impact on the quality of an alluvial agricultural soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 81, n. 11, p. 1536-1543, 2010.

TAILLIS, F.; NIEDERWALD, G. The coppice system. In: MATTHEWS, J.D. (Org.). **Silvicultural systems**. Oxford, UK: Clarendon Press, 1989. p. 190-212.

TSUNECHIRO, A.; COELHO, P.J.; CASER, D.V.; BUENO, C.R.F.; PINATTI, E.; CASTANHO FILHO, E.P. Valor da produção agropecuária e florestal de São Paulo em 2009: estimativa preliminar. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 10, p. 83-94, 2009.

VEGA, F.V.A.; BOVI, M.L.A.; BERTON, R.S.; GODOY JUNIOR, G.; CEMBRANELLI, M. de A.R. Aplicação de biossólido na implantação da cultura da pupunheira. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 131-135, 2004.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V.; BONACINA, D.M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 371-379, 2011.

4 EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO COM DIFERENTES LODOS DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM ÁREAS DE REFORMA DE PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis*

Resumo

No Brasil, a expansão dos plantios florestais tem ocorrido, geralmente, em solos de baixa fertilidade natural e, por isso, a demanda por práticas de fertilização tem se tornado cada vez maior. Por outro lado, vem sendo incentivado o uso agrícola do lodo de esgoto, devido aos benefícios que, a médio e longo prazo, podem ser gerados através da reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes contidos em sua composição. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito residual da adubação (efetuada em 2005) com diferentes lodos de esgoto, produzidos em três estações de tratamento (ETEs) da região metropolitana de São Paulo, sobre a fertilidade do solo, a produção de biomassa aérea e a ciclagem de nutrientes em áreas de reforma de plantios de *Eucalyptus grandis*. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 4 repetições e 5 tratamentos, sendo: 1) Testemunha, sem adubação (T); 2) Efeito residual da fertilização mineral (FM) e 3, 4 e 5) Efeito residual dos 3 lodos produzidos nas ETEs de Barueri (LB), São Miguel (SM) e Parque Novo Mundo (LP). Além das origens diferentes, os três lodos sofreram processos de condicionamento distintos, que proporcionaram características físico-químicas específicas. O experimento foi iniciado em maio de 2011, quando a aplicação dos lodos completou seis anos e a área de cultivo foi reformada, com o plantio de mudas clonais de *E. grandis*. Com exceção do tratamento, foi efetuada a adubação potássica em todas as parcelas, devido à usual carência deste elemento nos lodos de esgoto. Antes do plantio, foram coletadas amostras de terra até a profundidade de 40 cm do solo. Seis meses após o plantio das mudas, foi avaliado o estado nutricional das árvores e, até os 18 meses de idade, foram mensurados periodicamente os diâmetros e as alturas dos fustes. Aos 12 meses, foi quantificada a biomassa aérea das árvores e a transferência de nutrientes para o solo, via deposição de folheto. Observou-se efeito residual positivo dos lodos de esgoto sobre os teores de nitrogênio, fósforo, cálcio e zinco, principalmente, na camada de 0-5 cm do solo. A concentração foliar desses elementos foi significativamente maior nas árvores cultivadas nos tratamentos LB, LS e LP. As árvores submetidas ao efeito residual dos lodos cresceram até 150% mais, acumularam cerca de 4 vezes mais biomassa aérea e estocaram até 5 vezes mais nutrientes em comparação às árvores cultivadas nos tratamentos T ou FM. No intervalo de seis meses, a partir do fechamento das copas, a produção de folheto nos tratamentos com efeito residual dos lodos foi até 1.500 kg ha⁻¹ maior e a transferência de nutrientes para o solo, via folheto, foi até seis vezes superior aos tratamentos T e FM. Vale destacar, que a intensidade do efeito residual dos lodos variou de acordo com a ETE de origem, ou seja, conforme o tipo de esgoto e condicionamento do lodo utilizado.

Palavras-chave: Biossólido; Eucalipto; Deposição de Folheto; Estoque de Nutrientes

Abstract

In Brazil, the expansion of forest plantations has occurred, generally, in low-nutrient soils and therefore the demand for fertilization practices has become increasingly larger. On the other hand, the agricultural use of sewage sludge has been encouraged due to the benefits generated through the recycling of organic matter and nutrients contained in its composition, at medium and long term. The aim of this study was to evaluate the long term effect of

different sewage sludge (applied in 2005), produced in three wastewater treatment plants (WTPs) in the metropolitan region of São Paulo, on soil fertility, aboveground biomass and nutrient cycling in areas undergoing stand reform of *Eucalyptus grandis*. The experimental design consisted of randomized blocks, with four replications and five treatments: 1) control, without fertilization (C) 2) Long term effect of mineral fertilization (MF) and 3, 4 and 5) Long term effect of the three sludges produced in wastewater treatment in Barueri (SB), São Miguel (SS) and Parque Novo Mundo (SP). Apart from different sources, the three sewage sludges were submitted to different conditioning processes, providing the specific physico-chemical characteristics. The experiment was initiated in May/2011, when the sludge application complete six years old and the plots were reformed through the planting of clonal seedling of *E. grandis*. With the exception of control treatment, all the plots were fertilized with potassium, due to the usual lack of this element in sewage sludge. Before planting, soil samples were collected until depth of 40 cm. Six months after the eucalypts seedlings planting, the nutritional status of the trees was evaluated and, up to 18 months of age, diameters and heights of stems were periodically measured. At 12 months, the aboveground biomass and the transfer of nutrients to the soil, throughout leaf fall, were quantified. It was observed a positive long term effect of the sewage sludges on the nitrogen, phosphorus, calcium and zinc content, especially in the 0-5 cm soil layer. The leaf concentration of these elements was significantly greater in SB, SS and SP treatments. The trees submitted to long term effect of the sludge growth 150% more, accumulating about 4 times more biomass and stocking up to 5 times more nutrients than the trees growing in C and MF treatments. In a period of six months, from the canopy closing, leaf fall production in treatments with long term effect of the sludge was up to 1,500 kg ha⁻¹ greater and the transfer of nutrients to the soil was up to six times greater than C and MF treatments. It is worth noting that the intensity of the long term effect of sludge varied according to the WTP origin, depending on the type and conditioning of the sewage sludge used.

Keywords: Biosolids; Eucalypt; Leaf Fall; Nutrient Stocking

4.1 Introdução

No Brasil, a expansão dos reflorestamentos de eucalipto tem ocorrido em áreas onde, geralmente, os solos são de baixa fertilidade natural (BELLOTE; FERREIRA; SILVA, 2008). Por isso, nos últimos anos, as práticas de fertilização e de manejo de resíduos da colheita (ex. casca e galhos) têm sido implementadas com reflexos favoráveis sobre a sustentabilidade das plantações florestais (LACLAU; GONÇALVES; STAPE, 2013). Consequentemente, a silvicultura brasileira e mundial tem se tornado cada vez mais dependente de fertilizantes para que haja a manutenção ou elevação da produtividade florestal, o que tem ocasionado significativa elevação dos custos de produção (GONÇALVES et al. 2013).

Por outro lado, sabe-se que o maior contribuinte à poluição orgânica dos corpos d'água é o esgoto doméstico e, assim, seu tratamento sanitário tem sido prioritário para a recuperação dos cursos d'água (PAIVA et al., 2009). Atualmente, várias estações de

tratamento de esgoto vêm sendo instaladas no Brasil, o que tem gerado crescentes quantidades de lodo de esgoto (SCHEER et al., 2012) que, geralmente, são descartadas inadequadamente em aterros sanitários (GOMES et al., 2013). No entanto, o lodo de esgoto devidamente tratado poderia representar um grande potencial para ser aplicado como adubo orgânico aos plantios agrícolas e florestais, o que seria uma das alternativas mais adequadas para a sua disposição final (MELO et al., 2007), visto que favorece o processo de reciclagem dos nutrientes do ambiente urbano para os ecossistemas rurais.

Geralmente, os lodos contêm elevado teor de matéria orgânica, além de grande quantidade de elementos essenciais às plantas, tais como o nitrogênio, o fósforo, o cálcio e diversos micronutrientes (TORRI; LAVADO, 2008), o que desperta o interesse por parte dos grandes e pequenos produtores rurais.

As características de um lodo de esgoto dependem do tipo de esgoto, do processo e grau de tratamento de esgoto, do tipo de lodo (primário, secundário, terciário), do processo de tratamento do lodo de esgoto, entre outros (TSUTIYA, 2001). O condicionamento do lodo para a desidratação pode ser efetuado com cloreto férrico mais cal ou, simplesmente, com a adição de polímeros (polieletrólitos), o que resulta em lodos com características bem distintas entre si (SOBRINHO, 2000). Até o presente, o condicionamento do lodo de esgoto com cal e cloreto férrico, devido à sua simplicidade e baixo custo, tem sido escolhido pela maioria das estações de tratamento de esgoto (ETEs) (PAIVA et al., 2009). Apesar disso, algumas ETEs da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) têm optado pelo uso de polímeros no condicionamento do lodo (SILVA et al., 2008).

De acordo com Prescott e Blevins (2005), a aplicação de lodo de esgoto em plantios florestais pode promover também, em longo prazo, melhoras na qualidade do sítio de cultivo e, conseqüentemente, na produção de madeira pelas árvores e no processo de ciclagem de nutrientes nos povoamentos, superando inclusive os efeitos residuais da fertilização mineral convencional. Michell, Edwards e Ferrier (2000) consideram que os fertilizantes orgânicos e minerais diferem significativamente entre si quanto à liberação dos nutrientes para o solo, à eficiência de absorção pelas plantas e às perdas por lixiviação. Por isso, é de extrema importância conhecer seus atributos e verificar os efeitos em longo prazo que as aplicações de lodo de esgoto podem exercer sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (FERNANDES et al., 2005).

Segundo McLaren et al. (2007), os efeitos em longo prazo dos nutrientes e metais pesados adicionados ao solo devido à aplicação do lodo de esgoto são ainda objetos de muita discussão e de considerável interesse pela comunidade científica mundial. Vale salientar, que

a presença de metais pesados no lodo se deve principalmente à contaminação do esgoto doméstico com resíduos industriais (TSUTIYA, 2010; NOGUEIRA et al.; 2010), o que poderia ser evitado com maior fiscalização e emprego das leis ambientais vigentes.

Por mais que algumas pesquisas tenham demonstrado que a aplicação do lodo de esgoto no cultivo de eucalipto age como fonte de nutrientes para as plantas e de matéria orgânica para o solo; as decisões a serem tomadas nos próximos anos necessitam de novos estudos relacionados aos aspectos da ciclagem de nutrientes, balanço nutricional no sistema solo-planta e presença de contaminantes no solo (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006).

Quanto à ciclagem de nutrientes em plantios florestais, a produção de serapilheira e sua posterior decomposição constituem a via mais importante do ciclo biogeoquímico (fluxo de nutrientes no sistema solo-planta-solo) (SCHUMACHER et al., 2004) que é essencial para a manutenção das funções ecológicas da floresta ou da produtividade dos plantios comerciais (BERTHELOT; RANGER; GELHAYE, 2000). Segundo Guo e Sims (2002), há ainda certa limitação do conhecimento sobre os fatores inerentes ao gênero *Eucalyptus* quanto à produção de serapilheira em função das diferentes práticas silviculturais, dentre as quais se destaca a adubação com lodo de esgoto, que pode afetar a composição química do folheto e, conseqüentemente, a taxa de decomposição da serapilheira.

O presente trabalho teve, portanto, como objetivo avaliar os efeitos residuais da adubação (efetuada há 6 anos) com diferentes lodos de esgoto, produzidos em três ETES da região metropolitana de São Paulo, sobre a fertilidade do solo, a produção de biomassa aérea e a ciclagem de nutrientes em áreas de reforma de plantios de *Eucalyptus grandis*.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental

Este trabalho foi conduzido na área experimental AE-28, sobre um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, A moderado, textura média (Tabela 4.1) e relevo plano. Localizada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, a área foi instalada em maio/2005, com o plantio de mudas de *E. grandis* e adubação com diferentes lodos de esgoto, produzidos em três ETES da região metropolitana de São Paulo (FERRAZ, 2009).

A área experimental foi dividida em quatro blocos (repetições), sendo cada um composto por cinco parcelas dispostas aleatoriamente. Cada uma das cinco parcelas comportou, em 2005, um dos seguintes tratamentos: 1) Testemunha absoluta, sem qualquer adubação (T); 2) Fertilização mineral convencional (FM); 3, 4 e 5) Adubação com 15 t ha⁻¹

(base seca) dos Lodos de esgoto produzidos nas ETEs de Barueri (LB), São Miguel (LS) e Parque Novo Mundo (LP), complementados com cloreto de potássio. No momento das adubações, os lodos de esgoto foram dispostos em faixas de aproximadamente 0,5 m de largura sobre a superfície do solo, ao longo das linhas de plantio das mudas de *E. grandis*.

Tabela 4.1 - Atributos químicos e físicos do solo em diferentes profundidades (Prof.), antes da implantação (2005) da área experimental AE-28

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	M.O g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H + Al mmolc dm ⁻³	SB	CTC	V %
0 - 5	3,6	47	4	0,7	2	1	68	3,4	71,4	5
5 - 20	3,8	25	2	0,4	1	1	49	2,4	51,0	5
20 - 40	3,9	20	1	0,2	1	1	41	2,2	43,2	5

Prof. (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia Total	Silte	Argila Total
	mg dm ⁻³					%		
0 - 5	0,1	3,6	294	1,8	0,3	81	4,0	15,0
5 - 20	0,2	2,2	103	0,7	0,2	78	4,0	18,0
20 - 40	0,1	1,1	63	0,5	0,1	78	4,0	18,0

Nota: Análises química e física do solo realizadas segundo metodologia proposta por Raij et al. (1987) e Camargo et al. (1986), respectivamente.

Em 2005, os lodos de esgoto produzidos nas ETEs de Barueri e São Miguel já eram condicionados com polieletrólito, ao passo que o lodo da ETE do Parque Novo Mundo era condicionado com CaO e FeCl₃. Isto proporcionou lodos com características químicas distintas entre si, conforme consta na Tabela 4.2. Quanto a isso, vale ressaltar que a elevada quantidade de cálcio (Ca) no lodo de São Miguel adveio do despejo de resíduos industriais, a base de CaSO₄, na rede de esgoto doméstica (informação da SABESP); ao passo que, no lodo do Parque Novo Mundo, o Ca foi suprido por meio do seu condicionamento com cal.

Na implantação do tratamento FM, a fertilização mineral aplicada em 2005 foi: 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (aplicado a lanço em área total) e 200 kg ha⁻¹ do fertilizante NPK 6-30-6 + 80 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 (aplicados em covetas laterais). Aos 3, 6 e 9 meses após o plantio das mudas no campo foram aplicados também 200 kg ha⁻¹ de NPK 18-6-24 (em forma de coroa, ao redor da planta). O suplemento mineral FTE Br 12 contribuiu com a seguinte composição química: 9% de zinco; 1,8% de boro; 0,8% de cobre; 2% de manganês; 3,5% de ferro e 0,1% de molibdênio.

Cada parcela foi composta por 100 mudas de *E. grandis*, estabelecidas no espaçamento de plantio de 2x3 metros, totalizando uma área de 600 m² por parcela. Tendo em vista a utilização de bordadura dupla, a área útil de cada parcela ficou constituída por 36 plantas, configurando uma área de 216 m².

Tabela 4.2 - Caracterização química dos lodos de esgoto produzidos pelas ETEs de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo, quando foram aplicados (em 2005) nos plantios de *Eucalyptus grandis*

Atributos	Unidade	----- Estação de Tratamento de Esgoto -----		
		Parque N. Mundo	São Miguel	Barueri
pH em CaCl ₂ a 0,01 M	-	8,2	7,6	7,7
Densidade	g cm ⁻³	0,69	1,08	1,08
Umidade _{total}	g kg ⁻¹	67,17	71,32	81,59
Matéria Orgânica _{total}	g kg ⁻¹	506,5	538,4	557,8
Nitrogênio total	g kg ⁻¹	17,1	16,4	36,9
Fósforo (P ₂ O ₅) _{total}	g kg ⁻¹	28,9	24,8	44,5
Potássio (K ₂ O) _{total}	g kg ⁻¹	1,2	1,4	2,2
Cálcio (Ca) _{total}	g kg ⁻¹	112,4	108,4	27,7
Magnésio (Mg) _{total}	g kg ⁻¹	3,4	1,7	4,3
Enxofre (S) _{total}	g kg ⁻¹	6,1	6,6	6,5
Relação C/N	-	16/1	18/1	8/1
Cobre (Cu) _{total}	mg kg ⁻¹	457	66	858
Manganês (Mn) _{total}	mg kg ⁻¹	289	328	369
Zinco (Zn) _{total}	mg kg ⁻¹	1.130	429	3.026
Ferro (Fe) _{total}	mg kg ⁻¹	82.574	34.878	42.401
Boro (B) _{total}	mg kg ⁻¹	6	3	16
Sódio (Na) _{total}	mg kg ⁻¹	880	2.329	1.108
Cádmio (Cd) _{total}	mg kg ⁻¹	5,0	2,0	7,06
Chumbo (Pb) _{total}	mg kg ⁻¹	76	36	220
Cromo (Cr) _{total}	mg kg ⁻¹	526	49	497
Níquel (Ni) _{total}	mg kg ⁻¹	141	241	389

Nota: Método empregado para os metais pesados: SW 3051, EPA – U.S, determinação por ICP-AES. Todos os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

Em julho de 2010, foi feito o corte raso das árvores estabelecidas há 5 anos na área AE-28. Após a colheita das árvores, a área foi submetida às práticas de pré-reforma, incluindo o controle de daninhas com glifosato Roundup e o controle de formigas cortadeiras com isca formicida granulada e micro-porta-isca (MIPIS) da marca Mirex-S®. Em novembro de 2010, deu-se início à reforma dos plantios experimentais, realizando o coveamento manual entre os tocos das árvores do ciclo de cultivo anterior, de modo a alocar as mudas de eucalipto sobre a mesma faixa onde os lodos de esgoto haviam sido aplicados em 2005.

Em janeiro de 2011, a área AE-28 foi replantada (reforma) com mudas clonais de *Eucalyptus grandis*, produzidas no viveiro da companhia Suzano de Papel e Celulose. O espaçamento de plantio utilizado foi também de 2 metros entre plantas e 3 metros entre linhas de plantio. Três meses após o plantio, cada muda de eucalipto foi adubada com 45 g de cloreto de potássio (KCl), com exceção daquelas pertencentes ao tratamento Testemunha, sem qualquer adubação.

Entretanto, em junho e agosto de 2011, a ocorrência de duas geadas consecutivas ocasionaram a morte de quase todas as plantas do experimento, o que obrigou realizar uma nova reforma da área AE-28. Portanto, em setembro/2011, foram retiradas todas as plantas mortas ou sobreviventes às geadas para, em seguida, serem realizadas novamente as atividades de reforma já citadas anteriormente. Em outubro de 2011, foram implantadas novas mudas clonais de *E. grandis*, também fornecidas pela empresa Suzano de Papel e Celulose.

Aos 3 e 9 meses de idade, cada muda de eucalipto foi adubada com 45 g de KCl, com exceção daquelas pertencentes ao tratamento T. Neste mesmo período, foi efetuado um novo controle de plantas daninhas, por meio de capina manual ao redor das mudas e aplicação de herbicida nas entrelinhas de plantio, bem como um novo controle de formigas cortadeiras. Durante a experimentação, as árvores foram submetidas a diversas avaliações conforme exposto nos itens a seguir.

4.2.2 Variações climáticas durante o período de estudo

De acordo com a figura 4.1, o regime pluviométrico e as variações das temperaturas máximas e mínimas ao longo do período de estudo (julho/2010 a julho/2013) foram similares ao padrão apresentado pela normal da cidade de Itatinga-SP (ROLIM; SENTELHAS, 1999).

Seguindo a ordem cronológica dos eventos e das práticas efetuadas ao longo do experimento, tem-se que as precipitações acumuladas entre os meses de outubro a dezembro/2010 e de janeiro a março/2011 foram de 375,71 e 684,09 mm e as temperaturas médias mínimas foram de 11,3 e 17,0 °C, respectivamente. Nessas condições, pode-se dizer que as mudas de eucalipto plantadas em janeiro/2011 contaram com boa disponibilidade de água, devido à recarga do solo pelas chuvas, e com temperaturas amenas.

No entanto, em junho e agosto/2011, ocorreram duas geadas consecutivas que ocasionaram temperaturas mínimas absolutas de -1,9 e -1,0 °C, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, estas geadas causaram a morte das mudas de eucalipto implantadas em janeiro de 2011. Após o novo plantio de mudas de *E. grandis*, em outubro de 2011, a precipitação acumulada entre os meses de outubro/2011 a março/2012 foi de 1010 mm e as temperaturas médias máximas e mínimas foram de 32,7 e 11,1°C, respectivamente, o que favoreceu o estabelecimento e a adaptação das plantas ao sítio de cultivo.

No decorrer desta pesquisa ficou evidente a predominância de dois períodos climáticos distintos na região de Itatinga/SP, sendo o 1º caracterizado como “Período de maior precipitação”, com temperaturas mais elevadas típicas de verão e o 2º como “Período de menor precipitação”, com temperaturas mais baixas típicas de inverno.

Figura 4.1 - Precipitação total, temperaturas médias mínimas e máximas mensais observadas entre os meses de julho/2010 a julho/2013, durante o período de estudo na EECFL. ■ Indicação de ocorrência de geada no período de 27-28/06/2011. ▲ Indicação de ocorrência de geada no período de 04-05/08/2011

Durante o período de maior precipitação, observou-se entre os meses de outubro/2012 a março/2013 uma precipitação acumulada de 1089 mm e uma temperatura média mínima de 14°C; ao passo que, no período de estiagem, as precipitações acumuladas foram de 628 e 434 mm entre os meses de abril a setembro/2011 e de abril a julho/2013, respectivamente, assim como a temperatura média mínima foi de aproximadamente 7°C.

4.2.3 Avaliação da fertilidade do solo

A avaliação da fertilidade do solo na área AE-28 foi realizada em maio de 2011, ou seja, aproximadamente 6 anos depois da aplicação dos três lodos de esgoto nas parcelas experimentais. A amostragem do solo foi efetuada na área útil de cada parcela, em 16 pontos distribuídos aleatoriamente nas linhas de plantio das mudas de eucalipto, ou seja, nas faixas onde foram efetuadas as adubações com os lodos de esgoto ou com fertilizante mineral convencional. Em cada ponto de amostragem, foram retiradas amostras de terra nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade do solo.

Na camada de 0-5 cm, as amostras foram coletadas com o auxílio de uma espátula de aço inoxidável e, nas demais camadas, foi utilizado um trado holandês. As amostras coletadas em cada parcela foram agrupadas por camada, misturadas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 40-45°C, até atingirem peso constante.

Após a secagem, as amostras de terra foram peneiradas (malha de 2 mm), homogeneizadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises Químicas – Pesquisa, do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. No laboratório, as análises para a avaliação da fertilidade do solo ocorreram de acordo com Raij et al. (2001).

4.2.4 Estado nutricional das plantas

A análise do estado nutricional dos eucaliptos foi efetuada em março de 2012, quando as plantas atingiram 6 meses de idade e a aplicação dos lodos de esgoto ao solo completou aproximadamente 7 anos. Inicialmente, foram selecionadas 8 árvores dominantes por área útil/parcela, o que totalizou 32 árvores por tratamento. De cada árvore, foram retiradas 32 folhas recém-maduras da porção média dos galhos, que foram selecionados na base do terço superior da copa e em posições correspondentes aos 4 pontos cardeais, conforme Bellote e Silva (2005).

As amostras de folhas foram agrupadas por parcela e, em seguida, secadas a 60-65°C em estufa de circulação forçada de ar, até atingirem peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais

provenientes da moagem foram encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes, conforme metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989).

4.2.5 Crescimento das árvores em altura e diâmetro do fuste

O crescimento das árvores foi avaliado aos 6, 12 e 18 meses de idade das plantas, por intermédio de inventários florestais na área útil de cada parcela, sendo mensuradas: 1) A altura total das árvores, por meio do uso de hipsômetro eletrônico modelo Vertex III, com precisão de 0,1 m; 2) O diâmetro do fuste à altura da base (DAB) e o diâmetro do fuste à altura do peito (DAP) por meio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. O DAP foi mensurado á 1,30 m de altura da superfície do solo e o DAB à aproximadamente 0,05 metros do chão; em ambos, eram efetuadas duas medições perpendiculares entre si, evitando a presença de galhos ou nós (ex. protuberância no fuste devido ao descolamento de galhos senescentes).

