

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

**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**

Alexandre de Vicente Ferraz

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Recursos Florestais,
com opção em Conservação de Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2009**

Alexandre de Vicente Ferraz
Engenheiro Florestal

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

Orientador:
Prof. Dr. **FÁBIO POGGIANI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Recursos Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Ferraz, Alexandre de Vicente

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 / Alexandre de Vicente Ferraz. - - Piracicaba, 2009.
120 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Biossólidos 2. Eucalipto 3. Lodo de esgoto 4. Metais pesados 5. Nutrição vegetal
Título

CDD 634.9734
F381c

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

Aos meus pais

Luiz e Miriam

À minha irmã

Patrícia

Aos meus avós

Helena e Sebastião

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Departamento de Ciências Florestais pela estrutura e a todos os professores e funcionários, em especial à Raquel, ao Eliezer e ao Valdir, pelo auxílio e pronta disponibilidade em ajudar na condução deste trabalho.

Ao programa de pós-graduação em Recursos Florestais – ESALQ/USP por me fornecer toda infra-estrutura técnica necessária para o meu desenvolvimento profissional.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) pelo apoio técnico-científico e pelos 17 meses de bolsa concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelos 7 meses de bolsa concedida.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pelo financiamento de parte desta pesquisa.

À secretária Catarina, do programa de pós-graduação em Recursos – ESALQ/USP, pela indispensável ajuda.

À Alba, coordenadora do Laboratório de Ecologia Aplicada, e à Danielle pelo auxílio na condução desta pesquisa, em especial pelas análises químicas das amostras.

Ao Paulo Henrique Müller da Silva pela amizade e pelas importantes sugestões na condução deste trabalho.

À Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECF) da ESALQ-USP por toda infra-estrutura e apoio na condução das atividades experimentais.

Ao Rildo Moreira e Moreira, coordenador da EECF, pelo apoio logístico e sugestões metodológicas para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários da EECF António (Toninho), Daniel (Andó), Elaine, Helena, Marina, João Carlos, Estevão, Lourival, Thiago, Dorival, António (Ratão) pela incondicional ajuda.

À Marialice, bibliotecária do IPEF, pelo apoio, amizade e pela ajuda prestada.

A todos os amigos da sala da pós-graduação, em especial Laurão, Sarah, Ângela, Felipe, pelas valiosas discussões e pelos momentos de descontração.

À 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 (Cróvis) e Frederico (Mônica) pelas incontáveis horas de amizade e por todo o auxílio prestado nos momentos de dificuldade.

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

MUITO OBRIGADO!

“Ou o século XXI é dedicado aos valores humanos, morais e éticos... ou de nada valerem os avanços tecnológicos conquistados até aqui.”

Gilson Luiz Volpato

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Plantações Florestais no Brasil.....	17
2.2 Lodo de Esgoto: origem, condicionamento e disposição final.....	19
2.3 Ciclagem de nutrientes e metais pesados em plantações florestais.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Descrição da área de estudo.....	27
3.2 Delineamento experimental.....	28
3.3 Coleta de dados.....	32
3.3.1 Crescimento e incremento volumétrico.....	32
3.3.2 Avaliação nutricional dos eucaliptos.....	32
3.3.3 Produção de folheto e transferência de nutrientes.....	32
3.3.4 Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo.....	33
3.3.5 Decomposição do folheto e liberação de nutrientes.....	34
3.3.6 Alterações da fertilidade do solo.....	36
3.3.7 Fitomassa e mineralomassa de raízes finas.....	37
3.3.8 Fitomassa e mineralomassa dos componentes do tronco.....	38
3.3.9 Processamento e análise química das amostras vegetais.....	39
3.4 Análise estatística dos dados.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Variações climáticas durante o período de estudo.....	43
4.2 Crescimento e incremento volumétrico.....	44
4.3 Fitomassa e mineralomassa dos componentes do tronco.....	47
4.4 Avaliação nutricional dos eucaliptos.....	53
4.5 Produção de folheto e transferência de nutrientes.....	61
4.6 Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo.....	72
4.7 Decomposição do folheto e liberação de nutrientes.....	79

4.8 Alterações na fertilidade do solo.....	89
4.9 Fitomassa e mineralomassa de raízes finas.....	98
4.10 Balanço de nutrientes e implicações silviculturais	101
5 CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS.....	109