Adicionalmente, até o 1º ano de idade das árvores, foi mensurado o diâmetro da base e a altura das copas, o que possibilitou, com base na forma geométrica do cone reto, o cálculo da superfície e do volume de copa das árvores cultivadas nos diferentes tratamentos. O diâmetro da base das copas foi mensurado em duas direções perpendiculares entre si, com o auxílio de uma trena métrica, e a altura com vara graduada em centímetros.

4.2.6 Quantificação da biomassa aérea e dos estoques de nutrientes

A avaliação da biomassa aérea das árvores e dos estoques de nutrientes nos respectivos componentes vegetais (folhas, galhos, lenho e casca) foi efetuada em novembro de 2012, assim que as plantas completaram 1 ano de idade.

Com base no inventário de outubro/2012, as árvores de cada tratamento foram distribuídas em 12 classes de DAB (diâmetro do tronco à altura da base), para o tratamento T, e em 12 classes de DAP (diâmetro do tronco à altura do peito) para os demais tratamentos. A divisão das árvores do tratamento T em classes de DAB foi necessária devido ao tamanho reduzido das plantas, cuja altura média foi inferior a 1,30 m.

Nos tratamentos T e FM, foram selecionadas três árvores por parcela, sendo escolhidas de acordo com as classes diamétricas. Nos tratamentos com lodo de esgoto, devido a semelhança quanto ao diâmetro e à altura do fuste das árvores, foi selecionado apenas 1 indivíduo por parcela, totalizando 12 árvores para os três tratamentos com lodo. Cada uma dessas árvores foi representante também de uma das classes de DAP.

As árvores selecionadas foram abatidas com serrote manual, por intermédio do corte do tronco próximo ao solo, e desmembradas em folhas, galhos e tronco. Os componentes arbóreos foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 kg e com capacidade máxima de 60 kg. Em seguida, foram recolhidas amostras vegetais da seguinte forma: 1) Em cada terço da copa (superior, médio e inferior), foram coletadas 30 folhas nas quatro direções cardeais, totalizando 90 folhas por árvore; 2) Nesses mesmos terços, buscou-se coletar amostras de galhos finos ($\varnothing \leq 2$ cm) e grossos ($\varnothing > 2$ cm) e 3) A partir do plano de corte do tronco, foram coletados discos de madeira com ± 3 cm de espessura, nas distâncias de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura total das árvores.

Em laboratório, as folhas foram escaneadas para cálculo da área foliar específica (AFE), conforme metodologia descrita no item 4.2.7. Em seguida, os discos do tronco foram subdivididos em lenho e casca. Posteriormente, as amostras de lenho e casca, assim como as de folhas e galhos, foram pesadas separadamente em balança digital com precisão de 0,01 g. Após a anotação dos pesos úmidos, as amostras foram secadas a 60-65°C em estufa de circulação forçada de ar, até atingirem peso constante. Com base nas biomassas úmida e seca foi possível determinar a umidade de cada componente arbóreo amostrado no campo. A separação do lenho e da casca permitiu estabelecer também a contribuição de cada um desses componentes para a biomassa do tronco das árvores.

Com base nos resultados de amostragem das árvores, foram estabelecidos modelos matemáticos específicos para o tratamento T, FM e para o grupo de árvores pertencentes aos tratamentos LB, LS e LP. Estes modelos foram definidos por meio de regressão linear e das relações dendrométricas entre o DAP ou DAB, a altura e a biomassa aérea das árvores. Estes modelos foram utilizados para estimar a biomassa seca de cada componente arbóreo aéreo (lenho, casca, galhos e folhas), em cada tratamento avaliado.

Depois de estimadas as biomassas secas, as amostras de cada componente arbóreo foram agrupadas por parcela e moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais provenientes da moagem foram condicionados em sacos plásticos previamente identificados e, em seguida, encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes, de acordo com a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989).

À medida que as análises químicas foram realizadas, a quantidade de nutrientes estocada em cada componente aéreo das árvores de *E. grandis* e em cada tratamento foi estimada pela eq. 4.1.

$$EN_{ij} = CN_{ij} * BS_j \quad (4.1)$$

Onde:

EN_{ij} = Estoque do nutriente “i” no componente aéreo “j” da árvore (kg ha^{-1} ou mg ha^{-1});

CN_{ij} = Concentração do nutriente “i” no componente aéreo “j” da árvore (g kg^{-1} ou mg kg^{-1});

BS_j = Biomassa seca estimada do componente aéreo “j” da árvore (kg ha^{-1}).

4.2.7 Tamanho das folhas e área foliar específica das árvores

A área foliar específica (AFE) das árvores foi quantificada por intermédio das mesmas 90 folhas coletadas durante a amostragem da biomassa, conforme descrito no item 4.2.6. Essas folhas foram limpas com papel absorvente, digitalizadas através do scanner HP Scanjet G2710 (com resolução de 300 dpi) e pesadas em balança eletrônica analítica com precisão de 0,01 gramas. As imagens digitais (extensão JPGE e resolução de 300dpi) das folhas foram processadas por meio do software *ImageJ* (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Janela do programa *ImageJ* contendo as folhas antes do seu processamento (A) e após a sua análise digital (B)

Com a análise das imagens digitais, foram quantificados o comprimento (mm), a largura (mm) e a área (mm^2) de cada folha amostrada. De posse dos resultados, a área foliar específica (AFE) foi estimada pela eq. 4.2 e a área foliar total de cada árvore foi estimada pela eq. 4.3.

$$AFE = \frac{AF}{BF * 1000} \quad (4.2)$$

$$AFT = AFE * BFT \quad (4.3)$$

Onde:

AFE = Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$);

AF = Área da folha com base na matéria verde (mm^2);

BF = Biomassa da folha com base na matéria seca (g);

AFT = Área foliar total da árvore ($\text{m}^2 \text{árvore}^{-1}$);

BFT = Biomassa total de folhas da árvore com base na matéria seca (kg árvore^{-1})

4.2.8 Produção de folheto e devolução de nutrientes para o solo

A produção de folheto foi estimada através da quantificação das folhas caducas (folheto), depositadas em 6 coletores distribuídos na parte central da área útil de cada parcela. Os coletores, constituídos por telas de náilon tipo sombrite (50%) e moldura de ferro com dimensões de 50 x 50 cm, foram fixados sobre tubos de policloreto de polivinila (pvc) a 30 cm de altura da superfície do solo (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Coletores distribuídos na área útil de cada parcela (A). Folheto depositado mensalmente no coletor (B)

A instalação dos coletores foi efetuada em 15 de dezembro de 2012, quando ocorreu o encontro das copas e, conseqüentemente, o recobrimento total das entre linhas de plantio (fechamento de copas). Neste momento, as árvores atingiram 15 meses de idade e a distribuição dos coletores foi efetuada sistematicamente para que fosse amostrado $\frac{1}{4}$ da área funcional de uma árvore, conforme a figura 4.4.

As amostras de folheto foram coletadas mensalmente e, em seguida, colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60-65 °C para a secagem, até atingirem peso constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g. e, em

seguida, agrupadas por parcela. Com base no peso seco das amostras, foi estimada a produção mensal de folheto por hectare, para cada tratamento.

Figura 4.4 - Coletores A, B, C, D, E e F distribuídos na área útil de cada parcela. No canto inferior esquerdo, representação da área funcional de uma árvore e do 1/4 amostrado pelos 6 coletores distribuídos em cada parcela

A produção de folheto foi avaliada entre 15/12/12 e 15/06/13, totalizando 6 meses de coletas mensais. As amostras coletadas mensalmente foram agrupadas a cada trimestre por parcela, conforme as seguintes estações do ano: 1) Período de verão, de 15/12/12 a 14/03/2013 e 2) Período de outono, de 15/03/13 a 14/06/13. Após o agrupamento, as amostras compostas foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais provenientes da moagem foram encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes, de acordo com a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989). Assim que as análises químicas foram concluídas, a quantidade de nutrientes devolvida ao solo pela deposição do folheto foi estimada pela eq. 4.3.

$$QND_{ij} = CN_{ij} * BS_j \quad (4.3)$$

Onde:

QND_{ij} = Quantidade do nutriente “i” devolvido ao solo no período “j” (kg ha^{-1} ou mg ha^{-1});

CN_{ij} = Concentração do nutriente “i” no período “j” (g kg^{-1} ou mg kg^{-1});

BS_j = Biomassa seca de folheto produzido no período “j” (kg ha^{-1}).

4.2.9 Análises estatísticas

Inicialmente, os resultados foram verificados quanto às pressuposições básicas estatísticas (ex. normalidade, homogeneidade da variância etc.) e a necessidade de transformação dos dados, que foi realizada pelo método de potência ótima de Box-Cox. Depois dessa fase preliminar, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, comparados estatisticamente entre si através do teste de Tukey a 5% de nível de significância. Para as análises utilizou-se o software estatístico SAS (9.1) for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Fertilidade do solo, 6 anos após a adubação com lodo de esgoto

A avaliação da fertilidade do solo na área AE-28 foi realizada no mês de maio/2011, ou seja, 6 anos após a adubação das árvores com os três lodos de esgoto. Conforme a tabela 4.3, o efeito residual dos lodos de esgoto provocou alterações significativas no pH do solo, variando de acordo com o tipo de lodo utilizado.

No tratamento LP, o pH em todas as camadas do perfil do solo (0-40 cm) foi maior que os pHs nos demais tratamentos. Na camada de 0-5 cm do solo, o pH chegou a ser 1,31 a 1,74 unidades maior no tratamento LP, comparado aos tratamentos LS e LB, respectivamente. Por outro lado, o pH em todas as camadas do solo no tratamento LB foi significativamente menor que os pHs nos demais tratamentos, com exceção do tratamento T.

Segundo Berton e Nogueira (2010), lodos estabilizados com cal hidratada tendem a aumentar o pH e os teores de cálcio no solo, diminuindo assim a sua acidez potencial e podendo provocar uma lixiviação de potássio e magnésio para as camadas sub-superficiais. Os mesmos autores salientam ainda que lodos estabilizados sem o emprego da cal hidratada tendem a acidificar o solo e alterar muito pouco os teores de cátions trocáveis do solo.

A “acidez total” ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) observada nas camadas de 0-20 cm do solo foi significativamente inferior no tratamento LP em relação aos demais tratamentos (Tabela 4.3), chegando a ser até 4 vezes menor. Com a elevação do pH do solo no tratamento LP, a

solubilidade do Al^{3+} deve ter diminuído, fazendo com que este elemento viesse a precipitar na forma de $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (ROSSIELLO; NETTO, 2006). Conseqüentemente, a acidez total do solo passou a patamares relativamente menores.

Por outro lado, a “acidez total” na camada 0-5 cm do solo foi aproximadamente 40% maior no tratamento LB se comparado aos tratamentos T e FM. Segundo Guedes et al. (2006), o efeito acidificante de alguns tipos de lodo de esgoto sobre o solo pode ser atribuído à constante liberação de ácidos orgânicos, às reações de nitrificação e de oxidação de sulfitos. Villanueva et al. (2012), ao estudarem as mudanças químicas do solo tratado com lodo de esgoto, observaram que a acidez total ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) elevou-se linearmente com o aumento das doses de lodo no solo, fato que atribuíram à própria acidez do solo ($\text{pH} = 4,3$) e à acidez aportada pelo lodo de esgoto.

Tabela 4.3 - Atributos químicos do solo em plantios de *Eucalyptus grandis* sem adubação (T), sob efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com os lodos de esgoto produzidos nas ETEs de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

(continua)

Tratamento	pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P _{resina} ----- mg dm ⁻³ -----	S-SO ₄ ²⁻ ----- mg dm ⁻³ -----	N _{total} mg kg ⁻¹	K ⁺ ----- mmolc dm ⁻³ -----	Ca ²⁺ mmolc dm ⁻³	Mg ²⁺ mmolc dm ⁻³	SB
<i>Profundidade de 0-5 cm</i>									
T	3,68 cd	20,1 b	5,6 b	5,0 b	756,8 b	0,50 a	0,61 d	0,72 c	1,9 d
FM	3,86 bc	22,8 ab	6,0 b	4,6 b	872,8 ab	0,60 a	3,02 c	3,03 a	6,9 bc
LB	3,47 d	25,7 a	38,4 a	8,3 a	1097,7 a	0,67 a	3,73 c	1,06 b	5,5 c
LS	3,90 b	21,9 ab	6,3 b	7,0 ab	1028,4 a	0,42 a	7,92 b	0,56 c	9,5 b
LP	5,21 a	25,1 a	40,5 a	5,2 b	1040,6 a	0,50 a	47,47 a	1,11 b	49,1 a
<i>Profundidade de 5-10 cm</i>									
T	3,81 bc	14,6 a	5,0 b	5,5 c	...	0,51 a	0,92 c	0,67 bc	2,1 c
FM	3,86 b	13,8 a	5,1 b	4,9 c	...	0,51 a	1,08 c	1,42 a	3,0 bc
LB	3,66 c	13,2 a	6,5 a	12,7 a	...	0,46 a	1,75 bc	0,75 b	3,0 bc
LS	3,84 b	12,5 a	4,5 b	11,8 a	...	0,41 a	3,00 b	0,57 c	4,0 b
LP	4,40 a	13,7 a	7,6 a	7,0 b	...	0,46 a	18,24 a	0,69 bc	19,3 a
<i>Profundidade de 10-20 cm</i>									
T	3,73 b	13,8 a	2,1 a	4,5 c	...	0,23 a	0,12 c	0,59 b	0,9 c
FM	3,84 b	14,9 a	2,4 a	4,3 c	...	0,28 a	0,21 c	1,88 a	2,7 ab
LB	3,63 c	14,3 a	2,8 a	15,4 a	...	0,21 a	0,61 bc	0,66 b	1,5 bc
LS	3,77 b	14,7 a	1,3 b	15,9 a	...	0,24 a	1,14 b	0,57 b	1,9 b
LP	4,11 a	14,9 a	3,5 a	8,2 b	...	0,28 a	6,36 a	0,65 b	7,3 a
<i>Profundidade de 20-40 cm</i>									
T	3,78 bc	10,7 a	1,6 a	4,3 c	...	0,17 a	0,21 c	0,56 b	1,0 c
FM	3,82 b	10,6 a	1,7 a	4,4 c	...	0,19 a	0,29 bc	1,12 a	1,7 b
LB	3,73 c	10,4 a	1,5 a	23,5 a	...	0,16 a	0,46 bc	0,59 b	1,2 bc
LS	3,79 b	10,3 a	1,1 b	32,3 a	...	0,19 a	0,61 b	0,54 b	1,4 bc
LP	3,92 a	11,5 a	2,0 a	13,9 b	...	0,21 a	2,94 a	0,55 b	3,7 a

Tabela 4.3 - Atributos químicos do solo em plantios de *Eucalyptus grandis* sem adubação (T), sob efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com os lodos de esgoto produzidos nas ETEs de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

									(conclusão)
Tratamento	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺	CTC	V%	m%	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----	mmolc dm ⁻³	-----			-----	mg dm ⁻³	-----	
Profundidade de 0-5 cm									
T	14,57 ab	87,5 b	89,0 bc	2,1 d	16,33 a	2,23 b	77,2 b	1,09 b	0,20 c
FM	11,84 b	79,9 b	87,0 bc	7,9 b	11,57 b	2,89 b	74,9 b	2,57 a	0,50 c
LB	17,09 a	122,1 a	126,0 a	4,4 c	13,46 ab	7,44 a	123,2 a	1,70 ab	27,37 a
LS	15,86 ab	95,0 b	104,9 ab	9,1 b	15,12 ab	0,72 c	79,0 b	0,37 c	6,93 b
LP	0,02 c	27,3 c	76,5 c	63,8 a	0,03 c	5,28 a	66,7 b	1,12 b	8,01 b
Profundidade de 5-10 cm									
T	12,33 ab	74,9 a	77,0 ab	2,8 b	16,02 ab	0,97 bc	62,1 a	0,48 ab	0,15 d
FM	10,48 b	68,7 a	73,5 ab	3,9 b	14,24 b	0,99 bc	48,7 a	0,68 a	0,25 d
LB	13,70 ab	79,2 a	82,1 a	3,6 b	16,80 ab	1,82 ab	63,1 a	0,75 a	8,89 a
LS	15,70 a	83,1 a	87,2 a	4,5 b	17,96 a	0,65 c	54,4 a	0,28 c	2,50 b
LP	1,63 c	46,0 b	65,5 b	29,7 a	2,42 c	1,98 a	47,0 a	0,36 bc	1,20 c
Profundidade de 10-20 cm									
T	10,05 bc	76,1 b	77,1 b	1,2 c	13,01 b	1,10 bc	73,0 a	0,45 b	0,07 d
FM	8,73 c	72,9 b	76,3 b	3,6 ab	11,36 b	1,30 b	72,0 a	0,65 a	0,21 d
LB	12,10 ab	89,6 a	91,1 a	1,6 bc	13,27 b	2,02 a	80,9 a	0,69 a	8,22 a
LS	13,98 a	89,3 a	91,4 a	2,1 bc	15,31 a	1,04 c	75,2 a	0,26 c	1,92 b
LP	4,15 d	58,5 c	65,8 b	11,1 a	6,34 c	2,00 a	73,8 a	0,33 c	0,83 c
Profundidade de 20-40 cm									
T	8,93 bc	67,2 b	68,2 b	1,4 c	13,09 bc	0,99 bc	53,9 a	0,37 a	0,05 c
FM	8,00 c	64,6 b	66,5 b	2,5 b	12,10 c	1,06 b	52,8 a	0,41 a	0,09 c
LB	9,95 b	69,7 ab	70,9 ab	1,7 bc	14,05 b	1,26 a	52,0 a	0,45 a	4,85 a
LS	13,00 a	79,1 a	80,5 a	1,7 bc	16,15 a	0,92 c	51,7 a	0,21 c	0,69 b
LP	6,75 d	61,5 b	65,3 b	5,6 a	10,23 d	1,37 a	57,8 a	0,27 b	0,48 b

Nota: Para cada atributo químico e profundidade do solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

... Dados numéricos não disponíveis.

Nos tratamentos LB e LP, o teor de fósforo (P_{resina}) na camada de 0-5 cm do solo foi cerca de 8 vezes maior em comparação aos demais tratamentos. Por sua vez, o teor de enxofre (S-SO₄²⁻) a partir da camada de 5-10 cm do solo foi superior em todos os tratamentos com lodo de esgoto, chegando a ser 6 vezes maior (na camada de 20-40 cm) em relação aos tratamentos T e FM.

Segundo Sousa et al. (2010), a retenção do fósforo em solos ácidos está ligada, principalmente, a reações de adsorção deste nutriente à fase sólida do solo. Devido a esta reação de adsorção, o fósforo disponível na solução do solo para as plantas torna-se, na maioria dos casos, indisponível por tempo indeterminado. Segundo Poggiani, Silva e Guedes (2006) e Graciano et al. (2008), a adubação com lodo de esgoto apresenta certa vantagem em

relação à fertilização mineral, visto que libera para o solo mais lentamente o fósforo contido em sua composição para o solo, permitindo otimizar a absorção deste nutriente pelas plantas e evitando sua perda por imobilização nos óxidos de ferro e alumínio.

O teor de matéria orgânica na camada de 0-5 cm do solo foi 25% superior nos tratamentos LB e LP em comparação à testemunha. Por sua vez, o teor de nitrogênio total (N_{total}) na camada de 0-5 cm do solo foi, nos três tratamentos com lodo de esgoto, cerca de 40% superior ao teor de N_{total} no tratamento T. Harrison et al. (1994) verificaram que os teores de matéria orgânica e de nitrogênio total aumentaram na ordem de 100% e 250%, respectivamente, após a aplicação acumulada de 500 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em plantios de *Pinus ponderosa*, ao longo de 15 anos de idade, quando comparados aos teores de M.O e de N_{total} no solo do tratamento controle.

Observa-se ainda, na tabela 4.3, que os teores de cálcio (Ca^{2+}) em todas as profundidades do solo foram no tratamento LP significativamente superiores aos demais tratamentos. Neste caso, os teores de Ca^{2+} nas camadas de 0-5 e de 20-40 cm do solo chegaram a ser 80 e 15 vezes maiores, respectivamente, comparado ao tratamento T. Por ter sido condicionado com CaO e FeCl₃, o lodo da ETE do Parque Novo Mundo adicionou ao solo cerca de 1700 kg ha⁻¹ de cálcio no momento de sua aplicação, o que certamente ocasionou os maiores teores de Ca^{2+} no solo.

Em todas as camadas do solo, o teor de magnésio (Mg^{2+}) no tratamento FM foi de 3 a 4 vezes maior em relação aos demais tratamentos. A calagem do solo, além de elevar o pH e a saturação por bases, é também fonte de nutrientes como o cálcio e o magnésio (FAGERIA, 2001a). Na implantação da área AE-28, a calagem no tratamento FM (com calcário dolomítico) adicionou ao solo cerca de 200 kg ha⁻¹ de Mg^{2+} , ao passo que nos demais tratamentos (com aplicação dos lodos de esgoto) a adição de magnésio ao solo não passou de 65 kg ha⁻¹. Por este motivo, o efeito residual da calagem é percebido até o presente pela maior concentração de Mg^{2+} no solo do tratamento FM.

O teor de cobre (Cu) em todas as camadas do solo foi 2,5 vezes maior nos tratamentos LB e LP, comparados aos demais tratamentos. Porém, o teor de Cu (também em todas as camadas do solo) no tratamento LS foi um dos menores (em média de 0,83 mg dm⁻³), inclusive, se comparado ao tratamento FM. Por outro lado, o teor de zinco (Zn) em todas as camadas do solo foi maior nos tratamentos adubados com lodo de esgoto, principalmente com o lodo da ETE de Barueri-SP. No tratamento LB, o teor de Zn na camada de 20-40 cm do solo foi cerca de 100 vezes maior, se comparado ao tratamento T e, na camada de 0-5 cm, esta diferença elevou-se para 140 vezes.

Egiarte et al. (2008), ao monitorarem a lixiviação dos metais pesado em plantio florestal adubado várias vezes com lodo de esgoto, notaram que a concentração de Zn na água de percolação foi cerca de 40 vezes maior no tratamento com 60 t ha⁻¹ de lodo. Apesar disso, os mesmos autores constataram que a maior parte do Zn (99,3%) aplicado com o lodo concentrou-se na camada superficial do solo, o que foi atribuído a sua retenção pelos sítios de adsorção orgânicos e minerais.

4.3.2 Nutrição mineral das árvores

De acordo com a tabela 4.4, a concentração foliar de nitrogênio nas árvores do tratamento LB foi estatisticamente similar aos demais tratamentos com lodo de esgoto, mas foi cerca de 20% maior em comparação aos tratamentos T e FM. Segundo Kriedemann e Cromer (1996), as concentrações de nitrogênio (N) nas folhas de *Eucalyptus grandis* são freqüentemente relacionadas com o crescimento das árvores, uma vez que o N estimula a expansão da copa e, conseqüentemente, o processo fotossintético das plantas.

A concentração foliar de fósforo (P) foi, em média, superior nos tratamentos com lodo de esgoto, com destaque aos tratamentos LB e LP, cuja concentração foliar de P foi aproximadamente 40% maior em relação aos tratamentos T e FM. Egiarte et al. (2005), ao estudarem o efeito de repetidas aplicações de lodo de esgoto em plantios de *Pinus radiata*, constaram que a concentração foliar de P foi cerca de 30% superior nas árvores adubadas com lodo por dois anos, em relação àquelas cultivadas no tratamento controle, sem qualquer adubação.

Tabela 4.4 – Concentração de macronutrientes (g kg⁻¹) nas folhas de *E. grandis*, aos 6 meses de idade das árvores submetidas aos tratamentos: Testemunha (T); Fertilização mineral (FM) e com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
T	22,42 b	1,048 c	4,0 c	5,464 c	1,722 b	1,507 a
FM	22,31 b	1,072 c	6,2 b	5,045 c	2,011 a	1,490 a
LB	26,08 a	1,453 ab	6,8 b	7,873 b	1,714 b	1,797 a
LS	23,32 ab	1,222 bc	6,8 b	10,624 a	1,453 bc	1,635 a
LP	24,59 ab	1,526 a	7,9 a	11,813 a	1,366 c	1,626 a

Nota: Para cada elemento químico (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Observa-se ainda na tabela 4.4, que as árvores submetidas aos tratamentos LP e LS apresentaram concentrações foliares de cálcio significativamente superiores aos demais tratamentos, superando em 40% o tratamento LB e em 140% os tratamentos T e FM. Conforme a tabela 4.2, a quantidade de cálcio adicionada ao solo com a aplicação dos lodos

de São Miguel e Parque Novo Mundo foi de aproximadamente 1.700 kg ha⁻¹, ao passo que, nas tratamentos FM e LB, essa quantidade foi de 400-500 kg de Ca por hectare.

Por outro lado, as concentrações foliares de magnésio (Mg) nos tratamentos com lodo foram significativamente inferiores ao tratamento FM, principalmente, no tratamento LP, cuja a concentração foliar de Mg foi cerca de 30% menor. Segundo Fageria (2001b), grandes quantidades de cálcio no solo podem inibir a absorção de magnésio e o potássio pelas plantas, acarretando em baixas concentrações foliares destes elementos. Apesar disso, por algum outro motivo fisiológico-nutricional, a concentração foliar de potássio no tratamento LP foi significativamente maior em comparação aos demais tratamentos, superando em cerca de 100% o tratamento T e em 20% os tratamentos LS, LB e FM.

Conforme a tabela 4.5, a concentração foliar de cobre e ferro não sofreu qualquer alteração em função ao efeito residual dos lodos de esgoto ou da fertilização mineral. Martins, Bataglia e Camargo (2003), ao estudarem a fitodisponibilidade do cobre em solo tratado com lodo, verificaram que grande parte do cobre no solo+lodo encontra-se associado à fração orgânica, seguida pelas frações residual (silicatos de alta estabilidade), carbonatos e óxidos de Fe e Al, o que torna este elemento metálico pouco disponível para as plantas. Provavelmente, seja esta a explicação também para a menor concentração foliar de manganês de (Mn) observada nos tratamentos LB e LP, principalmente em comparação ao tratamento T, que proporcionou concentração foliar de Mn até 130% maior.

Tabela 4.5 – Concentração de micronutrientes (mg kg⁻¹) nas folhas dos eucaliptos, aos 6 meses de idade, nos tratamentos: Testemunha (T); Fertilização mineral (FM) e com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
T	16,009 a	13,350 a	66,800 a	676,000 a	18,075 c
FM	6,304 c	12,600 a	62,150 a	431,550 c	17,850 c
LB	8,333 bc	14,975 a	68,825 a	550,400 b	35,525 a
LS	9,993 abc	14,350 a	59,075 a	488,075 bc	20,375 bc
LP	12,951 ab	15,925 a	68,525 a	293,875 d	26,425 b

Nota: Para cada elemento químico (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Segundo Torri e Lavado (2008), depois de cessadas as adubações com lodo de esgoto a biodisponibilidade do zinco (Zn) pode elevar-se consideravelmente tendo em vista a decomposição/mineralização da MO existente e, conseqüentemente, a mudança nas formas químicas do Zn presente no solo. Neste trabalho, as concentrações foliares de Zn nos tratamentos com lodo de esgoto foram em média 50% superiores aos tratamentos T e FM,

principalmente no tratamento LB, onde a concentração foliar de zinco foi até 100% superior em relação aos demais tratamentos, inclusive em comparação aos tratamentos LS e LP.

4.3.3 Crescimento das árvores

De acordo com a tabela 4.6, a altura total das árvores aos 6 e 12 meses de idade foi significativamente maior no tratamento LS em comparação aos tratamentos T e FM (de 65 a 175%), bem como em relação aos outros tratamentos com lodo de esgoto (de 8 a 17%). Os tratamentos LB e LS também proporcionaram árvores superiores em altura aos 6 e 12 meses de idade, superando os tratamentos FM e T em até 150%.

Tabela 4.6 – Diâmetro do fuste à altura da base (DAB) e à altura do peito (DAP), altura total (ALT), superfície da copa (ACOP) e volume da copa (VCOP) das árvores de *E. grandis*, de acordo com a idade das plantas e em função dos tratamentos: Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com os lodos de esgoto produzidos nas ETES de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	DAB (mm)	DAP (mm)	ALT (m)	ACOP (m ²)	VCOP (m ³)
<i>IDADE de 6 meses</i>					
T	...	...	0,80 d	2,05 d	0,154 d
FM	...	...	1,12 c	3,30 c	0,357 c
LB	...	...	1,63 b	6,15 b	0,960 b
LS	...	...	1,92 a	7,99 a	1,457 a
LP	...	...	1,64 b	6,18 b	0,966 b
<i>IDADE de 12 meses</i>					
T	34,1 c	na	1,52 e	4,60 d	1,119 d
FM	46,8 b	16,5 c	2,53 d	8,43 c	2,676 c
LB	63,8 a	35,1 b	4,00 b	15,42 ab	6,138 ab
LS	63,9 a	38,1 a	4,18 a	16,29 a	6,711 a
LP	63,1 a	34,0 b	3,84 c	14,72 b	5,775 b
<i>IDADE de 18 meses</i>					
T	50,0 c	24,0 c	2,95 c	...	...
FM	69,4 b	46,4 b	4,89 b	...	...
LB	85,7 a	65,8 a	7,25 a	...	...
LS	86,0 a	65,0 a	7,21 a	...	...
LP	86,4 a	66,3 a	7,15 a	...	...

Nota: Para cada atributo e idade dos eucaliptos (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

... Dado numérico não disponível.

Na idade de 18 meses, os três tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto proporcionaram árvores com altura semelhantes entre si; no entanto, superior aos tratamentos FM e T em 47 e 144%, respectivamente. Prescott e Brown (1998), ao avaliarem o crescimento de três espécies coníferas (*Thuja plicata*, *Tsuga heterophylla* e *Abies amabilis*) após adubações com lodo de esgoto, constaram que a altura das três espécies foi de 2 a 5 vezes maior após 5 anos de aplicação do lodo em comparação às árvores sem qualquer adubação.

Segundo esses autores, a adubação com lodo de esgoto pode promover uma maior resposta em crescimento comparada à fertilização mineral, porque os nutrientes presentes na matriz orgânica serão mineralizados ao longo do tempo, prolongando o aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A superfície e o volume de copa das árvores aos 6 e 12 meses de idade foram significativamente maiores nos tratamentos com lodo de esgoto, superando em até 9 vezes os tratamentos T e FM. O tratamento LS destacou-se também do tratamento LP, pois proporcionou uma superfície e um volume de copa 10 e 30 % maiores, respectivamente. Além de elevar a capacidade fotossintética da planta, a expansão das copas na fase inicial do povoamento é muito desejável, pois aumenta o sombreamento do solo, reduz os custos de controle das plantas daninhas (GONÇALVES et al., 2000) e diminui a erosão do solo.

Vale destacar na tabela 4.6, que o DAB e DAP aos 6 meses de idade não foram avaliados devido ao tamanho reduzido das plantas, enquanto a superfície e o volume de copa não foram avaliados aos 18 meses de idade em razão ao encontro das copas e, conseqüentemente, à incidência de outros fatores de competição (ex. luz).

Na idade de 12 e 18 meses, os diâmetros à altura da base (DAB) e do peito (DAP) foram superiores nas árvores submetidas ao efeito residual dos lodos de esgoto, destacando-se daquelas cultivadas nos tratamentos T e FM. Em ambos os casos, as diferenças chegaram a ser até de 175%. Kimberley et al. (2004), ao estudarem os efeitos da adubação com lodo de esgoto em plantios de *Pinus radiata* (com 11 anos de idade), verificaram que as árvores adubadas com lodo, independentemente da dose aplicada ao solo, apresentaram DAPs 20% maior em relação às árvores do tratamento controle.

Comparados entre si, os tratamentos com os três lodos de esgoto apresentaram resultados significativamente distintos tanto para os diâmetros do tronco, quanto para a altura das árvores, mas até os 12 meses de idade. Todavia, aos 18 meses, os resultados foram similares entre os tratamentos LB, LS e LP. Estes resultados indicam que a composição físico-química original de cada lodo acarreta diferentes efeitos residuais sobre o crescimento inicial das árvores, que nesta fase dependem prioritariamente da fertilidade do solo; porém, com o passar do tempo, essas diferenças podem ser atenuadas em função da transferência dos nutrientes entre os componentes do sistema solo-planta (ciclo biogeoquímico).

4.3.4 Dimensões das folhas e área foliar específica das árvores

Conforme a tabela 4.7, o comprimento do limbo foliar não foi influenciado pelo efeito residual dos lodos de esgoto; mas, a largura do limbo foi nos tratamentos LB, LS e FM

significativamente superior ($\approx 25\%$) ao tratamento T. De maneira similar, a área do limbo foliar foi significativamente maior ($\approx 36\%$) nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto e da fertilização mineral, em comparação ao tratamento testemunha. Segundo White e Scott (2006), as características morfológicas das folhas podem afetar a expansão total da copa e, conseqüentemente, afetar a interceptação da radiação luminosa e a eficiência fotossintética da planta.

Nesta pesquisa, não foram constadas diferenças significativas entre os tratamentos quanto à área foliar específica (AFE) das árvores, que em média foi de $8,32 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. Nouvellon et al. (2010) mediram a área foliar específica em plantios de *Eucalyptus* com diferentes idades e observaram uma forte variação da AFE em relação ao tamanho das árvores, com valores reduzidos para indivíduos dominantes ($9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) em comparação aos indivíduos dominados ($14\text{-}15 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$).

Tabela 4.7 – Valores médios de comprimento (COMP), largura (LARG) e área do limbo foliar, bem como área foliar específica (AFE) e área foliar total (AFT) das árvores de *E. grandis*, em função dos tratamentos: Testemunha (T); Efeito residual da fertilização mineral (FM) e das adubações com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	COMP (mm)	LARG (mm)	ÁREA (mm ²)	AFE (m ² kg ⁻¹)	AFT (m ² árvore ⁻¹)
T	76,12 a	29,45 b	1925,12 b	7,84 a	3,60 d
FM	91,69 a	37,05 a	2568,53 a	7,87 a	6,99 c
LB	91,53 a	36,84 a	2677,71 a	8,65 a	11,79 b
LS	90,27 a	36,16 a	2579,36 a	8,56 a	12,70 a
LP	91,02 a	35,01 ab	2614,42 a	8,68 a	11,50 b

Nota: Para cada atributo da folha ou da árvore (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

A área foliar total de cada árvore foi significativamente maior nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto em relação aos demais; com destaque ao tratamento LS, cuja AFT foi de 80 a 250% maior em relação aos tratamentos FM e T. No tratamento FM, o efeito residual da fertilização mineral, somado à adubação potássica recente, também proporcionou um acréscimo (cerca de 90%) à área foliar total das árvores em relação ao tratamento testemunha. De acordo com Long, Dean e Roberts (2004), muitos estudos têm associado maiores taxas de crescimento das árvores ao acréscimo da área foliar da copa, tanto em resposta a qualidade do sítio de cultivo, quanto em função das práticas silviculturais relacionadas à oferta de nutrientes e água para as plantas.

4.3.5 Biomassa aérea e estoque de nutrientes

Doze meses após o plantio das mudas no campo, a biomassa aérea seca acumulada

pelas árvores (incluindo lenho e casca) sob efeito residual dos lodos de esgoto foi significativamente superior à biomassa acumulada nos tratamentos T e FM (Tabela 4.8). As árvores cultivadas sob efeito residual dos lodos produziram em média 7 a 10 vezes mais biomassa de casca e lenho em comparação às árvores cultivadas nos tratamentos T e FM.

As árvores cultivadas nos tratamentos T e FM acumularam cerca de 50% menos biomassa de galhos e folhas na copa, principalmente, em comparação às plantas submetidas ao efeito residual do lodo de esgoto de São Miguel (em torno de 2,0 t ha⁻¹). Valores similares foram obtidos por Laclau, Bouillet e Ranger (2000), que ao estudarem a produção de biomassa em plantios clonais de *Eucalyptus* no Congo, constataram um acúmulo de 1800 kg ha⁻¹ de folhas ao final do 1º ano de idade das árvores, adubadas com fertilizante mineral.

Por sua vez, a contribuição desses componentes arbóreos (galhos+folhas) na biomassa aérea total das árvores foi significativamente superior nos tratamentos T e FM (de 83 e 77%, respectivamente) em relação aos tratamentos LB, LS e LP (de 61 a 63%). Portanto, além de afetar a produção de biomassa aérea das árvores, o efeito residual dos lodos de esgoto alterou também da partição da biomassa entre os diferentes componentes aéreos do eucalipto.

Tabela 4.8 – Biomassa seca (t ha⁻¹) dos componentes aéreos das árvores de *E. grandis*, aos 12 meses de idade, em função dos tratamentos: Testemunha (T), Efeito residual da fertilização mineral (FM) e da adubação com os lodos de esgoto produzidos nas ETes de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	Lenho	Casca	Galho	Folha	Total aérea
T	0,20 d (11%)	0,09 d (5%)	0,72 d (40%)	0,77 d (43%)	1,78 d (100%)
FM	0,64 c (17%)	0,21 c (6%)	1,40 c (37%)	1,48 c (40%)	3,73 c (100%)
LB	2,16 b (29%)	0,60 b (8%)	2,34 b (32%)	2,27 b (31%)	7,37 b (100%)
LS	2,49 a (30%)	0,68 a (8%)	2,54 a (31%)	2,47 a (30%)	8,18 a (100%)
LP	2,05 b (29%)	0,57 b (8%)	2,22 b (31%)	2,21 b (31%)	7,05 b (100%)

Nota: Para cada componente arbóreo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Valores em parênteses correspondem à contribuição de cada componente vegetal na biomassa aérea total das árvores de *E. grandis*.

No cômputo total, as árvores cultivadas no tratamento LS acumularam cerca de 1000 kg ha⁻¹ a mais de biomassa aérea em relação os outros tratamentos com lodo de esgoto; além disso, o acúmulo foi cerca de 5 a 6 t ha⁻¹ superior em relação aos tratamentos FM e T. Nos

tratamentos LB e LP, as árvores acumularam cerca de 4 t ha⁻¹ a mais de biomassa aérea em relação aos tratamentos T e FM, comprovando o considerável efeito residual positivo dos lodos sobre um novo ciclo de cultivo de *E. grandis*, em área de reforma.

Além da biomassa aérea produzida pelas árvores, o efeito residual dos lodos de esgoto ficou evidente também em relação à concentração de nutrientes nos diferentes componentes aéreos das árvores, conforme a tabela 4.9. Dentre os nutrientes, pode-se destacar a concentração de fósforo (P) na casca e folhas das árvores cultivadas em LB e LP, cujos valores médios (0,878 e 1,257 mg kg⁻¹) foram entre 10 e 20% maiores em relação aos tratamentos T e FM. Este resultado pode ser atribuído à maior quantidade de P adicionado ao solo com a aplicação dos lodos de esgoto e, também, à sua lenta e gradual disponibilização para as plantas, à medida que a matéria orgânica do lodo é mineralizada (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006), evitando inclusive a fixação do P pelos óxidos de ferro e alumínio do solo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

Tabela 4.9 – Concentração de macronutrientes (g kg⁻¹) nos principais componentes aéreos das árvores de *E. grandis*, nos tratamentos: Testemunha (T); Efeito residual da fertilização mineral (FM) e das adubações com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP, respectivamente)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
LENHO						
T	2,93 a	0,747 a	1,5 b	0,688 a	0,125 b	0,069 a
FM	3,16 a	0,747 a	2,1 a	0,538 b	0,200 a	0,069 a
LB	2,95 a	0,763 a	1,8 ab	0,463 b	0,125 b	0,069 a
LS	3,06 a	0,742 a	1,8 ab	0,488 b	0,100 b	0,066 a
LP	3,08 a	0,763 a	2,1 a	0,575 ab	0,100 b	0,071 a
CASCA						
T	5,27 ab	0,830 b	2,7 b	5,518 b	1,375 b	0,129 a
FM	4,62 b	0,823 b	2,7 b	5,909 b	2,050 a	0,115 a
LB	4,94 ab	0,883 a	3,5 a	6,779 ab	1,350 b	0,140 a
LS	5,09 ab	0,846 ab	3,5 a	9,068 a	1,000 c	0,132 a
LP	5,72 a	0,874 a	3,6 a	9,802 a	1,325 b	0,127 a
GALHO						
T	5,45 a	0,814 a	2,1 a	2,488 b	0,575 b	0,110 a
FM	4,49 a	0,802 a	2,5 a	3,425 ab	0,950 a	0,061 b
LB	4,66 a	0,842 a	2,3 a	3,125 b	0,500 bc	0,113 a
LS	4,57 a	0,798 a	2,2 a	3,463 ab	0,350 c	0,102 a
LP	5,03 a	0,830 a	2,5 a	4,725 a	0,525 bc	0,107 a
FOLHA						
T	17,72 a	1,092 c	3,3 c	3,313 b	1,675 bc	0,810 b
FM	17,83 a	1,069 c	4,4 b	3,263 b	2,475 a	0,786 b
LB	19,02 a	1,250 ab	4,7 b	3,313 b	1,750 b	1,084 a
LS	18,70 a	1,164 bc	4,6 b	4,075 b	1,375 c	1,062 a
LP	20,13 a	1,264 a	5,4 a	5,938 a	1,725 b	1,243 a

Nota: Para cada macronutriente e componente aéreo do eucalipto (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

As concentrações de potássio (K) na casca e nas folhas do eucalipto foram significativamente menores (até 40%) no tratamento T em comparação aos demais tratamentos, com destaque ao tratamento LP que proporcionou também maior concentração foliar de K (cerca de 20%) em relação aos tratamentos LB, LS e FM. Este resultado pode ser atribuído a adubação potássica realizada na implantação das mudas de eucalipto, com exceção da testemunha (T), durante a reforma da área de cultivo.

Devido à elevada adição de cálcio no solo, com a aplicação do lodo de esgoto da ETE Parque Novo Mundo, a concentração de cálcio na casca, galhos e folhas das árvores cultivadas em LP foi significativamente maior (em média 50%) em comparação aos demais tratamentos.

Em contrapartida, as concentrações de magnésio (Mg) no lenho, casca, galhos e folhas foram significativamente maiores no tratamento FM, sobrepujando as concentrações de Mg nos demais tratamentos em até 170%. Este resultado pode ser atribuído ao efeito residual da calagem no tratamento FM e, conseqüentemente, à maior quantidade de magnésio (cerca de 200 kg ha⁻¹) adicionada ao solo. Nos tratamentos LB, LS e LP, por não ter sido realizada a calagem, foram adicionados ao solo em 2005 aproximadamente 25 a 65 kg ha⁻¹ de Mg, ou seja, metade da quantidade aplicada no tratamento FM.

Considerando ainda a tabela 4.9, a concentração foliar de enxofre nas árvores cultivadas sob efeito residual dos lodos de esgoto foi, em média, 40% maior em relação aos tratamentos T e FM. Este resultado pode ser atribuído ao maior teor de matéria orgânica MO no solo dos tratamentos LB, LS e LP (tabela 4.3), já que a MO é considerada a principal fonte de enxofre orgânico no solo, que por intermédio da atividade microbiana é convertido em formas minerais (SO₄²⁻) disponíveis para as plantas (ALVAREZ V et al., 2007).

De acordo com a tabela 4.10, a concentração de boro (B), cobre (Cu) e ferro (Fe) nos componentes aéreos do eucalipto foi similar entre os tratamentos, com exceção da concentração de Cu nos galhos e do Fe no lenho, casca e folhas das árvores. Nestes casos, o efeito residual dos lodos de esgoto de Barueri e São Miguel foi evidenciado através da redução da concentração de Cu e Fe (de 20 a 60%) em comparação ao tratamento FM.

De maneira similar, a concentração de manganês (Mn) também foi reduzida pelo efeito residual dos lodos de esgoto, principalmente do lodo produzido pela ETE Parque Novo Mundo. No tratamento LP, por exemplo, a concentração de Mn nas folhas foi cerca de 40% menor em relação ao tratamento T e, no lenho, chegou a ser quase 3 vezes menor. Este resultado, de acordo com Abreu, Lopes e Santos (2007), pode ser atribuído a alta afinidade do manganês pela matéria orgânica do solo+lodo e, conseqüentemente, à formação de complexos

organominerais estáveis e pouco solúveis; assim como, no caso do tratamento LP, à precipitação do Mn na forma de óxidos insolúveis em resposta à correção da acidez do solo pela cal, utilizada no condicionamento do lodo da ETE Parque Novo Mundo.

Por fim, a concentração de zinco no lenho, casca, galhos foi significativamente maior nas árvores cultivadas em LB em comparação às árvores cultivadas nos demais tratamentos. Este resultado pode ser atribuído à elevada quantidade de zinco adicionada ao solo com a aplicação do lodo produzido pela ETE de Barueri (cerca de 50 kg ha⁻¹) em comparação aos tratamentos FM (com cerca de 7 kg ha⁻¹) e aos tratamentos LS e LP, cuja aplicação de zinco foi de aproximadamente de 10 e 20 kg ha⁻¹.

Tabela 4.10 – Concentração de micronutrientes (mg kg⁻¹) nos principais componentes aéreos das árvores de *E. grandis*, nos tratamentos: Testemunha (*T*); Efeito residual da fertilização mineral (*FM*) e das adubações com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (*LB*, *LS* e *LP*, respectivamente)

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
LENHO					
<i>T</i>	2,319 a	5,36 a	22,09 a	57,06 a	1,97 b
<i>FM</i>	2,198 a	5,34 a	24,06 a	42,65 ab	1,61 b
<i>LB</i>	2,537 a	4,47 a	11,95 ab	40,51 bc	14,13 a
<i>LS</i>	2,667 a	4,33 a	9,04 b	31,19 c	2,53 b
<i>LP</i>	2,676 a	4,52 a	20,87 ab	20,45 d	2,48 b
CASCA					
<i>T</i>	14,091 a	5,125 a	79,783 ab	440,750 a	3,750 c
<i>FM</i>	14,273 a	4,500 a	82,496 a	469,875 a	4,000 c
<i>LB</i>	12,527 a	5,125 a	76,578 ab	449,000 a	10,125 a
<i>LS</i>	12,579 a	4,625 a	50,955 b	394,125 a	6,625 b
<i>LP</i>	10,381 a	4,750 a	73,116 ab	273,250 b	7,125 b
GALHO					
<i>T</i>	6,437 ab	9,375 ab	21,087 b	335,750 a	2,572 c
<i>FM</i>	7,332 a	12,000 a	26,391 ab	341,875 a	2,462 c
<i>LB</i>	6,098 ab	9,325 b	29,929 ab	289,375 ab	15,144 a
<i>LS</i>	4,882 b	9,625 ab	29,929 ab	201,125 bc	5,494 b
<i>LP</i>	5,664 ab	11,125 ab	34,071 a	164,000 c	4,691 b
FOLHA					
<i>T</i>	16,905 a	12,375 a	124,779 ab	596,500 a	8,386 b
<i>FM</i>	15,507 ab	10,500 a	136,474 a	520,250 a	8,300 b
<i>LB</i>	13,257 b	11,875 a	124,086 ab	503,250 ab	14,015 a
<i>LS</i>	12,414 b	10,125 a	112,070 b	530,125 a	9,940ab
<i>LP</i>	13,309 b	11,250 a	118,244 ab	383,750 b	11,350 a

Nota: Para cada micronutriente e componente aéreo do eucalipto (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Uma vez que a produção de biomassa aérea e a concentração de nutrientes foram, na maioria das vezes, influenciadas positivamente pelo efeito residual dos lodos de esgoto; o

estoque de nutrientes na biomassa aérea dessas árvores também sofreu influências positivas da adubação com os lodos de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo (Figura 4.5).

Constatou-se que os estoques de nitrogênio, fósforo e enxofre nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto foram em média 2 vezes maiores em relação ao tratamento FM e 4 vezes superiores à testemunha (T). Entre os tratamentos LB, LS e LP, também foram constatadas diferenças significativas entre os estoques de N, P e S na biomassa aérea das árvores; contudo, essas diferenças não passaram de 9%.

O estoque de potássio (K) na biomassa aérea das árvores foi duas vezes maior no tratamento FM em relação à testemunha (T) e de 150% e 400% superior nos tratamentos LB, LS e LP, em comparação aos tratamentos FM e T. Este resultado pode ser atribuído principalmente à maior produção de biomassa aérea nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto (Tabela 4.9). Segundo Mills e Jones Junior (1996), a elevada mobilidade do potássio dentro da planta, atribuída à sua presença na forma iônica livre e à alta permeabilidade das membranas celulares a este elemento, faz com que o K seja facilmente distribuído nos diferentes componentes da planta (folhas, galhos, raízes etc.), o que pode acarretar sua diluição.

Com exceção do tratamento T, todos os demais tratamentos proporcionaram estoques de magnésio (Mg) na biomassa aérea das árvores de aproximadamente $5,5 \text{ kg ha}^{-1}$, seja por causa da maior concentração de Mg nos tecidos da planta (como em FM) ou devido à maior produção de biomassa aérea pelas árvores de *E. grandis* (como em LB, LS e LP). Segundo Silva et al. (2013), a quantidade de nutrientes estocadas na biomassa arbórea depende, sobretudo, da produtividade do povoamento e da concentração de nutrientes nos tecidos da planta.

Os estoques de cálcio na biomassa aérea das árvores foram significativamente maiores a contar do tratamento T para o tratamento FM, seguidos pelos tratamentos LB, LS e LP. No tratamento LP, o estoque de Ca na biomassa aérea das árvores foi 3 e 6 vezes maior em relação aos tratamentos FM e T. Estes resultados podem ser atribuídos a efeito residual dos lodos sobre a concentração de cálcio (Ca) nos tecidos do eucalipto e, também, sobre o maior acúmulo de biomassa aérea pelas árvores. Além disso, o cálcio pode se acumular nos tecidos das árvores, uma vez que a sua mobilidade é extremamente restrita dentro da planta. Segundo Vitti, Lima e Cicarone (2006), a maior parte do Ca encontra-se localizada nas paredes celulares (apoplasma), como constituinte do pectato de cálcio.

Figura 4.5 – Estoques de nutrientes em cada componente aéreo das árvores de *E. grandis* submetidas aos tratamentos: testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral e dos lodos produzidos nas ETEs de Barueri (LB), São Miguel (LS) e Parque Novo Mundo (LP). Para cada nutriente, médias do estoque total (somatório dos componentes arbóreos) seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Com relação aos estoques de ferro (Fe) e cobre (Cu) na biomassa aérea das árvores, observou-se que os tratamentos LB, LS e LP proporcionaram estoques de 50 a 200% superiores em comparação aos tratamentos FM e T, respectivamente. Há de se destacar também que o estoque de zinco na biomassa aérea das árvores cultivadas no tratamento LB foi até 10 vezes maior em relação aos demais tratamentos.

Os maiores estoques de zinco e cobre, bem como de manganês e cálcio, observados na biomassa área das árvores sob o efeito residual dos lodos de esgoto, foram observados principalmente nos componentes lenho, casca e galhos, ao invés das folhas. Este resultado, associado à colheita precoce da madeira, pode favorecer a exportação desses nutrientes que eventualmente foram adicionados em excesso ao solo, com a aplicação do lodo de esgoto.

4.3.6 Produção de folheto e transferência de nutrientes para o solo

Conforme mencionado no item 4.2.8, a produção de folheto começou a ser avaliada a partir de 15/12/2013, ou seja, no início da estação de verão. No primeiro mês de coleta, o folheto produzido no tratamento LP foi significativamente superior aos tratamentos FM e T, superando-os em aproximadamente 160 kg ha⁻¹ (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Folheto depositado mensalmente (kg ha⁻¹) nos plantios de eucalipto submetidos aos tratamentos: Testemunha (*T*), Efeito residual da fertilização mineral (*FM*) e da adubação com os lodos de esgoto produzidos nas ETEs de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (*LB*, *LS* e *LP*, respectivamente)

Tratamento	M ₁	M ₂	M ₃	TOTAL
<i>Período de Verão</i>				
<i>T</i>	29,53 c	138,10 b	113,65 b	286,27 b
<i>FM</i>	58,07 bc	275,58 b	233,01 b	590,38 b
<i>LB</i>	112,81 ab	513,78 a	487,48 a	1118,87 a
<i>LS</i>	84,16 ab	471,38 a	463,20 a	1021,38 a
<i>LP</i>	207,92 a	586,35 a	492,25 a	1295,08 a
<i>Período de Outono</i>				
<i>T</i>	46,83 b	94,83 c	52,01 b	219,08 c
<i>FM</i>	105,94 b	245,19 b	104,04 a	495,31 b
<i>LB</i>	221,01 a	481,48 a	107,87 a	827,96 a
<i>LS</i>	234,57 a	624,73 a	128,09 a	1012,10 a
<i>LP</i>	226,45 a	473,87 a	121,89 a	851,28 a

Nota: As siglas M₁, M₂ e M₃ correspondem respectivamente ao primeiro, segundo e terceiro mês de coleta nas estações de verão e outono. Para cada mês e estação do ano (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

No segundo e terceiro mês de verão, a produção de folheto foi significativamente superior nos tratamentos com lodo de esgoto, independentemente da sua ETE de origem. Em ambos os meses, os eucaliptos sob efeito residual dos lodos produziram cerca de 100% mais

folhede em comparação às árvores cultivadas nos tratamentos T e FM.

Similar à estação de verão, a produção de folhede no primeiro mês de outono foi cerca de 3 vezes maior nos tratamentos submetidos ao efeito residual dos lodos de esgoto em comparação aos tratamentos T e FM. No segundo mês, a produção de folhede chegou a ser 5 vezes maior nos tratamentos LB, LS e LP em relação ao tratamento T e até 2 vezes maior em comparação ao tratamento FM.

No período de verão, a produção total de folhede nos tratamentos LB, LS e LP foi cerca de 700 kg ha⁻¹ superior aos tratamentos T e FM e, no período de outono, a produção total de folhede foi de 400 a 800 kg ha⁻¹ superior nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto. Segundo Silva et al. (2013), a produção de folhede e o seu acúmulo sobre a superfície do solo são fortemente influenciados pela disponibilidade de nutrientes para o sistema radicular das árvores. Isto justifica a maior produção de folhede nos tratamentos LB, LS e LP, onde o solo apresentou maior teor de nutrientes disponíveis para as plantas, conforme apresentado na tabela 4.3.

De acordo com tabela 4.12, a concentração de fósforo e enxofre no folhede de verão e de outono foi cerca de 20% a 100% maior nos tratamentos LS e LP em relação aos tratamentos T e FM. Guo e Sims (2002), ao estudarem a decomposição da serapilheira em plantios de *Eucalyptus globulus*, *E. botryoides* e *E. ovata* irrigados com efluente, verificaram que a adição do resíduo orgânico ao solo provocou aumento na concentração de fósforo na serapilheira recém produzida pelas três espécies de eucalipto.

Tabela 4.12 – Concentração de macronutrientes (g kg⁻¹) no folhede de *E. grandis* depositado durante as estações de verão e outono, em função dos tratamentos: Testemunha (T); Efeito residual da fertilização mineral (FM) e das adubações com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
<i>Período de Verão</i>						
T	8,53 a	0,157 b	0,6 b	6,443 c	1,225 b	0,464 b
FM	8,83 a	0,153 b	0,9 a	8,408 bc	1,800 a	0,455 b
LB	8,18 a	0,207 ab	0,9 a	10,656 b	1,125 b	0,455 b
LS	9,26 a	0,264 a	1,0 a	15,098 a	0,875 b	0,554 a
LP	8,33 a	0,279 a	1,0 a	19,814 a	0,975 b	0,534 a
<i>Período de Outono</i>						
T	6,09 a	0,188 b	0,8 c	8,113 c	1,275 b	0,585 bc
FM	5,62 a	0,139 c	1,1 b	7,850 c	1,767 a	0,539 c
LB	6,11 a	0,202 b	1,6 a	9,863 c	1,375 b	0,592 abc
LS	6,41 a	0,210 b	1,6 a	13,538 b	0,950 c	0,659 ab
LP	6,80 a	0,288 a	1,9 a	17,338 a	1,100 bc	0,694 a

Nota: Para cada macronutriente e estação do ano (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

A concentração de magnésio (Mg) no folheto produzido no tratamento FM foi 40% a 70% maior em relação às concentrações de Mg no folheto produzido pelas árvores dos demais tratamentos. Silva, Poggiani e Laclau (2011), ao avaliarem a ciclagem de nutrientes em plantios de *E. grandis* adubados com lodo de esgoto, atribuíram a elevada concentração de Mg no folheto do tratamento FM à adição de calcário dolomítico ao solo e, conseqüentemente, à maior disponibilidade de magnésio para as plantas.

Por outro lado, as concentrações de cálcio no folheto produzido em LS e LP foram, tanto no período de verão, quanto no período de outono, significativamente superiores (até 170% maiores) em comparação aos demais tratamentos.

Com relação aos micronutrientes, observa-se na tabela 4.13, que a concentração de manganês no folheto do tratamento LP foi significativamente menor em relação ao tratamento T, que apresentou concentrações de 30% a 40% maior. No período de outono, a concentração de cobre no folheto produzido no tratamento T foi superior em comparação aos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto. Isto evidencia, mais uma vez, a capacidade que os lodos têm de quelatizar estes elementos metálicos, através da matéria orgânica contida em sua composição.

Tabela 4.13 – Concentração de micronutrientes (mg kg⁻¹) no folheto de *E. grandis* depositado durante as estações de verão e outono, em função dos tratamentos: Testemunha (T); Efeito residual da fertilização mineral (FM) e das adubações com os lodos de esgoto de Barueri, São Miguel e Parque N. Mundo (LB, LS e LP)

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>Período de Verão</i>					
T	22,66 a	7,00 a	298,77 a	741,25 a	11,59 bc
FM	22,44 a	5,00 a	235,48 a	726,25 a	10,56 c
LB	21,82 a	6,00 a	234,98 a	695,00 a	19,37 a
LS	21,93 a	4,25 a	276,04 a	698,75 a	13,00 bc
LP	20,95 a	5,25 a	296,93 a	488,75 b	15,39 ab
<i>Período de Outono</i>					
T	18,50 a	8,25 a	166,88 a	812,50 a	10,88 cd
FM	19,83 a	5,50 b	194,13 a	581,25 ab	8,38 d
LB	19,97 a	5,38 b	199,63 a	612,50 ab	16,38 a
LS	19,15 a	5,50 b	210,88 a	576,00 ab	12,38 bc
LP	16,28 a	6,13 b	250,75 a	475,00 b	15,50 ab

Nota: Para cada micronutriente e estação do ano (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Entretanto, a concentração de zinco (Zn) no folheto produzido no verão e outono foi cerca de 60% maior nos tratamentos LB e LP em comparação aos tratamentos T e FM, o que pode ser atribuído à elevada quantidade de Zn adicionada ao solo com a aplicação dos lodos

de Barueri e do Parque Novo Mundo. Alguns autores consideram o zinco altamente móvel na planta, enquanto outros o consideram de mobilidade intermediária (DECHEN; NACHTIGALL, 2006); mas, uma vez absorvido, o Zn pode ser facilmente distribuído para todos os componentes das árvores e, posteriormente, para o folheto depositado sobre o solo.

Conforme a figura 4.6, as quantidades totais de nitrogênio e enxofre transferidas para o solo, via deposição de folheto nos períodos de verão e outono, foram cerca de 150% maiores nos tratamentos LB, LS e LP, comparados aos tratamentos T e FM. Guo, Sims e Horne (2006), ao estudarem a ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus globulus*, *E. botryoides* e *E. ovata* irrigados com efluente, verificaram que a devolução de fósforo e nitrogênio ao solo via deposição de folheto não foi influenciada no primeiro ano após a aplicação do efluente orgânico, mas que, ao final do 3º ano, esta aplicação elevou em cerca de 100% as quantidades de P e N retornadas ao solo nos plantios de *Eucalyptus*.

Nos tratamentos com lodo a ciclagem de Ca via deposição de folheto foi de 4 a 6 vezes maior em relação aos tratamentos T e FM. Por sua vez, a ausência de adubação potássica (K) no tratamento T fez com que a quantidade total de K transferida para o solo fosse consideravelmente menor em relação aos demais tratamentos. Silva, Poggiani e Laclau (2011) observaram que a adubação das árvores de *E. grandis* com lodo de esgoto + KCl proporcionou, após 3 anos da sua aplicação, maiores taxas de devolução de K e Ca ao solo pela deposição de folheto, em comparação ao tratamento controle.

A quantidade total de magnésio (Mg) devolvida ao solo foi significativamente maior nos tratamentos LB, LS e LP, bem como no tratamento FM. Nesses tratamentos, a quantidade de Mg transferida para o solo, via deposição de folheto, foi até 3 vezes maior em relação ao tratamento T; isto pode ser atribuído à maior produção de folheto (nos tratamentos sob efeito residual dos lodos) ou à maior concentração de magnésio no folheto, como por exemplo, no tratamento FM.

Apesar da afinidade do cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) pela matéria orgânica do solo, as quantidades totais destes elementos transferidas para o solo, via deposição de folheto, foram cerca de 2 a 3 vezes maior nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto, em comparação aos tratamentos T e FM. Há de se destacar ainda, que a quantidade de Fe retornada ao solo no tratamento LP foi cerca de 50% maior em comparação ao tratamento LB, o que pode estar relacionado com a maior quantidade de ferro (cerca de 1240 kg ha⁻¹) aplicada com o lodo produzido pela ETE Parque Novo Mundo, cujo condicionamento era efetuado com CaO e FeCl₃.

Figura 4.6 – Nutrientes transferidos para a superfície do solo através da produção de folheto pelas árvores de *E. grandis*, nos tratamentos: testemunha (T), efeito residual da fertilização mineral e dos lodos produzidos nas ETEs de Barueri (LB), São Miguel (LS) e Parque Novo Mundo (LP). Para cada nutriente, médias da quantidade total de nutrientes seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

A quantidade total de zinco transferida para solo via deposição de folheto foi até 5 vezes maior nos tratamentos sob efeito residual dos lodos de esgoto, em comparação aos tratamentos T e FM. Estes resultados estão em consonância com os de Poggiani, Silva e Guedes (2000), cujo estudo demonstrou que a adição de lodo de esgoto, condicionado com cal, em plantios de *E. grandis* eleva a quantidade de micronutrientes devolvidos ao solo via deposição de folheto, principalmente com relação ao elemento zinco.

Todos esses resultados demonstram que, apesar das árvores de *E. grandis* absorverem elevadas quantidades de fósforo, cálcio e zinco do solo, devido ao efeito residual da adubação com os três lodos de esgoto, uma parte considerável desses elementos é retornada ao solo através da deposição de folheto e sua decomposição/mineralização pela comunidade microbiana.

4.4 Conclusões

A aplicação dos lodos de esgoto em plantios de *Eucalyptus grandis*, independente da ETE de origem, exerceu efeito residual positivo sobre a fertilidade do solo, proporcionando maiores teores de nitrogênio, fósforo, cálcio e enxofre, principalmente, na camada de 0-5 cm do solo. Além disso, o efeito residual dos lodos elevou também o teor de Zn no solo, mas reduziu o teor de Mn. A intensidade deste efeito residual variou de acordo com a procedência de cada lodo de esgoto e o respectivo processo de condicionamento; ou seja, em função da sua ETE de origem.

Todos os três lodos de esgoto, após 6 anos da sua aplicação ao solo, proporcionaram efeito residual positivo sobre o crescimento das árvores após a reforma da área e o estabelecimento de um novo ciclo de cultivo do eucalipto. As árvores sob efeito residual dos lodos apresentaram maior altura e diâmetro do fuste, bem como maior biomassa aérea e área foliar total, em comparação às árvores cultivadas nos tratamentos testemunha ou sob efeito residual da fertilização mineral.

A adubação dos plantios de *E. grandis* com os lodos de esgoto proporcionou também efeitos residuais significativos sobre o estado nutricional das árvores implantadas na reforma do povoamento, elevando as concentrações foliares de nitrogênio, fósforo, cálcio e zinco, mas reduzindo as concentrações de manganês.

O efeito residual dos lodos de esgoto proporcionou maior estoque de nutrientes no lenho e na casca, bem como nos galhos e folhas das árvores, em relação aos tratamentos testemunha e efeito residual da fertilização mineral. Apesar disso, efeito residual dos lodos

sobre os estoques de nutrientes variou em função do tipo da sua ETE de origem e do seu tipo de condicionamento final.

O uso agrícola dos três lodos de esgoto no cultivo do *E. grandis*, mesmo após 6 anos da sua aplicação ao solo, exerceu efetivo residual positivo sobre a produção de folheto em um novo ciclo de cultivo, bem como sobre a concentração de nutrientes nas folhas e o retorno dos nutrientes ao solo via deposição de folheto.

Referências

ABREU, C.A. de; LOPES, A.S.; SANTOS, G.C.G. dos. XI - Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.

ALVAREZ, V.V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N. DE F. X - Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-644.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONGALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 105-133.

BELLOTE, A.F.J.; FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. da. Nutrição, Adubação e Calagem para *Eucalyptus*. In: FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D. da (Org.). **Formação de Povoamentos Florestais**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2008. p. 55-65.

BERTHELOT, A.; RANGER, J.; GELHAYE, D. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, n. 3, p. 167-179, 2000.

BERTON, R.S.; NOGUEIRA, T.A.R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. (Org.). **Uso Agrícola de Lodo de Esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do Conama**. Botucatu, SP: FEPAF, 2010. p. 31-50.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (IAC, Boletim Técnico, 106).

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. XIII - Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. (Edit.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 327-354.

EGIARTE, G.; ARBESTAIN, M.C.; ALONSO, A.; RUÍZ-ROMERA, E.; PINTO, M. Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 216, n. 1/3, p. 257-269, 2005.

EGIARTE, G.; PINTO, M.; RUÍZ-ROMERA, E.; ARBESTAIN, M.C. Monitoring heavy metal concentrations in leachates from forest soil subjected to repeated applications of sewage sludge. **Environmental Pollution**, Barking, v. 156, n. 3, p. 840-848, 2008.

FAGERIA, N.K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, 2001a.

FAGERIA, V.D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001b.

FERNANDES, S.A.P.; BETTIOL, W.; CERRI, C.C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 65-77, 2005.

FERRAZ, A.V. **Ciclagem de nutrientes e metais pesados em plantios de *Eucalyptus grandis* adubados com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento da região metropolitana de São Paulo**. 2009. 120p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais/Conservação de Ecossistemas Naturais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GONÇALVES, J.L. de M.; VAZ, L.M.S.; AMARAL, T.M.; POGGIANI, F. Aplicabilidade de bio sólido em plantações florestais: II. Efeito na fertilidade do solo. Nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Org.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 179-195.

GONÇALVES, J.L. de M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F. de B.; LIMA, W. de P.L.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic na silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, n. 1, p. 6-27, 2013.

GOMES, D.R.; CALDEIRA, M.V.W.; DELARMELINA, W.M.; GONÇALVES, E. de O.; TRAZZI, P.A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.

GUEDES, M.C.; ANDRADE, C.A. de; 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**, Campinas, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006.

GRACIANO, C., GOYA, J. F.; ARTURI, M.; PÉREZ, C.; FRANGI, J. L. Fertilization in a fourth rotation *Eucalyptus grandis* plantation with minimal management. **Journal of Sustainable Forestry**, Yale, v. 26, n. 2, p. 155–169, 2008.

GUO, L.B.; SIMS, R.E.H. Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation Forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand: II – Internal effects. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 34, n. 7, p. 913-922, 2002.

GUO, L.B.; SIMS, R.E.H.; HORNE, D.J. Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand: II – Litter fall and nutrient return. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 30, n. 5, p. 393-404, 2006.

HARRISON, R.; XUE, D.; HENRY, C.; COLE, D. W. Long-term effects of heavy applications of biosolids on organic matter and nutrient content of a coarse-textured forest soil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 66, n. 1/3, p. 165-177, 1994.

KIMBERLEY, M.O.; WANG, H.; WILHS, P.J.; FISHER, C.R.; MAGESAN, G.N. Economic analysis of growth response from a pine plantation Forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, n. 1/3, p. 345-351, 2004.

KRIEDEMANN, P.E.; CROMER, R.N. The nutritional physiology of the eucalypts – nutrition and growth. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. (Ed.). **Nutrition of Eucalypts**. Melbourne: CSIRO, 1996. p. 109-121.

LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, n. 3, p. 181-196, 2000.

LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L. de M.; STAPE, J.L. Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, n. 1, p. 1-5, 2013.

LONG, J.N.; DEAN, T.J.; ROBERTS, S.D. Linkages between silviculture and ecology: examination of several important conceptual models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 200, n. 1-3, p. 249-261, 2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A de. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A. de. 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.

McLAREN, R.G.; CLUCAS, L.M.; SPEIR, T.W.; SCHAIK, A.P. van. Distribution and movement of nutrients and metals in a *Pinus radiata* forest soil following applications of biosolids. **Environmental Pollution**, Barking, v. 147, p. 32-40, 2007.

MELO, W.J. de; AGUIAR, P. de S.; MELO, G.M.P. de; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Nickel in a tropical soil treated with sewage sludge and cropped with maize in a long-term field study. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 39, n. 6, p. 1341-1347, 2007.

MILLS, H.A.; JONES JUNIOR., J.B. **Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide**. Athenas, USA: Micro-Macro Pub, 1996. 321p.

MITCHELL, D.S.; EDWARDS, A.C.; FERRIER, R.C. Changes in fluxes of N and P in water draining a stand of Scots pine treated with sewage sludge. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, n. 1/3, p. 203-213, 2000.

NOGUEIRA, T.A.R.; MELO, W.J. de; FONSECA, I.M.; MARQUES, M.O.; HE, Z. Barium uptake by maize plants as affected by sewage sludge in a long-term field study. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 181, n. 1/3, p. 1148-1157, 2010.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BONNEFOND, J.M.; MAIRE, G.L.; MARSDEN, C.; BONTEMPS, J.D.; SAINT-ANDRÉ, L. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal *Eucalyptus* plantation in the Republic of Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1796-1807, 2010.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. VIII - Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

PAIVA, A.V. de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L. de M.; FERRAZ, A. de V. Crescimento de mudas de espécies arbóreas nativas, adubadas com diferentes doses de lodo de esgoto seco e com fertilização mineral. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 499-511, 2009.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A.(Org.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 163-178.

POGGIANI, F.; SILVA, P.H.M. da; GUEDES, M.C. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. In: ANDREOLI, C. V. (Org.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2006. p. 159-188.

PRESCOTT, C.E.; BROWN, S.M. Five-year growth response of westwren red cedar, western hemlock, and amabilis fir to chemical and organic fertilizers. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, n. 9, p. 1328-1334, 1998.

PRESCOTT, C.E.; BLEVINS, L.L. Eleven-year growth response of young conifers to biosolids or nitrogen and phosphorus fertilizer on northern Vancouver Island. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 1, p. 211-214, 2005.

RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

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

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. **Balanço hídrico normal por Thorntwaite e Mather (1955)**. Piracicaba: ESALQ/USP – Departamento de Ciências Exatas: Área de Física e Meteorologia, 1999 (programa para Excel v. 6). 1 CD-ROM.

ROSSIELLO, R.O.P.; NETTO, J.J. XV – Toxidez de alumínio em plantas: Novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 375-418.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2002-2003.

SCHEER, M.B.; CARNEIRO, C.; BRESSAN, O.A.; SANTOS, K.G. dos. Compostos de lodo de esgoto para a produção de mudas de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 613-621, 2012.

SCHUMACHER, M.V.; BRUN, E.J.; HERNANDES, J.I.; KÖNIG, F.G. Produção de serapilheira em uma floresta de *Araucária angustifolia* (Bertol.) Kuntze no município de Pinhal Grande-RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 29-37, 2004.

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

SILVA, P.H.M. da; POGGIANI, F.; LACLAU, J.P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: Effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied an Environmental Soil Science**, New York, v. 2011, p. 1-11, 2011.

SILVA, P.H.M. da; POGGIANI, F.; LIBARDI, P.L.; GONÇALVES, A.N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, n. 1, p. 67-78, 2013.

SOBRINHO, P.A. Tratamento de esgoto e geração de lodos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Org.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 11-24.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; GEODERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R. de S. Fósforo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.). **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes** – v.2. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 67-132.

TORRI, S.I.; LAVADO, R. Zinc distribution in soils amended with different kinds of sewage sludge. **Journal of Environmental Management**, London, v. 88, n. 4, p. 1571-1579, 2008.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Org.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 69-105.

TSUTIYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C.T. de; MELFI, A.J.; MELO, W.J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólido na agricultura**. São Paulo, SP: SABESP, 2001. p. 89-131.

VILLANUEVA, F.C.A.; BOARETTO, A.E.; FIRME, L.P.; MURAOKA, T.; NASCIMENTO FILHO, V.F. do; ABREU JUNIOR, C.H. Mudanças químicas e fitodisponibilidade de zinco estimada por método isotópico, em solo tratado com lodo de esgoto. **Química nova**, São Paulo, v. 35, n. 7, p. 1348-1354, 2012.

VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. XII – Cálcio, Magnésio e Enxofre. In: FERNANDES, M.S. (Edit.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-325.

WHITE, J.D.; SCOTT, N.A. Specific leaf area and nitrogen distribution in New Zealand forests: Species independently respond to intercepted light. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 1-3, p. 319-329, 2006.

5 BIOMASSA, CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM PLANTAS ALIMENTÍCIAS CULTIVADAS EM DOIS TIPOS DE SOLOS COLETADOS EM TALHÕES DE *Eucalyptus grandis*, ADUBADOS HÁ CATORZE ANOS COM LODO DE ESGOTO

Resumo

O uso agrícola do lodo de esgoto tratado (biossólido) vem sendo incentivado em muitos países, desde que atenda às normas governamentais reguladoras, principalmente em relação à presença de metais pesados. O objetivo do trabalho foi avaliar a produção de biomassa, a concentração de nutrientes e de metais pesados em plantas de *Lactuca sativa* (alface), *Raphanus sativus* (rabanete) e *Oryza sativa* (arroz de sequeiro), cultivadas em vasos com dois tipos de solos, coletados em talhões de *Eucalyptus grandis*, adubados há catorze anos com lodo de esgoto, visando esclarecer se ainda haveria efeito residual do lodo de esgoto. O delineamento experimental utilizado foi fatorial (2x2) em blocos, com 8 repetições e parcelas aleatorizadas. Os fatores estudados foram: 1) dois tipos de solo, sendo Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho escuro (LVE) e 2) duas condições de fertilização passada, sendo 20 t ha⁻¹ base seca de lodo de esgoto (LE) e sem qualquer adubação (T). O experimento foi conduzido em duas condições simultâneas: com e sem fertilização mineral recente, aplicada em vaso. O solo foi coletado na camada de 0-10 cm de profundidade, por meio da raspagem da região onde o lodo foi originalmente disposto, ou seja, na entrelinha de plantio dos eucaliptos. Amostras de terra foram analisadas quanto à sua fertilidade e aos teores dos metais pesados: cádmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr) e chumbo (Pb). As plantas foram cultivadas em vaso de 3,5 dm³ e mantidas na capacidade de campo por meio de irrigação controlada. Aos 50 dias após o plantio das mudas de alface e aos 30 e 120 dias após a semeadura do rabanete e do arroz de sequeiro, respectivamente, as plantas foram colhidas e avaliadas quanto à produção de biomassa fresca e seca, à concentração de nutrientes e metais pesados nas folhas, grãos e raízes. O efeito residual do lodo de esgoto, aplicado há catorze anos nos plantios de eucalipto, elevou o teor de fósforo, cálcio e zinco em ambos os solos, mas aumentou o pH e os teores de cobre e chumbo apenas no LVA. Sem a fertilização mineral recente, as plantas das três espécies produziram até 4 vezes mais biomassa no LVA, quando cultivadas sob o efeito residual do lodo; o que não foi observado nas plantas cultivadas no LVE. Porém, as plantas cultivadas nos vasos com fertilizante mineral produziram até 10 vezes mais biomassa em relação às plantas cultivadas sem fertilização, tanto no LVA como no LVE, ocultando o efeito residual do lodo. De modo geral, o efeito residual do lodo não alterou a concentração de chumbo nas plantas, mas elevou as concentrações de fósforo, cálcio, níquel, cromo, cádmio e, principalmente, zinco nas folhas, grãos e raízes. Todavia, a concentração destes elementos na parte comestível das plantas não excedeu os valores limites estabelecidos pela ANVISA para a ingestão segura de vegetais.

Palavras-chave: Biossólido; Alface; Arroz de Sequeiro; Rabanete; Efeito Residual

Abstract

The agricultural use of treated sewage sludge (biosolids) has been encouraged in many countries, as long as it meets governmental regulatory standards, especially in relation to the heavy metals concentrations. The aim of this study was to evaluate the biomass production, the nutrients and heavy metals concentration in plants of *Lactuca sativa* L. (lettuce), *Raphanus sativus* L. (radish) and *Oryza sativa* (upland rice) grown in pots with two types of

soils, collected in *Eucalyptus grandis* stands fertilized with sewage sludge (fourteen years ago), in order to clarify whether there would still be long term effects of sewage sludge. The experimental design was factorial (2x2), randomized in blocks with 8 replications. The studied factors were: 1) two types of soils, being sandy and clayey Ferralsol (LVA and LVE, by its acronym in Portuguese) and 2) two long term effect of organic fertilization, 20 t ha⁻¹ dry basis of sewage sludge (SS) and without fertilization (WF). The experiment was carried out in two simultaneous conditions: with and without mineral fertilization applied in the pots. Soils were sampled at 0-10 cm layer, by scraping the region where the sludge was originally applied or, in other words, in the inter-row area of the eucalyptus planting. Soil samples were analyzed for their fertility and the levels of heavy metals: cadmium (Cd), nickel (Ni), chromium (Cr) and lead (Pb). The plants were grown in 3.5 dm³ pots and maintained at field capacity by controlled irrigation. Fifty days after planting the lettuce, 30 and 120 days after sowing radish and upland rice, respectively, plants were harvested and evaluated for: the fresh and dry biomass production and the nutrients and metals heavy concentration in the leaves, roots and grains. In both soils, the long term effect of sewage sludge (applied fourteen years ago in the eucalyptus stand) raised the phosphorus, calcium and zinc content, but it increased the pH, copper and leads content only in LVA. In the three species, the biomass production in LVA under long term effect of sewage sludge (without mineral fertilization) was fourfold greater than in the control treatment. This result was not observed in plants grown on LVE. However, the plants grown on the LVA and LVE produced up to 10 times more biomass with mineral fertilizer than without fertilization, hiding the long term effect of sewage sludge. In general, this effect did not alter the lead concentration in plants, but elevated the phosphorus, calcium, chromium, nickel, cadmium and, particularly, zinc concentrations in leaves, roots and grains. Nevertheless, the concentration of these elements in the edible part of plants did not exceed the limits established by Brazilian Health Surveillance Agency (ANVISA, by its acronym in Portuguese) for the safe intake of vegetables.

Keywords: Biosolids; Lettuce; Upland Rice; Radish; Long Term Effect

5.1 Introdução

Nos últimos três séculos, a população mundial cresceu de 700 milhões para 6,0 bilhões de indivíduos, enquanto a área destinada para a agricultura elevou-se de 300 milhões para apenas 1,5 bilhões de hectares (GOLDEWIJK, 2001). Apesar disso, a produção mundial de alimentos tem-se mantido proporcional ao crescimento da população, o que se deve principalmente ao crescente uso de fertilizantes minerais (JONES et al., 2013). Segundo estes autores: “este fatídico legado trará sérias consequências à sustentabilidade agrícola e à segurança alimentar”.

Por outro lado, a crescente produção de lodo pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs) torna este resíduo orgânico uma opção atrativa do ponto de vista econômico para o setor agrícola, em razão da quantidade de matéria orgânica e dos nutrientes contidos em sua composição (MELO; SILVA; DIAS, 2008). Resultados de pesquisas têm demonstrado que

lodo de esgoto possui os nutrientes exigidos pelas plantas e que seu emprego é altamente recomendável em culturas de milho, café, cana-de-açúcar, citros, espécies florestais e outras plantas perenes (SILVA et al., 1998; VEGA et al., 2004).

Embora o uso agrícola do lodo de esgoto represente uma das principais alternativas para a sua disposição final, a presença eventual de metais pesados no lodo pode limitar a sua aplicação devido ao risco de contaminação do solo e à possível introdução de metais na cadeia alimentar, pela absorção e translocação desses elementos na planta, ocasionando potenciais desordens metabólicas e doenças crônicas no homem (NOGUEIRA et al., 2009). Segundo Tsutiya (2001), a presença de metais pesados no lodo de esgoto depende, sobretudo, da quantidade de resíduos industriais descartados indevidamente na rede coletora de esgoto doméstico. Segundo este mesmo autor, para a região metropolitana de São Paulo, a presença de metais pesados é o principal aspecto poluidor do lodo de esgoto.

Para Sobrinho et al. (2009), o termo “metal pesado”, embora não seja de fácil definição, é reconhecido e utilizado mundialmente. Segundo McLaughlin (2006), os elementos metálicos com densidade maior que 5 Mg m^{-3} são frequentemente denominados “metais pesados”. O mesmo autor incluiu nesta categoria: Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Mercúrio (Hg), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn).

O uso do lodo de esgoto como fertilizante e condicionador do solo é, muitas vezes, dificultado pela presença de metais pesados (EGIARTE et al., 2006). Segundo esses autores, o risco que cada um desses elementos carrega quanto à contaminação do lençol freático e do ecossistema depende, sobretudo, de sua disponibilidade e mobilidade ao longo do perfil do solo. A fitodisponibilidade de nutrientes e metais pesados no solo para as plantas é governada pelos seguintes fatores: diferentes interações das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, condições ambientais e mecanismos fisiológicos, que interferem na nutrição das plantas (HAVLIN et al., 2005).

Segundo Villanueva et al. (2012), a dinâmica dos metais pesados em solos brasileiros, principalmente sua mobilidade e fitodisponibilidade em solos agroflorestais, tem sido tema de várias pesquisas. Mesmo assim, segundo esses autores, devido à grande diversidade de solos, clima e lodos de esgoto gerados no Brasil, há a necessidade ainda de se ampliar as pesquisas sobre este assunto. Vale lembrar, que a biodisponibilidade dos elementos metálicos em regiões tropicais aparenta não ser estreitamente relacionada à sua retenção pela matéria orgânica do solo (MO), como nas regiões temperadas, onde a decomposição da MO é lenta e gradual (NOGUEIROL et al., 2013).

Elevadas concentrações de metais pesados no solo podem levar a uma absorção excessiva destes elementos pelas culturas e podem também afetar negativamente o crescimento das plantas, interferindo nos processos metabólicos e, às vezes, conduzindo as plantas até a morte (TOKALIOGLU; KARTAL; GÜLTEKIN, 2005). Além disso, a absorção de metais pesados pelos vegetais e o acúmulo desses elementos em quantidades suficientemente elevadas nas partes comestíveis das plantas podem ocasionar sérios problemas de saúde em animais e seres humanos (GUERRA et al., 2012). Segundo Bai et al., 2010, elementos-traço potencialmente tóxicos, como os metais pesados (ex. Cd, Cu, Cr, Ni e Zn), são comumente acumulados em solos tratados com lodo de esgoto e podem permanecer no solo por um longo período de tempo.

Dentre os benefícios apontados no uso agrícola do lodo de esgoto deve-se levar em conta o seu efeito residual sobre ciclos de cultivo subsequentes, que podem ser consideráveis para determinados elementos, tais como o nitrogênio e o fósforo (BINDER et al., 2002). Por sua vez, Silveira, Alleoni e Guilherme (2003) destacam que o comportamento dos metais pesados em longo prazo, após o término da aplicação do lodo ao solo, não é ainda bem conhecido e necessita, portanto, ser mais investigado.

Atualmente, tem-se observado cada vez mais, principalmente nas regiões periféricas das cidades, uma gradativa substituição das áreas de cultivo extensivo (Ex. plantios de cana de açúcar, milho, eucaliptos etc.) por pequenas propriedades agrícolas, onde são cultivadas hortaliças para o suprimento dos mercados urbanos. Neste sentido, a adubação em plantações de eucalipto com lodo de esgoto poderia gerar em alguns casos, dependendo do tipo de solo e da dose aplicada, problemas ambientais e sanitários, devido à eventual incorporação dos metais pesados à cadeia alimentar humana (MANZATTO; FREITAS JUNIOR; PERES, 2002).

Portanto, a partir do pressuposto que o lodo de esgoto aplicado ao solo exerce efeito positivo sobre sucessivos ciclos de cultivo agroflorestal, foi objetivo desta pesquisa averiguar também o efeito residual do lodo sobre o crescimento, nutrição mineral e presença de metais pesados em plantas alimentícias, cultivadas em solos coletados de talhões de *Eucalyptus grandis* adubados (há catorze anos) com uma única dose de lodo de esgoto, simulando eventual alteração do uso da terra.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Descrição da área do estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido nas dependências da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP). A ESALQ está localizada no município de Piracicaba-SP, nas coordenadas 22°42’30’’ latitude sul e 47°38’00’’ longitude oeste, a 546 metros de altitude. Segundo a classificação de Köepen, o clima da região é do tipo Cwa - subtropical úmido, com estiagem no período de inverno. A precipitação média anual em Piracicaba é de 1230 mm, com temperatura média de 17,9°C no mês mais frio (julho) e de 24,5°C no mês mais quente (fevereiro) (ROLIM; SENTELHAS, 1999).

O experimento foi conduzido em vasos com terra, sobre canteiro suspenso e suprido por um sistema de irrigação por gotejamento. Foram utilizados dois tipos de solo, sendo: 1) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), com textura médio-arenosa e 2) Latossolo Vermelho Escuro (LVE), com textura franco argilo-arenoso. Tanto o LVA quanto o LVE foram coletados na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga-SP, em duas áreas (AE-16 e AE-30) cultivadas com *Eucalyptus grandis*. Em março de 1998, ambas as áreas foram simultaneamente utilizadas no estudo da aplicação de doses de lodo de esgoto (0 a 40 t ha⁻¹) em plantios de eucalipto. Na época, este lodo foi condicionado com cal e cloreto férrico na ETE de Barueri da SABESP, o que lhe conferiu caráter alcalino (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Características químicas do lodo de esgoto produzido em 1998 pela ETE de Barueri-SP, quando o condicionamento era efetuado com cal e cloreto férrico

Atributos	Unidade	Valores	Atributos	Unidade	Valores
pH em CaCl ₂ a 0,01	-	10,6	Sódio (Na) _{total}	g kg ⁻¹	0,58
Umidade _{total} (65°C)	%	62,86	Enxofre (S) _{total}	g kg ⁻¹	5,3
Matéria orgânica	g kg ⁻¹	116,17	Ferro (Fe) _{total}	mg kg ⁻¹	55.056
Carbono total	g kg ⁻¹	172,26	Cobre (Cu) _{total}	mg kg ⁻¹	900
Nitrogênio total	g kg ⁻¹	18,66	Manganês (Mn) _{total}	mg kg ⁻¹	300
Nitrogênio	g kg ⁻¹	5,38	Zinco (Zn) _{total}	mg kg ⁻¹	1.632
Fósforo (P ₂ O ₅) _{total}	g kg ⁻¹	9,40	Cádmio (Cd) _{total}	mg kg ⁻¹	21
Potássio (K ₂ O) _{total}	g kg ⁻¹	1,96	Cromo (Cr) _{total}	mg kg ⁻¹	268
Cálcio (Ca) _{total}	g kg ⁻¹	86,40	Chumbo (Pb) _{total}	mg kg ⁻¹	200
Magnésio (Mg) _{total}	g kg ⁻¹	3,80	Níquel (Ni) _{total}	mg kg ⁻¹	222

Nota: Método empregado para os metais pesados: SW 3051, EPA – U.S, determinação por ICP-AES.

Todos os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

Para esta pesquisa, em novembro de 2011, foram retiradas amostras de solo (LVA e LVE) da região central de cada parcela onde haviam sido aplicadas as doses de 0 e 20 t ha⁻¹ do lodo de esgoto. A coleta do solo foi realizada no local onde o lodo havia sido

originalmente disposto nos plantios de eucalipto, ou seja, na entrelinha de plantio; para isso, foi efetuada a raspagem da camada superficial do solo com uma enxada, até atingir uma profundidade de aproximadamente 10 cm. A terra coletada foi agrupada por parcela, peneirada, homogeneizada separadamente por meio do uso de uma betoneira, armazenada em sacos plásticos previamente identificados e, em seguida, encaminhada para a ESALQ/USP - Piracicaba/SP.

As espécies vegetais utilizadas nesta pesquisa foram: *Lactuca sativa* L. (alface), cultivar crespa Vanda; *Oryza sativa* L. (arroz de sequeiro), cultivar IAC 202 e *Raphanus sativus* L., cultivar Ricardo; todas amplamente cultivadas no Estado de São Paulo. Para cada espécie, o delineamento experimental adotado foi fatorial 2X2X2, em 4 blocos aleatorizados e com oito repetições. Os fatores testados foram: 2 tipos de solo (LVA e LVE), 2 doses de lodo de esgoto residual (0 e 20 t ha⁻¹ de lodo) e 2 condições de fertilização mineral recomendada para cada uma das culturas (Com e Sem fertilização mineral); o que resultou num total de 192 unidades experimentais (parcelas).

Cada unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno com volume nominal de 3,5 dm³, preenchida com terra específica correspondente a cada tratamento. No cultivo da alface, foi estabelecida uma muda na parte central de cada vaso; no cultivo do arroz de sequeiro, foram semeados três pontos distintos na região central de cada vaso, de modo que permanecessem apenas três plantas/vaso após o desbaste e, para o rabanete, foram semeados dois pontos distintos na região central de cada vaso, a fim de estabelecer após o desbaste apenas duas plantas/vaso.

No preenchimento dos vasos relacionados ao fator “Com fertilização mineral” (C/FERT), foi efetuada primeiramente a avaliação da fertilidade do solo conforme metodologia proposta Raij et al. (2001) e, em seguida, foram estabelecidas as quantidades e os tipos de fertilizantes a serem aplicados ao solo de acordo com as demandas nutricionais de cada cultura, conforme recomendações do Boletim Técnico N° 100 (RAIJ et al., 1997). Portanto, foram aplicadas ao solo as seguintes quantidades de insumo:

- 1) Calagem: para as culturas de alface e rabanete, os solos LVA e LVE de cada vaso foram incubados com 40 e 50 g de calcário dolomítico (PRNT = 82%, CaO = 30% e MgO = 19%), respectivamente; ao passo que, para a cultura do arroz de sequeiro, ambos os solos foram incubados com 10g de calcário dolomítico por vaso. Todas as incubações foram realizadas por 20 dias, mantendo-se a umidade da amostra a 70% da capacidade de retenção de água, controlada com a medição da massa dos vasos e a reposição da água evaporada quando necessário.

- 2) Fertilização de base: para a cultura de alface, foram aplicados em cada vaso de ambos os solos 0,6 g de nitrato de amônio (34% de N), 8,0 g de super fosfato simples (18% de P_2O_5) e 1,0 g de cloreto de potássio (60% de K_2O). Para a cultura do rabanete, também em ambos os solos, foram aplicados por vaso 0,3 g de nitrato de amônio, 8,0 g de super fosfato simples e 1,20 g de cloreto de potássio. Para a cultura do arroz de sequeiro, foram aplicados em ambos os solos/vaso 0,15 g de nitrato de amônio, 1,60 g de super fosfato simples e 0,40 g de cloreto de potássio. Em todas as fertilizações de base, os insumos foram incorporados a camada superficial do solo, 5 dias antes da semeadura ou do transplante das mudas nos vasos.
- 3) Fertilização de cobertura (manutenção): para a cultura da alface, foi aplicado em ambos os solos/vaso 2,25 g de nitrato de cálcio (15,5% de N e 27% de Ca), parcelado aos 10, 20 e 30 dias após o plantio das mudas nos vasos. Para a cultura do rabanete, foram aplicados por solos/vaso 3,0 g de nitrato de cálcio e 1,2 gramas de cloreto de potássio, parcelados aos 7, 14 e 21 dias após a germinação e o desbaste das plântulas nos vasos. Para a cultura do arroz de sequeiro, foi aplicado 2,10 g de nitrato de cálcio por solo/vaso, parcelado aos 30, 60 e 90 dias após a germinação e desbaste das plântulas nos vasos. Em todas as fertilizações de cobertura, os fertilizantes foram aplicados em superfície nos momentos previamente determinados.

Em janeiro de 2012, após a preparação dos vasos em ambiente protegido, o experimento passou a ser conduzido em casa de vegetação dotada de controle da temperatura do ar, com sistema automático de ventilação forçada e irrigação por meio de estacas gotejadoras com vazão média de 1 L h^{-1} . No entanto, ao longo desse período, o calor excessivo dentro da estufa (chegando a 42°C) prejudicou o desenvolvimento das plantas de alface e rabanete, o que reduziu a intensidade de resposta dessas culturas aos tratamentos. Por isso, em junho de 2012, um novo experimento com os mesmos tratamentos e delineamento experimental foi conduzido em viveiro, sobre canteiros suspensos e cobertura de tela sombrite 30% (Figura 5.1). Além disso, foi utilizada uma cobertura temporária de lona plástica transparente, quando as condições climáticas eram consideravelmente desfavoráveis (ex. período chuvoso).

As plantas de alface, rabanete e arroz de sequeiro foram cultivadas nos vasos por aproximadamente 50, 30 e 130 dias, respectivamente. No final de cada ciclo de cultivo, as plantas foram avaliadas quanto à produção de biomassa, alguns caracteres morfológicos de

interesse (ex. n° número de grãos de arroz por planta) e em relação à concentração de nutrientes e metais pesados nas diferentes partes da planta (ex. raízes e folhas).

Figura 5.1 – Canteiro suspenso e vasos sob cobertura de tela sombrite de 30% (A). Vasos com as plantas de alface, rabanete e arroz de sequeiro, atendidas pelo sistema automático de irrigação por gotejamento (B)

5.2.2 Avaliação da fertilidade do solo

A fertilidade dos Latossolos LVA e LVE foi avaliada em novembro de 2011, ou seja, aproximadamente 14 anos depois da aplicação do lodo de esgoto ao solo. Para isso, antes do preenchimento dos vasos utilizados no cultivo das plantas alimentícias, foram coletadas subamostras de terra correspondentes a cada tipo de solo (LVA e LVE) e a cada dose de lodo (0 e 20 t ha⁻¹) aplicada nos plantios de eucalipto (em 1998). Essas amostras foram secadas em estufa de circulação forçada de ar a 40-45°C, até atingirem peso constante. Em seguida essas amostras foram peneiradas (malha de 2 mm), homogeneizadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises Químicas – Pesquisa, do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, para a avaliação da fertilidade dos solos conforme a metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Além da fertilidade do solo, as amostras de terra foram avaliadas também quanto à concentração dos metais pesados cádmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr) e chumbo (Pb), de acordo com o método SW 846-3051A recomendado pela United State Environmental Protection Agency (USEPA, 2007). Nesta análise, foram moídos 20 g de cada amostra de terra em cadinho de porcelana, com o auxílio de um pistilo. Após a moagem, as amostras foram peneiradas (malha de 0,125 mm), homogeneizadas e armazenadas em frascos de acrílico.

Foram transferidas alíquotas 0,500 g de cada amostra para tubos de digestão de teflon, onde foram adicionados 9 ml de ácido nítrico pa. e 3 ml de ácido clorídrico pa. Após a adição dos ácidos, os tubos foram lacrados e levados ao forno de microondas Mars Xpress da CEM,

durante 30 minutos e a uma temperatura de $175 \pm 5^\circ\text{C}$. Após a digestão das amostras, o extrato resultante foi filtrado em papel filtro faixa azul e, em seguida, transferido para um balão volumétrico de 25 ml, cujo volume foi completado com água ultrapura. Após a diluição dos extratos, os elementos Cd, Cr, Ni e Pb foram determinados por meio de um espectrofotômetro de absorção atômica da Perkin Elmer, modelo HGA 900. Como o método de digestão utilizado não promove a dissolução da fração mineral das amostras de solo e os teores de Ni, Cd, Cr e Pb determinados não expressam os valores totais, optou-se por denominá-los de pseudototais, conforme ANDRADE et al. (2009).

5.2.3 Biomassa e características morfológicas das plantas

Aos 40 dias após o plantio das mudas de alface e aos 30 e 130 dias após a germinação das sementes de rabanete e arroz de sequeiro, respectivamente; a parte aérea das plantas (folhas e talos) foi cortada rente ao solo e, no caso do arroz, desmembrada em folhas+talo e panículas. Em seguida, esses componentes vegetais foram pesados em balança eletrônica com precisão de 0,01 g, para a quantificação da: biomassa fresca da parte área (BFPA), para a alface e rabanete; biomassa fresca da folhagem (BFFO) e biomassa fresca das panículas (BFPN), para o arroz de sequeiro.

Após o registro das BFs, foram quantificadas nas plantas algumas características morfológicas de interesse, como: 1) o comprimento, a largura e a altura da parte área das alfaces (conhecida popularmente como “cabeça”) bem como o número de folhas por planta e 2) o comprimento total do perfilho superior das plantas de arroz, contabilizado a partir da linha de corte até o ápice da panícula.

Após a mensuração da parte aérea, o conjunto de “solo+raízes” de cada planta foi lavado em água corrente, sobre um conjunto de peneiras sobrepostas com malhas de 20 a 2 mm de abertura. Em seguida, as raízes foram banhadas sequencialmente em cinco soluções: 1ª – solução de água com detergente, para solubilização das partículas de solo; 2ª – água destilada, para a eliminação do detergente aderido à amostra; 3ª – solução de EDTA a 0,5%, para a retirada dos íons adsorvidos à superfície das raízes; 4ª e 5ª – água destilada, para a retirada do EDTA em contato com a amostra.

Depois do processo de lavagem, as raízes foram dispostas sobre papel absorvente para a eliminação da água aderida à sua superfície. Para os rabanetes em específico, foi quantificado também: (1) Biomassa fresca das raízes (BFSR), com o auxílio de uma balança eletrônica e (2) Diâmetro do bulbo radicular, mensurado em três direções perpendiculares entre si, por meio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Com base no formato

geométrico da esfera, o volume do bulbo radicular dos rabanetes foi estimado pela eq. 5.1.

$$VBRi = \left(\frac{(DBRi)^3 * \pi * 4}{24} \right) * 10^{-3} \quad (5.1)$$

Onde:

$VBRi$ = Volume do bulbo radicular no tratamento “i” (cm³);

$DBRi$ = Diâmetro médio do bulbo radicular no tratamento “i” (mm).

Todas as amostras vegetais foram secadas em estufa de circulação forçada de ar a 60-65°C, até atingirem peso constante. Após a secagem, foi quantificada a biomassa seca da parte aérea (BSPA), para a alface e rabanete, e do sistema radicular (BSSR) para as três espécies em questão. A biomassa seca da folhagem (BSFO), das panículas (BSPN), bem como dos grãos (BSGRA) e o peso de 100 grãos_(base seca) foram quantificados apenas nas plantas de arroz de sequeiro. Ao final, foi quantificada a biomassa seca total (BST) de cada planta, por espécie e tratamento, além de ser estimado o índice de colheita com base na matéria seca (IC_{bs}), através da relação entre a biomassa seca da parte comestível (ex. grãos) da planta e a sua respectiva biomassa seca total.

5.2.4 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas

Inicialmente, para a análise da concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas, as amostras vegetais de cada vaso foram agrupadas por tratamento/bloco, gerando 4 amostras compostas para cada componente das plantas (ex. folhas, grãos, raízes), espécie estudada e tratamento testado. Após o agrupamento, as amostras compostas foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 1 mm. Os materiais provenientes da moagem foram encaminhados ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes, de acordo com a metodologia estabelecida por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989).

Para a determinação dos metais cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e chumbo (Pb), apenas as amostras obtidas nos tratamentos “Com fertilização mineral” (C/FERT) foram submetidas à digestão nitro-perclórica. Tendo em vista que esses elementos frequentemente se apresentam em concentrações extremamente baixas, foram digeridos 1000 mg de cada amostra com recuperação do extrato em volume de 15 mL. A determinação analítica dos

metais nas plantas (ex. folhas e grãos) foi realizada em espectrômetro de emissão óptica (ICP-OES) com plasma acoplado indutivamente, modelo 7000 D.V da Perkin Elmer.

5.2.5 Análises estatísticas

Como fase inicial, os resultados foram verificados quanto às pressuposições básicas estatísticas (ex. normalidade, homogeneidade da variância etc.) e a necessidade de transformação dos dados, que foi realizada pelo método de potência ótima de Box-Cox. Após esta fase, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação múltipla das médias através do teste Tukey, a 5% de nível de significância. Para as análises foi utilizado o software estatístico SAS (9.1) for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Fertilidade e concentração de metais pesados no solo

De acordo com a tabela 5.2, a adubação do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) com lodo esgoto (C/LE), mesmo após 14 anos da sua aplicação, manteve o pH significativamente elevado em comparação ao LVA sem a adição do lodo (S/LE). Neste caso, a acidez ativa em LVA-C/LE foi 10 vezes menor, comparada à reação do LVA-S/LE. Segundo AARAB et al. (2006), o estabilização do lodo de esgoto com cal melhora significativamente o seu valor agronômico, dado à sua capacidade de neutralizar a acidez do solo e de fornecer cálcio e magnésio para as plantas.

No Latossolo Vermelho Escuro (LVE), o pH não foi alterado significativamente pelo efeito residual do lodo tratado com cal, como observado no LVA. Este resultado fornece evidências de que o efeito residual do lodo de esgoto varia em função do tipo de solo, principalmente, com sua classe textural. Segundo Giasson e Tedesco (2010), a textura é fator determinante das propriedades físico-químicas do solo, entre elas: drenagem e retenção da água, sorção e dessorção dos nutrientes na fase sólida e tamponamento de materiais impactantes, como por exemplo, a aplicação de lodo de esgoto.

As concentrações de fósforo e cálcio resina em ambos os solos (tabela 5.2) foram significativamente superiores sob o efeito residual do lodo de esgoto (C/LE), ao ponto de superar o tratamento controle (S/LE) em até 24 vezes no LVA e 9 vezes no LVE. Mantovi, Baldoni, e Toderi (2005), ao estudarem os efeitos do uso agrícola do lodo de esgoto sobre o solo, constaram que a aplicação contínua desse resíduo, durante 12 anos, elevou significativamente a quantidade de matéria orgânica, de nitrogênio total e de fósforo no solo,

melhorando sua fertilidade.

Tabela 5.2 – Atributos físico-químicos do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e do Latossolo Vermelho Escuro (LVE), coletados nas parcelas experimentais sem e com a aplicação (em 1998) de lodo de esgoto (S/LE e C/LE)

Atributo	Unidade	----- LVA -----		----- LVE -----	
		S/LE	C/LE	S/LE	C/LE
<i>pH</i> <i>CaCl2 a 0,01M</i>	-	3,67 b	4,63 a	3,62 a'	3,97 a'
<i>MO</i>	g kg ⁻¹	28,5 a	36,0 a	44,8 a'	46,3 a'
<i>P</i> <i>resina</i>	mg dm ⁻³	9,9 b	34,1 a	10,4 b'	16,0 a'
<i>S</i>	mg dm ⁻³	8,0 a	8,0 a	17,0 a'	13,0 a'
<i>B</i>	mg dm ⁻³	0,11 a	0,09 b	0,16 a'	0,17 a'
<i>K</i> <i>resina</i>	mmolc dm ⁻³	0,8 a	0,6 a	0,9 a'	0,8 a'
<i>Ca</i> <i>resina</i>	mmolc dm ⁻³	2,0 b	49,0 a	2,6 b'	22,8 a'
<i>Mg</i> <i>resina</i>	mmolc dm ⁻³	0,6 b	2,5 a	1,7 b'	3,3 a'
<i>Al</i> ³⁺	mmolc dm ⁻³	20,8 a	2,5 b	26,0 a'	7,0 b'
<i>Al</i> ³⁺ + <i>H</i> ⁺	mmolc dm ⁻³	79,8 a	52,3 a	119,3 a'	67,3 b'
<i>SB</i>	mmolc dm ⁻³	4,2 b	51,1 a	5,96 b'	26,35 a'
<i>CTC</i>	mmolc dm ⁻³	84,5 a	107,0 a	125,7 a'	126,3 a'
<i>V</i> %	-	5,0 b	48,7 a	4,8 b'	21,7 a'
<i>m</i> %	-	82,5 a	5,5 b	80,0 a'	1,5 b'
<i>Areia</i> <i>Total</i>	g kg ⁻¹	809 a	796 a	646 a'	662 a'
<i>Silte</i>	g kg ⁻¹	31 a	29 a	31 a'	44 a'
<i>Argila</i> <i>Total</i>	g kg ⁻¹	160 a	175 a	323 a'	292 a'
<i>Cu</i> <i>DTPA</i>	mg dm ⁻³	1,38 b	3,38 a	3,50 a'	4,00 a'
<i>Fe</i> <i>DTPA</i>	mg dm ⁻³	133 a	156 a	161 a'	90 a'
<i>Mn</i> <i>DTPA</i>	mg dm ⁻³	2,5 a	4,4 a	8,9 a'	17,1 a'
<i>Zn</i> <i>DTPA</i>	mg dm ⁻³	0,8 b	13,5 a	1,5 b'	6,5 a'
<i>Ca</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	188,5 b	833,8 a	275,9 b'	671,8 a'
<i>K</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	116 a	117 a	143 a'	138 a'
<i>Mg</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	65 a	89 a	136 a'	164 a'
<i>Na</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	67 a	59 a	64 a'	66 a'
<i>Cu</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	7,7 b	13,3 a	34,6 a'	34,3 a'
<i>Fe</i> <i>pseudototal</i>	g kg ⁻¹	11,28 a	11,76 a	25,69 a'	24,20 a'
<i>Al</i> <i>pseudototal</i>	g kg ⁻¹	18,03 a	17,80 a	30,70 a'	26,72 a'
<i>Mn</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	54,7 a	61,9 a	186,4 a'	224,5 a'
<i>Zn</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	19,6 b	37,8 a	37,1 a'	45,6 a'
<i>As</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	3,74 a	4,02 a	3,73 a'	3,64 a'
<i>Ba</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	4,6 a	10,1 a	61,9 a'	58,5 a'
<i>Cd</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	0,17 a	0,24 a	0,19 a'	0,15 a'
<i>Cr</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	21,80 a	29,08 a	32,96 a'	33,76 a'
<i>Ni</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	3,93 a	7,45 a	10,78 a'	10,19 a'
<i>Pb</i> <i>pseudototal</i>	mg kg ⁻¹	7,14 b	9,83 a	14,52 a'	13,79 a'

Nota: Método empregado para a concentração pseudototal dos metais pesados: SW 3051, EPA – U.S, determinação por ICP-AES. Para cada tipo de solo e atributo (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

As concentrações fitodisponíveis (extraído em DTPA) e pseudototais (extraído com $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$) de cobre e zinco no LVA-C/LE foram até 2 e 14 vezes superiores ao LVA-S/LE, respectivamente. No entanto, as concentrações pseudototais de cobre (Cu) e zinco (Zn) no LVE (Tabela 5.2) foram similares entre os tratamentos com e sem a aplicação do lodo de esgoto; com exceção do Zn fitodisponível, cuja concentração foi 4 vezes maior no LVE-C/LE.

Martins, Bataglia e Camargo (2003), ao estudarem a disponibilidade de metais pesados em solo tratado com lodo, verificaram que as concentrações de Zn e Cu fitodisponíveis e pseudototais aumentaram linearmente com as doses de lodo aplicado ao solo; no entanto, esses autores constaram também que a maior parte desses elementos esteve associada à fração orgânica e residual do solo+lodo, o que certamente afeta a disponibilidade de Cu e Zn para as plantas.

Observou-se na tabela 5.2, que a concentração pseudototal de Chumbo em LVA-C/LE foi cerca de 40% maior em relação à LVA-S/LE, demonstrando haver efeito residual do lodo sobre a concentração de determinados metais pesados no solo, principalmente, naqueles com baixo teor de argila. Por isso, vale destacar que os efeitos residuais do lodo de esgoto foram mais intensos no Latossolo Vermelho Amarelo (teor de argila $\approx 170 \text{ g kg}^{-1}$) comparado ao Latossolo Vermelho Escuro (teor de argila $\approx 300 \text{ g kg}^{-1}$).

Segundo Santos et al. (2010), as faixas de valores entre os limites de referência de qualidade e de intervenção em relação à concentração total de metais pesados nos solos do estado de São Paulo são (em mg kg^{-1}): 35 a 60 de Cu; 17 a 72 de Pb e 60 a 300 de Zn. De acordo com essas informações, nenhuma das concentrações pseudototais de Cu, Zn e Pb observadas na tabela 5.2 excederam os limites de referência de qualidade do solo.

5.3.2 Biomassa e características morfológicas das plantas de alface

Em ambos os solos (LVA e LVE), as plantas de alface cultivadas nos tratamentos com fertilização mineral (C/FERT) não diferiram entre si quanto às características avaliadas, independentemente de estarem ou não submetidas ao efeito residual do lodo de esgoto (Tabela 5.3). Este resultado pode ser atribuído ao efeito imediato e expressivo da fertilização mineral (C/FERT) sobre o crescimento das plantas, ocultando, provavelmente, o efeito residual do lodo de esgoto.

Todavia, nos tratamentos sem fertilização mineral (S/FERT), a BFPA bem como o número de folhas e o tamanho das plantas, denominado neste trabalho como “cabeça” da alface, foram significativamente superiores nos tratamentos sob efeito residual do lodo (LE) em relação ao controle (T). No Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), a BFPA e o tamanho

das alfaces foram cerca de 300% e 70% maiores no tratamento LE, respectivamente, em comparação às alfaces cultivadas no tratamento T. Esses resultados também foram observados no Latossolo Vermelho Escuro (LVE), contudo, em menores proporções (de 20 a 100%).

Tabela 5.3 – Características morfológicas das plantas de alface nos tratamentos sob efeito residual do lodo de esgoto (LE) e testemunha (T), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Característica	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>BFPA</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	7,24 Ab	7,07 Ab	114,16 Aa	145,64 Aa
	<i>LE</i>	31,94 Aa	13,34 Ba	142,50 Aa	168,06 Aa
<i>Número de folhas</i>	<i>T</i>	11 Ab	11 Aa	21 Aa	21 Aa
	<i>LE</i>	15 Aa	12 Aa	23 Aa	22 Aa
<i>Altura da cabeça (cm)</i>	<i>T</i>	6,9 Ab	6,9 Ab	17,4 Aa	19,0 Aa
	<i>LE</i>	11,5 Aa	8,2 Ba	20,0 Aa	20,9 Aa
<i>Compr. da cabeça (cm)</i>	<i>T</i>	10,5 Ab	10,0 Ab	27,5 Aa	29,6 Aa
	<i>LE</i>	17,9 Aa	14,1 Aa	31,3 Aa	32,1 Aa
<i>Larg. da cabeça (cm)</i>	<i>T</i>	10,7 Ab	10,1 Ab	27,6 Aa	31,5 Aa
	<i>LE</i>	17,5 Aa	14,4 Aa	31,2 Aa	31,0 Aa
<i>BSPA</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,97 Ab	0,94 Ab	9,61 Aa	12,42 Aa
	<i>LE</i>	3,57 Aa	1,85 Ba	11,93 Aa	14,04 Aa
<i>BSSR</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,33 Ab	0,29 Aa	0,90 Aa	1,28 Aa
	<i>LE</i>	0,99 Aa	0,44 Ba	1,43 Aa	1,52 Aa
<i>BST</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	1,28 Ab	1,23 Ab	10,51 Aa	13,70 Aa
	<i>LE</i>	4,20 Aa	2,27 Aa	13,36 Aa	15,55 Aa
<i>IC_{bs} (u.)</i>	<i>T</i>	0,73 Aa	0,76 Aa	0,91 Aa	0,91 Aa
	<i>LE</i>	0,77 Aa	0,79 Aa	0,90 Aa	0,90 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). As características representadas por sigla são: biomassa fresca e seca da parte aérea (BFPA e BSPA, respectivamente), biomassa seca do sistema radicular (BSSR), biomassa seca total (BST) e índice de colheita com base na matéria seca (IC_{bs}).

Castro, Mañas e Heras (2009), ao avaliarem plantas de alface após a adubação com lodo de esgoto, constaram que a produção de biomassa fresca foi, ao longo de três ciclos de cultivo, até 16 vezes maior nas parcelas com 40 t ha⁻¹ de lodo seco em relação ao tratamento sem adubação. Esses autores observaram também que a aplicação de lodo elevou o teor de nitrogênio, matéria orgânica e fósforo no solo, contribuindo para o crescimento das plantas.

Mesmo após a desidratação das plantas de alface, a biomassa seca da parte aérea e do sistema radicular (BSPA e BSSR) produzida no LVA foi significativamente superior nos

tratamentos com lodo de esgoto em relação ao controle T, sendo observadas diferenças de até 270%. No LVE, as alfaces cultivadas nos tratamentos T e LE produziram quantidades similares de BSSR (média = 0,36 g planta⁻¹), mas diferiram em até 100% quanto à BSPA.

Observa-se na tabela 5.2, que o índice de colheita (IC_{bs}) foi pouco influenciado pelo efeito residual do lodo de esgoto, tanto no LVA quanto no LVE. Em ambos os solos, o IC_{bs} foi em média de 0,76 e 0,90 unidades para às alfaces cultivadas sem e com fertilização mineral recente, respectivamente.

Vale destacar que o efeito residual do lodo de esgoto foi consideravelmente maior sobre as alfaces cultivadas em LVA, comparadas àquelas cultivadas em LVE. Este resultado pode ser atribuído à menor capacidade tampão do LVA, visto que contém menor quantidade de argila e maior quantidade de areia.

5.3.3 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de alface

De acordo com a tabela 5.4, apenas as plantas de alface cultivadas em LVA-S/FERT apresentaram concentração foliar de cálcio (Ca) significativamente superior (cerca de 60%) quando submetida ao efeito residual do lodo de esgoto em relação às plantas cultivadas no tratamento controle T. Este resultado pode ser atribuído ao efeito residual da cal utilizada no condicionamento do lodo de esgoto em 1998, que ao ser aplicado no LVA adicionou ao solo cerca de 1700 kg de Ca por hectare.

Wen et al. (1999), ao avaliarem a influência do lodo de esgoto sobre a concentração de cálcio e magnésio em plantas de alface e feijão, constaram que a aplicação de 40 t ha⁻¹ de lodo elevou significativamente a concentração foliar de cálcio (Ca) nas alfaces até o segundo ciclo de produção, ao passo que no cultivo do feijão, não foi observada qualquer alteração significativa devido à adubação com o lodo de esgoto. Esses autores concluem que certos atributos do lodo, tais como o conteúdo de nitrogênio e cálcio, devem ser levados em consideração no ato da sua aplicação.

Apesar de ter sido observado um pequeno efeito residual do lodo sobre a concentração de nutrientes nas plantas de alface (Tabelas 5.4 e 5.5), independentemente do tipo de solo cultivado; há de se destacar que as concentrações foliar e radicular de zinco foram significativamente maiores no tratamento C/LE, com ou sem a fertilização mineral recente.

No Latossolo Vermelho Amarelo, as plantas cultivadas sob efeito residual do lodo apresentaram concentrações foliares e radiculares de Zn aproximadamente 100 a 500% maiores em comparação ao tratamento T; ao passo que no Latossolo Vermelho Escuro, as concentrações foliares e radiculares de Zn foram 70 a 200% maiores no tratamento LE. No

entanto, vale destacar, que o efeito residual do lodo de esgoto sobre as plantas de alface acabou elevando a concentração foliar de Zn a patamares entre a faixa de 30 a 100 mg kg⁻¹, considerada por Trani e Raij (1997) como adequada para a nutrição da alface.

Tabela 5.4 – Concentração de nutrientes nas folhas das plantas de alface submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	13,37 Aa	14,84 Aa	19,03 Aa	14,33 Aa
	<i>LE</i>	13,71 Aa	14,36 Aa	16,53 Aa	14,80 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	1,16 Aa	1,18 Aa	3,65 Aa	2,91 Aa
	<i>LE</i>	1,75 Aa	1,03 Aa	3,58 Aa	2,95 Aa
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	17,41 Aa	18,75 Aa	5,80 Aa	8,16 Aa
	<i>LE</i>	16,07 Aa	16,83 Aa	8,03 Aa	8,84 Aa
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	4,22 Ab	3,76 Aa	6,89 Aa	6,23 Aa
	<i>LE</i>	6,84 Aa	4,41 Ba	7,13 Aa	7,03 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	1,03 Aa	0,88 Aa	2,18 Aa	2,35 Aa
	<i>LE</i>	1,15 Aa	0,93 Aa	2,23 Aa	2,55 Aa
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	0,87 Aa	0,85 Aa	1,07 Aa	1,01 Aa
	<i>LE</i>	0,87 Aa	0,83 Aa	1,23 Aa	1,10 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	3,50 Aa	3,63 Aa	4,59 Aa	4,82 Aa
	<i>LE</i>	3,75 Aa	4,63 Aa	4,64 Aa	6,28 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	251,18 Aa	230,90 Aa	102,96 Aa	73,27 Aa
	<i>LE</i>	140,55 Aa	154,71 Aa	83,09 Aa	67,64 Aa
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	131,13 Aa	168,25 Aa	75,75 Aa	79,88 Aa
	<i>LE</i>	108,50 Aa	156,00 Aa	39,00 Aa	59,63 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	20,02 Ab	21,00 Ab	33,38 Ab	27,92 Ab
	<i>LE</i>	61,61 Aa	49,73 Aa	63,92 Aa	48,10 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

De acordo com as tabelas 5.4 e 5.5, a concentração de Zn nas plantas de alface foi consideravelmente maior (até 3 vezes) nas raízes em comparação às folhas. Segundo Santos, Sobrinho e Mazur (2006), parte dos metais pesados absorvidos pela planta são adsorvidos a grupos carregados negativamente (COO⁻) da parede celular das raízes, evitando a presença de íons livres nos tecidos radiculares e, conseqüentemente, a translocação desses elementos para a parte aérea das plantas.

A concentração radicular de manganês (Mn) nas plantas cultivadas no LVA-C/FERT foi 40% menor no tratamento LE em relação ao tratamento controle T. Segundo Bramryd (2013), a aplicação de lodo de esgoto estabilizado com cal eleva o pH do solo, promovendo a precipitação do manganês na forma de óxidos insolúveis e, também, a complexação do Mn pelos compostos orgânicos presente no lodo, diminuindo consideravelmente a disponibilidade deste elemento no solo e a sua concentração nos tecidos das plantas.

Tabela 5.5 – Concentração de nutrientes nas raízes das plantas de alface submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	T	9,39 Aa	10,38 Aa	14,07 Aa	12,95 Aa
	LE	11,32 Aa	10,28 Aa	11,47 Ab	13,34 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	T	0,84 Aa	0,82 Aa	2,89 Aa	2,31 Ba
	LE	1,62 Aa	0,90 Aa	2,83 Aa	2,33 Aa
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	T	6,63 Aa	11,48 Aa	2,35 Aa	3,05 Ab
	LE	3,45 Aa	6,13 Aa	2,99 Ba	7,66 Aa
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	T	1,33 Ab	1,40 Aa	3,51 Aa	2,74 Aa
	LE	2,95 Aa	1,63 Aa	4,04 Aa	3,05 Ba
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	T	1,00 Aa	1,05 Aa	1,53 Aa	1,83 Ab
	LE	1,00 Aa	1,20 Aa	1,83 Ba	2,60 Aa
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	T	0,59 Aa	0,71 Aa	1,96 Aa	1,92 Aa
	LE	1,31 Aa	0,94 Aa	2,13 Aa	2,15 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	T	13,00 Aa	15,00 Aa	9,13 Aa	10,25 Aa
	LE	8,50 Aa	12,25 Aa	11,75 Aa	11,00 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	T	269,75 Aa	568,00 Aa	908,88 Aa	1150,25 Aa
	LE	375,00 Aa	518,75 Aa	1058,88 Aa	1359,00 Aa
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	T	22,50 Aa	42,75 Aa	27,38 Aa	29,75 Aa
	LE	15,00 Aa	34,50 Aa	16,25 Ab	22,50 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	T	26,81 Ab	35,75 Ab	42,88 Ab	38,08 Aa
	LE	176,96 Aa	106,39 Aa	123,41 Aa	60,06 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Observa-se na tabela 5.6, que as concentrações foliares de níquel (Ni) e Chumbo (Pb) assim como as concentrações radiculares de cádmio (Cd) e Pb nas plantas de alface não alcançaram o nível mínimo necessário para a sua determinação pelo equipamento analítico

utilizado (ICP-OES).

Por outro lado, a concentração foliar de cádmio e a concentração radicular de níquel foram 160% a 170% superiores no tratamento LE em comparação ao tratamento T. De acordo Agência de Vigilância Sanitária (ANVISA) do Brasil, as concentrações máximas de metais pesados toleradas nos vegetais com base na matéria fresca são: 1,0 mg kg⁻¹ de Cd; 5,0 mg kg⁻¹ de Ni; 0,5 mg kg⁻¹ de Pb e 0,1 mg kg⁻¹ de Cr (GUERRA et al., 2012). Se considerarmos a umidade média de 90% nas folhas da alface (Tabela 5.3), as concentrações máximas de metais pesados permitidas seriam com base na matéria seca: 10 mg kg⁻¹ de Cd; 50 mg kg⁻¹ de Ni; 5 mg kg⁻¹ de Pb e 1 mg kg⁻¹ de Cr. Tendo isso em vista, nenhuma das plantas de alface apresentou concentrações de Cd, Cr, Ni e Pb acima dos limites legais para a ingestão segura.

Tabela 5.6 – Concentração de metais pesados (mg kg⁻¹) nas folhas e raízes das plantas de alface submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Elemento	TRAT.	----- FOLHA -----		----- RAIZ -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Cádmio</i>	<i>T</i>	0,194 Ab	0,081 Aa	> 0,005	> 0,005
	<i>LE</i>	0,528 Aa	0,168 Ba	> 0,005	> 0,005
<i>Cromo</i>	<i>T</i>	0,777 Aa	0,347 Ba	7,460 Aa	6,270 Aa
	<i>LE</i>	0,397 Ab	0,477 Aa	7,630 Aa	7,645 Aa
<i>Níquel</i>	<i>T</i>	> 0,025	> 0,025	2,620 Ab	3,545 Aa
	<i>LE</i>	> 0,025	> 0,025	6,795 Aa	4,480 Aa
<i>Chumbo</i>	<i>T</i>	> 0,0025	> 0,0025	> 0,0025	> 0,0025
	<i>LE</i>	> 0,0025	> 0,0025	> 0,0025	> 0,0025

Nota: Para cada órgão da planta, elemento químico e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada órgão da planta, elemento químico e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Nogueira et al. (2013), ao estudarem o uso agrícola do lodo de esgoto em plantações de cana de açúcar, verificaram que a aplicação do lodo elevou a concentração de As, Cd, Cu, Pb e Zn nos diferentes órgãos da planta; todavia, em nenhum dos casos, a concentração desses metais nos tecidos vegetais estiveram acima dos limites de toxicidade.

5.3.4 Biomassa e características morfológicas das plantas de rabanete

A BFPA dos rabanetes cultivados sem fertilização mineral, em ambos os solos LVA e LVE, foi até 4 vezes maior no tratamento LE em comparação à biomassa produzida no tratamento T (Tabela 5.7). Por outro lado, os rabanetes cultivados com fertilização mineral

recente (C/FERT) não apresentaram evidências do efeito residual do lodo de esgoto.

Tabela 5.7 – Características morfológicas das plantas de rabanete nos tratamentos sob efeito residual do lodo de esgoto (LE) e testemunha (T), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Características	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>BFPA</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	1,14 Ab	1,18 Ab	14,48 Aa	13,43 Aa
	<i>LE</i>	4,73 Aa	3,24 Ba	15,15 Aa	16,03 Aa
<i>BFSR</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,96 Ab	1,70 Ab	60,72 Aa	63,93 Aa
	<i>LE</i>	11,77 Aa	10,98 Aa	60,52 Ba	74,75 Aa
<i>Diâmetro</i> <i>Bulbo</i> (mm)	<i>T</i>	11,24 Ab	14,18 Ab	47,53 Aa	47,28 Aa
	<i>LE</i>	26,74 Aa	27,22 Aa	47,59 Aa	51,58 Aa
<i>Volume do</i> <i>Bulbo</i> (cm ³)	<i>T</i>	0,72 Ab	1,48 Ab	57,07 Aa	57,24 Aa
	<i>LE</i>	9,96 Aa	10,54 Aa	58,03 Aa	73,48 Aa
<i>BSPA</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,08 Ab	0,12 Ab	0,93 Aa	0,87 Aa
	<i>LE</i>	0,41 Aa	0,27 Ba	1,04 Aa	1,10 Aa
<i>BSSR</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,07 Ab	0,12 Ab	2,16 Aa	2,37 Aa
	<i>LE</i>	0,76 Aa	0,56 Aa	2,30 Aa	2,69 Aa
<i>BST</i> (g planta ⁻¹)	<i>T</i>	0,17 Ab	0,25 Ab	3,09 Aa	3,23 Aa
	<i>LE</i>	1,18 Aa	0,84 Ba	3,34 Aa	3,79 Aa
<i>IC_{bs}</i> (u.)	<i>T</i>	0,44 Ab	0,48 Ab	0,70 Ba	0,74 Aa
	<i>LE</i>	0,65 Aa	0,67 Aa	0,69 Aa	0,71 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Os atributos representados por sigla são: biomassa fresca e seca da parte aérea (BFPA e BSPA, respectivamente), biomassa fresca e seca do sistema radicular (BFSR e BSSR, respectivamente), biomassa seca total (BST) e índice de colheita com base na matéria seca (IC_{bs}).

Evanylo et al.(2006), ao estudarem a biodisponibilidade de metais pesados em solo tratado com lodo de esgoto, verificaram que a produtividade do rabanete não foi alterada pela adição do lodo, mesmo 16 anos após a sua aplicação em um solo franco-argiloso. Além disso, os autores ressaltaram que não foi observado qualquer sintoma de toxicidade ou deficiência nutricional nas plantas.

Cultivados em LVA e S/FERT, os rabanetes submetidos ao efeito residual do lodo de esgoto produziram cerca de 10 vezes mais BFSR e BSSR em relação aos rabanetes cultivados no tratamento T. Da mesma forma, os rabanetes cultivados em LVE e S/FERT produziram cerca de 7 e 4 vezes mais BFSR e BSSR, respectivamente, quando submetidos ao efeito residual do lodo.

Shaheen e Tsadilas (2013), ao utilizarem lodo de esgoto no cultivo da canola (*Barassica napus*), constaram que a adubação com 50 t ha⁻¹ de lodo proporcionou, no segundo ciclo de produção, cerca de 5 vezes mais biomassa seca total em comparação ao tratamento sem adubação. Esses autores atribuíram esse resultado a melhoria da fertilidade do solo, com a adição de matéria orgânica contida no lodo e esgoto.

Observa-se na tabela 5.7, que o diâmetro médio e o volume do bulbo radicular dos rabanetes também foram influenciados pelo efeito residual do lodo de esgoto, chegando a ser até 14 vezes maiores em LVA e até 7 vezes superiores em LVE. Vale ressaltar que boa parte do volume e da biomassa fresca dos bulbos radiculares foi atribuída ao elevado teor de água (em média 90%), independentemente do tratamento avaliado.

Em ambos os solos, o índice de colheita (IC_{bs}) dos rabanetes no tratamento S/FERT foi consideravelmente maior (em média 50%) no tratamento LE em relação ao tratamento (T). Além de proporcionar maior biomassa fresca e seca, o efeito residual do lodo de esgoto favoreceu o crescimento da parte comestível da planta (os bulbos radiculares), agregando maior valor ao cultivo do rabanete.

5.3.5 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de rabanete

Conforme a tabela 5.8, as plantas cultivadas no LVA sem fertilização mineral (LVA-S/FERT) apresentaram concentrações foliares de cálcio e fósforo 2 a 4 vezes maiores no tratamento LE em relação ao tratamento T, assim como as plantas cultivadas no LVE-S/FERT também apresentaram concentração foliar de cálcio 2 vezes maior sob efeito residual do lodo (LE). Estes resultados podem ser atribuídos a elevada quantidade de cálcio e fósforo em ambos os solos (Tabela 5.2), devido à aplicação do lodo tratado com cal e à sua lenta decomposição (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006).

As concentrações foliares de nitrogênio e potássio nos rabanetes cultivados no LVA-S/FERT foram cerca de 2 vezes maiores no tratamento T em relação ao tratamento LE. Segundo Mills e Jones Junior (1996), o potássio e o nitrogênio possuem elevada mobilidade dentro da planta, o que faz com eles sejam facilmente distribuídos nos diferentes componentes do rabanete (folhas e raízes). Isto pode justificar a menor concentração de K e N nas folhas de rabanete do tratamento LE, em que as plantas apresentaram maior crescimento, levando a um maior efeito-diluição destes elementos nos órgãos da planta.

Observa-se na tabela 5.8, que a concentração foliar de zinco (Zn) dos rabanetes cultivados no LVA-S/FERT foi 2 a 3 vezes superior no tratamento LE comparado as plantas cultivadas do tratamento testemunha (T); ao passo que, a concentração foliar de manganês

(Mn) foi cerca de 4 a 7 vezes menor no tratamento LE. Este tipo de resultado não foi observado nas plantas cultivadas em LVE, evidenciando que o efeito residual do lodo encontra-se em função do tipo de solo onde foi aplicado.

Tabela 5.8 – Concentração de nutrientes nas folhas das plantas de rabanete submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT, respectivamente), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	T	48,82 Aa	49,04 Aa	33,43 Aa	31,41 Aa
	LE	27,91 Bb	44,85 Aa	31,19 Aa	31,65 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	T	1,12 Ab	2,43 Aa	4,84 Aa	4,32 Aa
	LE	4,19 Aa	1,38 Aa	4,58 Aa	4,20 Aa
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	T	19,13 Aa	17,22 Aa	26,39 Ba	32,90 Aa
	LE	8,29 Ab	12,58 Aa	25,82 Aa	22,95 Ab
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	T	16,50 Ab	12,50 Ab	39,12 Aa	31,70 Aa
	LE	26,00 Aa	27,25 Aa	50,16 Aa	39,58 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	T	3,40 Aa	3,25 Aa	2,93 Aa	3,60 Aa
	LE	3,30 Aa	2,78 Aa	2,18 Ba	4,28 Aa
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	T	6,37 Aa	6,79 Aa	5,78 Aa	5,55 Aa
	LE	6,20 Aa	6,68 Aa	6,62 Aa	5,46 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	T	5,50 Aa	6,08 Aa	7,88 Aa	6,13 Aa
	LE	4,50 Aa	6,50 Aa	7,13 Aa	7,00 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	T	192,50 Aa	183,50 Aa	189,63 Aa	188,13 Aa
	LE	145,25 Aa	137,33 Aa	172,88 Aa	174,13 Aa
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	T	379,70 Aa	911,33 Aa	186,66 Aa	273,56 Aa
	LE	55,38 Ab	292,32 Aa	41,87 Ab	160,64 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	T	103,75 Ab	181,25 Aa	37,68 Ab	56,75 Aa
	LE	265,83 Aa	234,00 Aa	104,27 Aa	68,78 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Apesar da concentração foliar de zinco ter sido acrescida consideravelmente no tratamento LE, não foram observados sinais de toxidez nas plantas, como por exemplo, folhas com pigmentação avermelhada no pecíolo e nervuras ou clorose generalizada (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Há de se destacar também que não foram observados sinais de deficiência de Mn nas plantas cultivadas no tratamento LE, como clorose entre nervuras e lesões necróticas.

Nas raízes de rabanete, a concentração de fósforo nas plantas cultivadas no LVA-S/FERT, bem como a concentração de cálcio nas plantas em LVE-S/FERT, foram significativamente superiores (de 40 a 330%) no tratamento LE (Tabela 5.9). Por outro lado, como nas folhas, a concentração radicular de manganês foi significativamente inferior no tratamento sob efeito residual do lodo de esgoto, tanto em LVA quanto em LVE, chegando a ser até 8 vezes menor em relação ao tratamento T. De acordo com Borkert, Pavan e Bataglia (2001), a disponibilidade de manganês no solo e, conseqüentemente, para as plantas depende do pH, do potencial de oxi-redução, da matéria orgânica do solo, além do equilíbrio dinâmico com outros cátions, tais como o ferro, cálcio e magnésio.

Tabela 5.9 – Concentração de nutrientes nas raízes das plantas de rabanete submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	38,95 Aa	36,46 Aa	19,22 Aa	21,49 Aa
	<i>LE</i>	16,67 Bb	28,11 Aa	19,99 Aa	22,58 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	1,23 Ab	1,67 Aa	5,69 Aa	5,36 Aa
	<i>LE</i>	5,33 Aa	3,77 Aa	5,77 Aa	5,52 Aa
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	16,84 Aa	19,90 Aa	47,24 Ba	56,99 Aa
	<i>LE</i>	17,18 Aa	27,54 Aa	47,05 Ba	55,85 Aa
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	2,36 Aa	2,27 Ab	2,60 Aa	2,51 Aa
	<i>LE</i>	2,70 Aa	3,28 Aa	3,01 Aa	3,26 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	0,70 Aa	0,80 Aa	0,85 Aa	0,95 Aa
	<i>LE</i>	0,67 Aa	0,80 Aa	0,75 Ba	1,08 Aa
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	<i>T</i>	5,49 Aa	6,14 Aa	3,93 Aa	3,72 Aa
	<i>LE</i>	4,76 Bb	5,58 Aa	4,45 Aa	3,86 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	2,75 Aa	3,50 Aa	3,75 Aa	3,50 Aa
	<i>LE</i>	2,17 Aa	3,50 Aa	3,63 Aa	3,25 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	96,25 Ba	143,50 Aa	55,00 Aa	58,13 Aa
	<i>LE</i>	55,25 Ba	80,25 Ab	51,25 Aa	60,63 Aa
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	42,31 Aa	171,45 Aa	22,05 Aa	31,16 Aa
	<i>LE</i>	5,72 Ab	32,72 Ab	8,62 Ab	18,48 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	<i>T</i>	29,25 Aa	71,25 Aa	31,38 Ab	35,25 Aa
	<i>LE</i>	85,63 Aa	100,25 Aa	56,00 Aa	41,13 Ba

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

De acordo com a tabela 5.9, a concentração radicular de zinco foi superior (cerca de 100%) apenas nos rabanetes cultivados no LVA-C/FERT do tratamento LE em relação ao tratamento testemunha T. Segundo a ANVISA (1965), o limite máximo de tolerância de Zn em alimentos vegetais é de 50 mg kg⁻¹ com base na matéria fresca. Essa concentração limite de Zn, corrigida com base na matéria seca dos rabanetes (500 mg kg⁻¹), não foi excedida por nenhum dos tratamentos T ou LE.

Em relação aos metais pesados, observa-se na tabela 5.10 que as concentrações foliares de níquel e as concentrações radiculares de chumbo não alcançaram o nível mínimo necessário para a sua determinação pelo equipamento analítico utilizado (ICP-OES). Entretanto, observa-se que a concentração radicular de Ni nos rabanetes cultivados em LVA foi cerca de 9 vezes maior no tratamento LE em comparação ao tratamento T, o que aparentemente não afetou o crescimento das plantas.

Kopittke, Asher e Menzies (2007), ao avaliarem a toxicidade do níquel (Ni) sobre o cultivo do feijoeiro (*Vigna unguiculata*), constataram que a concentração radicular de Ni foi de 3 a 10 vezes maior em relação às folhas e que a redução do crescimento (cerca de 10%) se deu depois de alcançada a concentração radicular de 440 g kg⁻¹ de Ni. Segundo esses autores, os sinais de toxidez por Ni parecem surgir inicialmente nas folhas (clorose), provavelmente pela deficiência induzida de ferro; mas é nas raízes que a toxidez por Ni se faz realmente perceber, reduzindo o seu crescimento.

Tabela 5.10 – Concentração de metais pesados (mg kg⁻¹) nas folhas e raízes das plantas de rabanete, submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Elemento	TRAT.	FOLHA		RAIZ	
		LVA	LVE	LVA	LVE
Cádmio	T	0,415 Aa	0,360 Aa	0,145 Aa	0,090 Aa
	LE	0,540 Aa	0,335 Aa	0,167 Aa	0,075 Aa
Cromo	T	1,522 Aa	1,283 Aa	0,647 Aa	0,501 Aa
	LE	0,684 Ab	0,591 Ab	0,587 Aa	0,225 Aa
Níquel	T	> 0,025	> 0,025	0,031 Ab	0,094 Aa
	LE	> 0,025	> 0,025	0,269 Aa	0,035 Aa
Chumbo	T	0,238 Aa	0,169 Aa	> 0,0025	> 0,0025
	LE	0,169 Aa	0,070 Aa	> 0,0025	> 0,0025

Nota: Para cada órgão da planta, elemento químico e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada órgão da planta, elemento químico e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Em ambos os solos, a concentração foliar de cromo nas plantas de rabanete cultivadas no tratamento LE foi significativamente menor (cerca de 100%) em comparação às plantas cultivadas no tratamento testemunha. Segundo Bramryd (2013), o cromo presente no solo com ou sem adição de lodo de esgoto é rapidamente convertido a Cr^{3+} (estado oxidado), cuja estabilidade química é maior, além de ser imóvel e inerte no solo. Segundo Egiarte et al. (2008), a forma trivalente do cromo (Cr^{3+}) tem alta afinidade pelos íons carregados negativamente e pelos colóides organominerais do solo, o que o torna relativamente imóvel e não tóxico.

5.3.6 Biomassa e características morfológicas das plantas de arroz de sequeiro

Com base na tabela 5.11, observa-se que o comprimento médio do perfilho_{superior} das plantas de arroz cultivadas em LVA foi cerca de 10% a 25% maior quando submetidas ao efeito residual do lodo de esgoto. Entretanto, este efeito não foi observado nas plantas cultivadas em LVE.

Nas plantas de arroz cultivadas em LVA, as biomassas fresca e seca da folhagem e das panículas foram cerca de 2 vezes superiores no tratamento LE em relação às plantas de arroz cultivadas no tratamento T (Tabela 5.11). Singh e Agrawal (2010), ao estudarem a fisiologia de plantas de arroz em resposta a aplicação do lodo de esgoto, constataram que o teor de clorofila bem como a taxa fotossintética das plantas aumentaram consideravelmente (cerca de 100%) em função das doses de lodo aplicadas ao solo, favorecendo a capacidade produtiva das plantas.

As plantas cultivadas em LVE e em LVA-C/FERT não produziram maior biomassa em resposta ao efeito residual do lodo de esgoto, o que pode ser atribuído aos efeitos imediatos da fertilização mineral e, também, ao maior conteúdo de argila no LVE. Ambas as condições, devido à sua intensidade e poder tampão, podem ter suprimido os efeitos residuais do lodo sobre o cultivo das plantas de arroz.

As plantas de arroz cultivadas em LVA-S/FERT, sob efeito residual do lodo de esgoto, acumularam aproximadamente 75% mais biomassa seca radicular quando comparada às plantas cultivadas no tratamento controle T; isto pode ter favorecido o desenvolvimento das plantas, permitindo maior exploração e aproveitamento dos nutrientes do solo. Gu et al. (2013), ao estudarem os efeitos do lodo de esgoto sobre o cultivo de azevém (*Lolium perenne* L.), verificaram que a aplicação de 300 t ha⁻¹ de lodo proporcionou um acréscimo de 109% na biomassa seca de raízes, em comparação às plantas sem qualquer adubação. Os autores atribuíram esse resultado à elevada quantidade de nutrientes adicionada ao solo e à capacidade

do azevém de suportar maiores níveis de metais pesados decorrentes da adubação com lodo de esgoto.

Tabela 5.11 – Características morfológicas das plantas de arroz de sequeiro nos tratamentos sob efeito residual do lodo de esgoto (LE) e testemunha (T), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Característica	TRAT.	S/FERT		C/FERT	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Compr. do perfilho_{sup.} (cm)</i>	<i>T</i>	59,4 Bb	71,9 Aa	75,4 Bb	87,5 Aa
	<i>LE</i>	74,1 Aa	79,0 Aa	84,2 Aa	90,3 Aa
<i>BFFO (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	4,50 Bb	9,16 Aa	16,35 Aa	21,88 Aa
	<i>LE</i>	10,54 Aa	10,71 Aa	20,90 Aa	23,20 Aa
<i>BFPN (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	1,50 Bb	3,05 Aa	5,96 Aa	8,16 Aa
	<i>LE</i>	3,52 Aa	3,97 Aa	7,10 Aa	9,00 Aa
<i>BSFO (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	1,28 Bb	2,39 Aa	4,37 Aa	5,54 Aa
	<i>LE</i>	2,86 Aa	2,79 Aa	5,58 Aa	5,50 Aa
<i>BSPN (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	0,93 Bb	2,05 Aa	3,91 Ba	6,04 Aa
	<i>LE</i>	2,56 Aa	2,88 Aa	5,39 Aa	6,88 Aa
<i>BSGRA (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	0,73 Bb	1,83 Ab	3,38 Ba	5,60 Aa
	<i>LE</i>	2,26 Aa	2,69 Aa	4,87 Aa	6,39 Aa
<i>BSSR (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	0,80 Bb	1,63 Aa	1,95 Bb	3,16 Aa
	<i>LE</i>	1,42 Ba	1,87 Aa	2,85 Aa	2,78 Aa
<i>BST (g planta⁻¹)</i>	<i>T</i>	3,11 Bb	6,79 Aa	10,49 Bb	15,32 Aa
	<i>LE</i>	7,35 Aa	7,93 Aa	14,54 Aa	15,94 Aa
<i>Peso de 100 grãos_(bs) (g)</i>	<i>T</i>	1,79 Ab	1,91 Aa	1,81 Bb	1,97 Ab
	<i>LE</i>	1,96 Aa	2,02 Aa	2,02 Aa	2,16 Aa
<i>IC_(bs) (u.)</i>	<i>T</i>	0,27 Ab	0,31 Ab	0,34 Ba	0,39 Aa
	<i>LE</i>	0,34 Aa	0,37 Aa	0,36 Ba	0,43 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tipo de solo (coluna); médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$). Para cada FERT (S/ ou C/), característica da planta e tratamento (linha); médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$). Os atributos representados por sigla são: biomassa fresca e seca da folhagem (BFFO e BSFO, respectivamente); biomassa fresca e seca das panículas (BFPN e BSPN, respectivamente); biomassa seca de grãos (BSGRA), biomassa seca do sistema radicular (BSSR), biomassa seca total (BST) e índice de colheita com base na matéria seca (IC_{bs}).

A produção de grãos (BSGRA) pelas plantas de arroz sem fertilização mineral foi significativamente superior no tratamento LE, em ambos os solos. O efeito residual do lodo de esgoto elevou a produção de grãos em cerca de 200% quando cultivadas em LVA e cerca de 50% em LVE. Parkpian et al. (2003), ao estudarem os benefícios gerados pela combinação do lodo de esgoto com nitrogênio mineral no cultivo do arroz, verificaram que a adubação das

plantas com 67% de lodo + 33% de N mineral proporcionou cerca de 30% mais biomassa de grãos em relação às plantas sem qualquer adubação. Esses autores constataram que o nitrogênio contido no lodo foi mineralizado lentamente até o momento da colheita do arroz, suprimindo a demanda das plantas ao longo do ciclo de cultivo.

Outro resultado de destaque obtido nesta pesquisa, com o cultivo das plantas em LVA-S/FERT, foi o incremento de 10% no “Peso de 100 grãos” obtido pelas plantas sob efeito residual do lodo de esgoto. Além de produzir mais grãos por planta (em média 40 grãos), em comparação ao tratamento T (média de 36 grãos), as plantas cultivadas no tratamento LE acumularam maior biomassa por grão, o que acarretou uma maior produção total de grãos (BSGRA).

Em ambos os solos, observou-se que o índice de colheita (IC_{bs}) das plantas de arroz cultivadas sem fertilização mineral (S/FERT) foi cerca de 30% maior quando submetidas ao tratamento LE. De modo geral, o efeito residual do lodo proporcionou plantas com maior biomassa aérea e radicular, maiores índices de colheita e, consequentemente, maior rendimento na produção de arroz.

5.3.7 Concentração de nutrientes e metais pesados nas plantas de arroz de sequeiro

De acordo com a tabela 5.12, a concentração foliar de fósforo (P) nas plantas de arroz cultivadas em ambos os solos, com e sem fertilização mineral, foi significativamente superior no tratamento LE, em comparação ao tratamento T. Resultados similares foram observados também em relação aos grãos (Tabela 5.13) e às raízes das plantas de arroz de sequeiro (Tabela 5.14).

Em termos relativos, a concentração foliar de P foi até 60% maior no tratamento LVE-LE em comparação à testemunha; ao passo que, no tratamento LVA-LE, esta diferença foi de 100% a 325%. Nos grãos e raízes, a concentração de P no tratamento LE foi até 90% maior nas plantas cultivadas em LVA e até 60% maior nas plantas cultivadas no LVE-S/FERT.

Samaras, Tsadilas e Stamatiadis (2008), ao investigarem os efeitos de diversas aplicações de lodo de esgoto no cultivo do algodoeiro, verificaram que a concentração foliar de fósforo elevou-se significativamente com as doses de lodo aplicadas ao solo. De acordo com esses pesquisadores, a dose de 10 t ha^{-1} de lodo foi suficientemente adequada, melhorando a fertilidade do solo sem ocasionar, no entanto, lixiviação de nitrato ou fosfato para as camadas mais profundas.

De acordo com a tabela 5.13, a concentração de enxofre nos grãos das plantas de arroz cultivada em LVE foi significativamente superior (10% a 50%) no tratamento LE, em

comparação às plantas cultivadas no tratamento T. Diferentemente, as plantas cultivadas em LVA não apresentaram diferenças entre os tratamentos LE e T, quanto à concentração de S nos grãos. Isto pode estar relacionado à maior lixiviação de sulfato no LVA, devido o seu menor teor de argila. O íon SO_4^{2-} , contido na solução do solo, é a principal forma de enxofre absorvida pelas plantas e sua disponibilidade depende, entre outros processos, da adsorção/dessorção, mineralização/imobilização e dos efeitos influenciados pelas raízes das plantas (ALVAREZ V et al., 2007).

Tabela 5.12 – Concentração de nutrientes nas folhas das plantas de arroz de sequeiro submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	T	8,95 Aa	7,41 Aa	7,09 Aa	5,26 Ba
	LE	7,46 Aa	6,32 Aa	5,97 Ab	5,33 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	T	0,43 Ab	0,40 Ab	0,59 Ab	0,40 Bb
	LE	1,83 Aa	0,64 Ba	1,22 Aa	0,59 Ba
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	T	13,01 Aa	11,80 Aa	6,59 Aa	6,01 Aa
	LE	10,27 Ab	11,22 Aa	6,38 Aa	6,30 Aa
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	T	2,94 Aa	3,15 Aa	3,86 Aa	4,85 Aa
	LE	3,48 Aa	3,69 Aa	4,01 Aa	4,71 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	T	1,12 Aa	1,06 Aa	4,43 Aa	4,20 Aa
	LE	1,64 Aa	1,37 Aa	4,20 Aa	3,93 Aa
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	T	3,13 Aa	2,35 Aa	1,50 Ba	1,98 Aa
	LE	2,16 Ab	1,74 Aa	1,70 Aa	1,54 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	T	9,88 Aa	8,50 Aa	7,75 Aa	9,38 Aa
	LE	8,25 Aa	7,13 Aa	9,38 Aa	8,13 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	T	107,38 Aa	114,17 Aa	143,50 Aa	162,50 Aa
	LE	107,50 Aa	108,25 Aa	119,38 Aa	120,75 Ab
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	T	156,51 Bb	544,33 Aa	70,14 Bb	491,26 Aa
	LE	474,36 Aa	1009,93 Aa	296,43 Ba	1254,99 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	T	80,77 Ab	78,88 Ab	51,60 Bb	98,67 Ab
	LE	303,13 Aa	205,60 Aa	223,81 Aa	215,41 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

As concentrações de manganês nas folhas (Tabela 5.12) e raízes (Tabela 5.13) das plantas cultivadas em LVA-S/FERT foram 2 a 4 vezes maiores no tratamento LE, em

comparação ao tratamento T, o que não foi observado nas plantas cultivadas no LVE. Mesmo assim, a concentração de Mn nos grãos de arroz foi 3 a 4 vezes maior nas plantas do tratamento LE, em ambos os solos, destacando-se do tratamento T.

Vale destacar ainda que a resposta das plantas de arroz ao efeito residual do lodo, quanto à concentração de Mn nas folhas e raízes, foi oposta à resposta das plantas de alface e rabanete. Isto pode estar relacionado às diferenças entre a capacidade de troca catiônica radicular (CTCR) de plantas monocotiledôneas (10 a 20 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de raízes secas) em relação à CTCR de plantas eudicotiledôneas (40 a 80 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (FERNANDES; SOUZA, 2006).

Tabela 5.13 – Concentração de nutrientes nos grãos das plantas de arroz de sequeiro submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	14,60 Aa	13,52 Aa	12,31 Aa	11,69 Aa
	<i>LE</i>	13,58 Aa	12,65 Aa	10,64 Aa	11,43 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	1,90 Bb	2,34 Ab	2,65 Ab	2,35 Aa
	<i>LE</i>	3,54 Aa	2,85 Aa	3,53 Aa	2,73 Ba
<i>Potássio</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	2,04 Ab	2,04 Aa	2,87 Aa	2,49 Aa
	<i>LE</i>	2,75 Aa	2,36 Aa	3,06 Aa	2,49 Ba
<i>Cálcio</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	0,25 Aa	0,24 Aa	0,29 Aa	0,24 Aa
	<i>LE</i>	0,21 Aa	0,20 Aa	0,24 Aa	0,26 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	0,37 Ab	0,39 Aa	0,80 Aa	0,65 Aa
	<i>LE</i>	0,56 Aa	0,40 Ba	0,88 Aa	0,68 Ba
<i>Enxofre</i> (g kg^{-1})	<i>T</i>	0,89 Aa	0,82 Ab	0,61 Aa	0,56 Ab
	<i>LE</i>	0,97 Aa	1,22 Aa	0,57 Aa	0,63 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg^{-1})	<i>T</i>	6,38 Aa	5,38 Aa	6,13 Aa	6,13 Aa
	<i>LE</i>	5,88 Aa	5,13 Aa	6,25 Aa	6,13 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg^{-1})	<i>T</i>	42,38 Aa	37,25 Aa	27,88 Aa	27,38 Aa
	<i>LE</i>	40,88 Aa	30,75 Aa	26, 88 Aa	20,13 Bb
<i>Manganês</i> (mg kg^{-1})	<i>T</i>	20,65 Bb	31,04 Ab	12,70 Bb	23,38 Ab
	<i>LE</i>	56,15 Aa	79,48 Aa	40,21 Aa	63,34 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg^{-1})	<i>T</i>	26,36 Ab	26,64 Aa	28,25 Ab	32,75 Aa
	<i>LE</i>	39,91 Aa	31,62 Aa	40,25 Aa	36,38 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

Conforme as tabelas 5.12 e 5.14, as concentrações foliares e radiculares de zinco foram significativamente superiores no tratamento LE em comparação ao tratamento T, independentemente do tipo de solo ou da fertilização mineral recente. No caso das folhas, as concentrações de Zn foram 2 e 4 vezes maior nas plantas cultivadas em LVE e LVA, respectivamente, sob efeito residual do lodo. Nas raízes, a concentração de Zn foi até 4 vezes superior nas plantas cultivadas em LVE-LE e até 9 vezes maior nas plantas cultivadas em LVA-LE. Estes resultados podem ser atribuídos à elevada quantidade de Zn adicionada ao solo via aplicação do lodo de esgoto (32,6 kg ha⁻¹) e à maior biodisponibilidade do zinco devido à sua complexação por ácidos húmico (GARCÍA-MINA; ANTOLÍN; SANCHES-DIAZ, 2004), gerados a partir da matéria orgânica contida no lodo de esgoto.

Tabela 5.14 – Concentração de nutrientes nas raízes das plantas de arroz de sequeiro submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), sem e com fertilização mineral (S/FERT e C/FERT), cultivadas em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

Nutriente	TRAT.	----- S/FERT -----		----- C/FERT -----	
		LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Nitrogênio</i> (g kg ⁻¹)	T	9,91 Aa	8,92 Aa	6,63 Aa	6,92 Aa
	LE	8,62 Aa	8,64 Aa	6,60 Aa	6,85 Aa
<i>Fósforo</i> (g kg ⁻¹)	T	0,57 Ab	0,57 Ab	0,48 Ab	0,55 Aa
	LE	1,07 Aa	0,91 Aa	0,83 Aa	0,65 Aa
<i>Potássio</i> (g kg ⁻¹)	T	3,06 Aa	2,49 Aa	1,53 Aa	0,89 Ba
	LE	2,55 Aa	2,17 Aa	1,53 Aa	1,08 Ba
<i>Cálcio</i> (g kg ⁻¹)	T	0,86 Aa	0,54 Ab	0,73 Ab	0,73 Aa
	LE	1,20 Aa	1,00 Aa	1,13 Aa	0,86 Aa
<i>Magnésio</i> (g kg ⁻¹)	T	0,25 Aa	0,20 Aa	0,32 Ab	0,24 Aa
	LE	0,36 Aa	0,27 Aa	0,56 Aa	0,29 Ba
<i>Enxofre</i> (g kg ⁻¹)	T	3,36 Ba	5,09 Aa	4,71 Aa	5,36 Aa
	LE	4,40 Aa	5,12 Aa	6,05 Aa	5,63 Aa
<i>Cobre</i> (mg kg ⁻¹)	T	49,50 Aa	38,75 Aa	15,22 Bb	32,05 Aa
	LE	68,25 Aa	50,88 Aa	45,99 Aa	40,09 Aa
<i>Ferro</i> (mg kg ⁻¹)	T	24868,7 Ba	29165,0 Aa	4447,5 Aa	4469,2 Aa
	LE	27585,0 Ba	31976,7 Aa	4652,8 Aa	4559,5 Aa
<i>Manganês</i> (mg kg ⁻¹)	T	13,62 Bb	43,66 Aa	13,44 Bb	37,55 Aa
	LE	38,77 Ba	131,24 Aa	31,97 Ba	78,10 Aa
<i>Zinco</i> (mg kg ⁻¹)	T	19,13 Ab	21,64 Ab	11,85 Ab	18,93 Ab
	LE	166,63 Aa	79,65 Aa	81,82 Aa	45,63 Aa

Nota: Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05). Para cada FERT (S/ ou C/), nutriente e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

A concentração de zinco nos grãos de arroz produzidos no tratamento LVA-LE foi 40 a 50% maior em relação ao tratamento LVA-T (Tabela 5.13), o que não foi observado nas plantas cultivadas em LVE. Considerando uma umidade de aproximadamente 25% na biomassa fresca dos grãos de arroz, a concentração de Zn observada na tabela 5.13 não ultrapassou os limites máximos (67 mg kg^{-1} base seca) estabelecidos pela ANVISA (1965).

Na tabela 5.15, observa-se que a concentração de cádmio nos grãos e raízes das plantas de arroz cultivadas em LVA e LVE não alcançou o nível mínimo necessário para a sua determinação no espectrômetro ICP-OES. Contudo, a concentração foliar de cádmio (Cd) foi até 27 vezes maior nas plantas cultivadas no tratamento LE, em ambos os tipos de solo. Segundo Dong, Wu e Zhang (2006), o acúmulo excessivo de Cd pela planta pode afetar a absorção e a translocação dos nutrientes e, conseqüentemente, reduzir o crescimento das plantas devido ao desequilíbrio nutricional provocado pela sua relação antagônica com os elementos essenciais às plantas. Tais sinais de desequilíbrio nutricional não foram constatados nas plantas de arroz, como também não foram verificados sinais de toxicidade por cádmio, como por exemplo, clorose internerval, necrose dos tecidos e coloração marrom da parte adaxial da folha (STRITSIS; CLAASSEN, 2013).

Tabela 5.15 – Concentração de metais pesados (mg kg^{-1}) nas folhas, grãos e raízes das plantas de arroz de sequeiro submetidas aos tratamentos testemunha (T) e efeito residual do lodo de esgoto (LE), cultivadas com fertilização mineral e em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE)

TRAT.	----- FOLHA -----		----- GRÃO -----		----- RAIZ -----	
	LVA	LVE	LVA	LVE	LVA	LVE
<i>Cádmio</i>						
T	0,020 Ab	0,049 Ab	> 0,005	> 0,005	> 0,005	> 0,005
LE	0,553 Aa	0,364 Aa	> 0,005	> 0,005	> 0,005	> 0,005
<i>Cromo</i>						
T	0,632 Aa	0,617 Aa	1,807 Aa	1,061 Ba	2,805 Bb	5,770 Aa
LE	0,560 Aa	0,888 Aa	1,469 Aa	0,925 Ba	6,020 Aa	6,075 Aa
<i>Níquel</i>						
T	0,158 Aa	0,221 Aa	1,989 Aa	2,505 Aa	0,225 Bb	2,555 Aa
LE	0,059 Ba	0,602 Aa	2,213 Aa	1,842 Aa	4,275 Aa	3,215 Aa
<i>Chumbo</i>						
T	2,184 Aa	0,879 Aa	0,180 Aa	0,100 Aa	4,310 Aa	2,810 Ba
LE	0,111 Ab	0,296 Aa	0,020 Ab	0,060 Aa	2,750 Ab	1,700 Aa

Nota: Para cada órgão da planta, elemento químico e tipo de solo (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$). Para cada órgão da planta, elemento químico e tratamento (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

As concentrações radiculares de cromo e níquel foram significativamente superiores nas plantas cultivadas no tratamento LVA-LE, em relação às plantas cultivadas no tratamento LVA-T. No caso do cromo, as diferenças não ultrapassaram 100% e, no caso do níquel, as concentrações foram até 19 vezes maiores no tratamento LE, em comparação ao tratamento T. Revoredo e Melo (2006), ao estudarem a disponibilidade de níquel em solo tratado com lodo de esgoto, verificaram que o Ni concentrou-se em maior parte na raiz de sorgo, vindo a seguir, no grão, na folha e no colmo das plantas. Todavia, vale ressaltar que as concentrações radiculares de níquel (Tabela 5.15) estiveram abaixo da faixa de toxicidade (10 a 100 g kg⁻¹ de Ni base seca) relatada por Kabata-Pendias e Pendias (2000).

Diferentemente, as concentrações de chumbo nas folhas, grãos e raízes das plantas cultivadas em LVA foram significativamente inferiores no tratamento LE, comparado ao tratamento T. Ou seja, a concentração de Pb foi de 2 a 19 vezes menor nas plantas cultivadas sob efeito residual do lodo de esgoto.

Egiarte et al. (2006), ao estudarem o efeito imediato do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo e a composição química de lixiviados, constataram que teor chumbo foi drasticamente reduzido no solo com a aplicação do lodo, visto que apenas 1% do Pb foi encontrado no lixiviado. Além disso, esses autores verificaram que a quantidade de Pb contida na fração orgânica do solo+lodo corresponderia a 115% do conteúdo total de Pb adicionado com o lodo de esgoto. Ou seja, segundo estes autores, a matéria orgânica adicionada ao solo com a aplicação do lodo foi capaz de complexar o chumbo exógeno, oriundo do lodo, e também o Pb oriundo do próprio solo.

Em face dos resultados obtidos nesta pesquisa e das considerações expressas na literatura científica, fica evidente que a alteração do uso agrícola do solo, antes ocupado por plantios de eucaliptos e adubado com lodo de esgoto, pode beneficiar o cultivo de hortaliças e cereais (ex. alface, rabanete e arroz) em virtude do efeito residual do lodo sobre o crescimento (biomassa) destas plantas, sem que haja acúmulo indesejável de metais pesados nas partes comestíveis, tais como folhas, raízes e grãos. Neste sentido, o lodo de esgoto deve ser aplicado nos sistemas agroflorestais com os devidos cuidados, respeitando as doses e os intervalos adequados, tanto do ponto de vista silvicultural quanto ecológico.

5.4 Conclusões

A adubação dos plantios de *Eucalyptus grandis* com 20 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, mesmo 14 anos após a sua aplicação em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo

Vermelho Escuro (LVE), exerceu efeito residual significativo sobre a fertilidade dos solos, elevando o pH, o teor de fósforo, cálcio, magnésio e zinco, além de reduzir o teor de alumínio. Vale ressaltar que este efeito residual do lodo foi mais expressivo no LVA (com menor teor de argila) em relação ao LVE.

O cultivo das plantas de alface, rabanete e arroz de sequeiro, nos vasos preenchidos com os latossolos adubados há 14 anos com o lodo de esgoto, evidenciou o efeito residual positivo do lodo sobre a produção (em biomassa) de folhas de alface, raiz de rabanete e grãos de arroz. O efeito residual do lodo foi mais evidente no LVA do que no LVE. Isto sugere que os estudos, quanto à aplicabilidade do lodo de esgoto em culturas agroflorestais, deveriam ser conduzidos prioritariamente em solos de baixa fertilidade e reduzido poder tampão.

O efeito residual do lodo de esgoto elevou também as concentrações de fósforo, cálcio e zinco nas folhas de alface, raízes de rabanete e grãos de arroz de sequeiro. Este efeito residual do lodo foi, novamente, mais intenso nas plantas cultivadas no Latossolo com menor teor de argila (LVA).

As plantas de alface e arroz de sequeiro, sob efeito residual do lodo de esgoto, apresentaram maiores concentrações de cádmio nas folhas, bem como de cromo e níquel nas raízes. Mesmo assim, a concentração desses metais nas partes comestíveis de cada planta não excederem os limites legais estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), quanto à ingestão desses elementos por um indivíduo adulto.

Referências

- AARAB, T.; SMEYERS, M.; REMY, M.; GODDEN, B.; DELHAYE, J.P. The storage of sewage sludge: influence of liming on the evolution of copper chemical fractions. **Waste Management**, Oxford, v. 26, n. 9, p. 1024-1032, 2006.
- ALVAREZ, V.V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N. DE F. X - Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-644.
- ANDRADE, M.G. de; MELO, V. de F.; SOUZA, L.C. de P.; GABARDO, J.; REISSMANN, C.B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: II – Formas e disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 6, p. 1889-1897, 2009.
- BAI, Y.; CHEN, W.; CHANG, A.C.; PAGE, A.L. Uptake of metals by food plants grown on soils 10 years after biosolids application. **Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes**, New York, v. 45, n. 6, p. 531-539, 2010.

BINDER, D.L.; DOBERMANN, A.; SANDER, D.H.; CASSMAN, K.G. Biosolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 2, p. 531-543, 2002.

BORKERT, C.M.; PAVAN, M.A.; BATAGLIA, O.C. Disponibilidade e Avaliação de Elementos Catiônicos: Ferro e Manganês. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. da; RAIJ, B.van.; ABREU, C.A. de (Ed.). **Micronutrientes e Elementos Tóxicos na Agricultura**. Jaboticabal, SP: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 151-185.

BRAMRYD, T. Long-term effects of sewage sludge application on the heavy metal concentrations in acid pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in a climatic gradient in Sweden. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 289, n. 1, p. 434-444, 2013.

BRASIL. Agência de Vigilância Sanitária – ANVISA. **Decreto nº 55.871 de março de 1965**. Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/414d248047458a7d93f3d73fbc4c6735/DECRETO+N%C2%BA+55.871,+DE+26+DE+MAR%C3%87O+DE+1965.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 20 set. 2013.

CASTRO, E.; MAÑAS, M.P.; HERAS, D.L. Nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.) after fertilization with sewage sludge and irrigation with treated wastewater. **Food Additives and Contaminants**, London, v. 26, n. 2, p. 172-179, 2009.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. XIII - Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 327-354.

DONG, J.; WU, F.; ZHANG, G. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). **Chemosphere**, Oxford, v. 64, n. 10, p. 1659-1666, 2006.

EGIARTE, G.; ARBESTAIN, M.C.; RUÍZ-ROMERA, E.; PINTO, M. Study of the chemistry of an acid soil column and of the corresponding leachates after the addition of an anaerobic municipal sludge. **Chemosphere**, Oxford, v. 65, n. 11, p. 2456-2467, 2006.

EGIARTE, G.; PINTO, M.; RUÍZ-ROMERA, E.; ARBESTAIN, M.C. Monitoring heavy metal concentrations in leachates from forest soil subjected to repeated applications of sewage sludge. **Environmental Pollution**, Barking, v. 156, n. 3, p. 840-848, 2008.

EVANYLO, G.; SUKKARIYAH, B.; EBORALL, M.A.; ZELAZNY, L. Bioavailability of heavy metals in biosolids-amended soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, n. 15/20, p. 2157-2170, 2006.

FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R. Absorção de Nutrientes. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-152.

GARCÍA-MINA, J.M.; ANTOLÍN, M.C.; SANCHES-DIAZ, S. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, n. 1, p. 57-69, 2004.

GIASSON, E.; TEDESCO, M.J. Classificação das terras e quantidades máximas de metais pesados a adicionar por lodo de esgoto. In: COSCIOANE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução n° 375 do CONAMA**. Botucatu, SP: FEPAF, 2010. p. 171-197.

GOLDEWIJK, K.K. Estimating global land use over the past 300 years: the HYDE database. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 15, n. 2, p. 417-433, 2001.

GU, C.; BAI, Y.; TAO, T.; CHEN, G.; SHAN, Y. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal uptake and yield of ryegrass seedling in a mudflat soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 42, n. 2, p. 421-428, 2013.

GUERRA, F.; TREVIZAM, A.R.; MURAOKA, T.; MARCANTE, N.C.; CANNIATTI-BRAZACA, S.G. Heavy metals in vegetables and potential risk for human health. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 1, p. 54-60, 2012.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 7th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 515p.

JONES, D.L.; CROSS, P.; WITHERS, P.J.A.; DELUCA, T.H; ROBINSON, D.A.; QUILLIAM, R.S.; HARRIS, I.M.; CHADWICK, D.R.; EDWARDS-JONES, G. Nutrient stripping: the global disparity between food security and soil nutrient stocks. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 50, n. 4, p. 851-862, 2013.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace Elements in Soils and Plants**. 3rd .ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000. 413p.

KOPITTKKE, P.M.; ASHER, C.J.; MENZIES, N.W. Toxic effects of Ni²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Plant and Soil**, The Hague, v. 292, n. 1/2, p. 283-289, 2007.

MANTOVI, P.; BALDONI, G.; TODERI, G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. **Water Research**, New York, v. 39, n. 2-3, p. 289-296, 2005.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A de. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR. E.; PERES, J.R.R. (Ed.) **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174p.

MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A. de. 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.

MCLAUGHLIN, M.J. Heavy Metals. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. 2nd ed. Columbus, Ohio: Taylor & Francis, 2006. p. 817-820.

MELO, L.C.A.; SILVA, C.A.; DIAS, B. de O. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 1, p. 101-110, 2008.

MILLS, H.A.; JONES JUNIOR, J.B. **Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide**. Athenas, USA: Micro-Macro Pub, 1996. 321p.

NOGUEIRA, T.A.R.; MELO, W.J. de; OLIVEIRA, L.R.; FONSECA, I.M.; MELO, G.M.P. de; MARCUSSI, S.A.; MARQUES, M.O. Nickel in soil and maize plants grown on na oxisol treated over a long time with sewage sludge. **Chemical Speciation and Bioavailability**, Surrey, v. 21, n. 4, p. 165-173, 2009.

NOGUEIRA, T.A.R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, London, v. 114, p. 168-177, 2013.

NOGUEIROL, R.C.; MELO, W.J. de; BERTONCINI, E.I.; ALLEONI, L.R.F. Concentrations of Cu, Fe, Mn and Zn in tropical soils amended with sewage sludge and composted sewage sludge. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 2929-2938, 2013.

PARKPIAN, P.; RANAMUKHAARACHCHI, S.L.; HANSEN, G.K.; MESKUNTAVON, W.; JUGSUJUNDA, A. Benefits and risks of using a combination of sewage sludge and chemical fertilizer on rice in acid sulfate soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 65, n. 2, p. 173-182, 2003.

POGGIANI, F.; SILVA, P.H.M. da; GUEDES, M.C. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. In: ANDREOLI, C. V. (Org.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2006. p. 159-188.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. revisada e atualizada. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997, 285 p. (IAC. Boletim Técnico 100).

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

REVOREDO, M.D.; MELO, W.J. de. Disponibilidade de níquel em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com sorgo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 679-685, 2006.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. **Balanco hídrico normal por Thorntwaite e Mather (1955)**. Piracicaba: ESALQ/USP – Departamento de Ciências Exatas: Área de Física e Meteorologia, 1999 (programa para Excel v. 6). 1 CD-ROM.

SAMARAS, V.; TSADILAS, C.D.; STAMATIADIS, S. Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield, and nitrate leaching. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 477-483, 2008.

SANTOS, F.S. dos; SOBRINHO, N.M.B. do; MAZUR, N. XVI – Mecanismos de tolerância de plantas a metais pesados. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 419-432.

SANTOS, G.C.G. dos; RODELLA, A.A.; ABREU, C.A. de; COSCIONE, A.R. Vegetable species for phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 713-719, 2010.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2002-2003.

SHAHEEN, S.; TSADILAS, C. Utilization of biosolids in production of bioenergy crops I: Impact of application rate on canola biomass, soil properties, and nutrient availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 44, n. 15/20, p. 243-258, 2013.

SINGH, R.P.; AGRAWAL, M. Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) grown on different sewage sludge amendments rates. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 84, n. 5, p. 606-612, 2010.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998.

SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 793-806, 2003.

SOBRINHO, N.M.B. do A.; BARRA, C.M.; LÃ, O.R. XVI – Química dos metais pesados no solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L.R.F. (Ed.). **Química e Mineralogia do Solo: Parte II** - Aplicações. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 249-312.

STRITSIS, C.; CLAASSEN, N. Cadmium uptake kinetics and plants factors of shoot Cd concentration. **Plant and Soil**, The Hague, v. 367, n. 1/2, p. 591-603, 2013.

TOKALIOGLU, S.; KARTAL, S.; GÜLTEKIN A. Investigation of heavy-metal uptake by vegetables growing in contaminated soils using the modified BCR sequential extraction method. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, London, v. 86, n. 6, p. 417-430, 2006.

TRANI, P.E.; RAIJ, B. van. Hortaliças. 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. revisada e atualizada. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. p. 155-185. (IAC. Boletim Técnico 100).

TSUTIYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C.T. de; MELFI, A.J.; MELO, W.J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólido na agricultura**. São Paulo, SP: SABESP, 2001. p. 89-131.

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Method 3051A – Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington DC, 2007. 30 p. Disponível em: < <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2013

VEGA, F.V.A.; BOVI, M.L.A.; BERTON, R.S.; GODOY JUNIOR, G.; CEMBRANELLI, M. de A.R. Aplicação de biossólido na implantação da cultura da pupunheira. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 131-135, 2004.

VILLANUEVA, F.C.A.; BOARETTO, A.E.; FIRME, L.P.; MURAOKA, T.; NASCIMENTO FILHO, V.F. do; ABREU JUNIOR, C.H. Mudanças químicas e fitodisponibilidade de zinco estimada por método isotópico, em solo tratado com lodo de esgoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 7, p. 1348-1354, 2012.

WEN, G.; BATES, T.E.; VORONEY, R.P.; WINTER, J.P.; SCHELLENBERG, M.P. Influence of application of sewage sludges, and sludge and manure composts on plant Ca and Mg concentration and soil extractability in field experiments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 55, n. 1, p. 51-61, 1999.