RESUMO

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

A produção de lodo de esgoto vem aumentando exponencialmente com a multiplicação das estações de tratamento de esgoto (ETEs) e a sua disposição final tem se tornado um problema sanitário preocupante. Por ser um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na busca de alternativas ecologicamente mais adequadas para o seu descarte. Este trabalho teve como objetivo verificar as diferenças entre lodos de esgoto (biossólidos), produzidos em três diferentes Estações de Tratamento de Esgotos da região metropolitana de São Paulo, quando utilizados como adubo em plantações de *Eucalyptus grandis*. Procurou-se também avaliar a influência deste resíduo sobre a ciclagem de nutrientes e sobre a dinâmica de metais pesados no ecossistema florestal. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga-SP, cujo solo é predominantemente arenoso e de baixa fertilidade natural. O delineamento experimental utilizado foi em blocos aleatorizados, com 4 repetições e cinco tratamentos, sendo eles: 1) Testemunha Absoluta (TA), sem nenhuma adubação; 2) Fertilização mineral convencional (FM); 3) Aplicação de 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto da ETE de Barueri (LB); 4) 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto da ETE de São Miguel (LSM); 5) 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto da ETE do Parque Novo Mundo (LPNM). Todos os tratamentos com lodo de esgoto foram complementados com potássio mineral (KCl), visto que o lodo é deficiente neste nutriente. O LB e o LSM foram condicionados com polieletrólitos, mas o LPNM foi condicionado com cal hidratada e cloreto férrico. O efeito dos diferentes tratamentos sobre os eucaliptos foi avaliado através de: inventários florestais semestrais, nutrição foliar, estimativa do folheto produzido mensalmente, estimativa semestral de folheto acumulado sobre o solo, avaliação da decomposição do folheto no campo através de bolsas decompositoras, reflexo dos lodos sobre a fertilidade do solo, estimativa da biomassa e do estoque de nutrientes e metais pesados nos componentes do tronco (Lenho+Casca), nas folhas e nas raízes finas dos eucaliptos. Observou-se que a adubação dos eucaliptos com os lodos propiciou, em média, um incremento do volume de madeira da ordem de 65%, superior à testemunha (sem adubação) e similar ao observado no tratamento com fertilização mineral. A concentração dos nutrientes nas folhas dos eucaliptos tratados com os lodos, aos 6 meses de idade, apresentou uma elevação significativa dos nutrientes N, P, Ca, Cu, Fe e Zn em relação à testemunha. Mas, aos 42 meses, observou-se a tendência geral de redução da concentração de todos os nutrientes nas folhas, independente dos tratamentos. A adição dos lodos estimulou em 75% a produção de folheto pelos eucaliptos, bem como um maior acúmulo de folheto sobre o piso florestal. Conseqüentemente, houve uma maior transferência de nutrientes, via folheto, das copas dos eucaliptos para a camada de serapilheira. De maneira geral, a aplicação da FM e dos lodos de esgoto melhorou a fertilidade do solo na linha de plantio (ponto de aplicação), principalmente na camada entre 0 e 5 cm de profundidade. Todavia, poucas mudanças foram observadas na produção de raízes finas em função dos diferentes tratamentos. O lodo de esgoto, quando condicionado na ETE com cal hidratada, tende a elevar o estoque de cálcio em todos os componentes do sistema solo-planta-serapilheira, podendo a longo prazo causar desbalanço nutricional e impactos prejudiciais ao ecossistema. Nos tratamentos com lodo de esgoto, foi observada uma maior concentração de metais pesados, em comparação à testemunha, nas folhas: Cu, Zn e Ni; no folheto: Cu e Zn; no solo: Cu e Zn (na linha de plantio) e Zn (na entrelinha de

plântio), apenas na camada de 0-5 cm de profundidade e nas raízes finas: Zn e Ni. É imprescindível, portanto, se conhecer previamente a concentração dos diferentes elementos no lodo de esgoto, antes de sua aplicação em plantios florestais. O monitoramento nutricional das árvores e da ciclagem dos nutrientes são práticas de fundamental importância para o bom manejo deste resíduo e do empreendimento florestal.

Palavras-chave: Lodo de esgoto; Biossólido; Metais pesados; Ciclagem de nutrientes; *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT

Nutrient and heavy metal cycling in *Eucalyptus grandis* plantations fertilized with sewage sludge from different sewage treatment plants in metropolitan region of Sao Paulo, Brazil

The production of sewage sludge increased exponentially with the enlargement of sewage treatment plants (ETEs, by its acronym in Portuguese). The final disposal of this product has always been a sanitary problem. Since it is a residue rich in organic matter and nutrients, several researches have been carried out, looking for adequate ecological alternatives for its disposal. This study aims to verify the differences among the sewage sludge (biosolids) from three different sewage treatment plants in the metropolitan region of Sao Paulo when used as fertilizers in *Eucalyptus grandis* plantations. Moreover it seeks to assess the influence of this residue in the nutrients cycling and in the heavy metals dynamic in forestry ecosystems. This research was carried out in the Experimental Station of Forestry Sciences of ESALQ/USP in Itatinga, Sao Paulo, where the soil is mainly sandy and of low natural fertility. The experimental delineation was of randomized blocks, with 4 replications and 5 treatments: 1) control (TA) without fertilization; 2) mineral conventional fertilization (FM); 3) application of 15 Mg ha⁻¹ of sewage sludge from *Barueri* ETE (LB); 4) 15 Mg ha⁻¹ of sewage sludge from *Sao Miguel* ETE (LSM); 5) 15 Mg ha⁻¹ of sewage sludge from *Parque Novo Mundo* ETE (LPNM). Since the sewage sludge lacks mineral potassium (KCl), it was added to all the treatments. The LB and the LSM were conditioned with polyelectrolyte, but the LPNM was conditioned with CaOH and with FeCl₃. The sewage sludge was applied in the planting rows. The effect of the different treatments on the eucalyptus trees was assessed by: six-monthly forestry inventories, leaf nutrition, estimation of monthly production of leaf fall, six-monthly estimation of leaf fall stocked in the soil, assessment of the decomposition of leaf fall in the field with decomposition bags, reflex of the sludge over the soil fertility, estimation of the biomass and the stock of nutrients and heavy metals in the trunk (stem wood + bark), in the leaves and in the fine roots of the eucalyptus trees. It was observed that the fertilization with sludge favored in average the increase of the wood volume around 65%, higher than the control (without fertilization) and similar to what observed in the treatment with mineral fertilization. The concentration of N, P, Ca, Cu, Fe and Zn in the leaves of the eucalyptus treated with the sludge, when six months old, increased significantly compared with the control. When the trees, of all the treatments were 42 months old, there was a decrease in the concentration of all nutrients in the leaves. The addition of sludge stimulated in 75% the production of leaf fall, as well as its high accumulation in the forestry soil. Consequently, the nutrients transfer was high, by the leaf fall, from the top of the trees to the litter. In general, the application of FM and of sewage sludge improved the soil fertility in the inter row (application place), mainly in the depth 0-5 cm. However, few changes were observed in the fine roots production regarding the different treatments. The sewage sludge, when conditioned in the ETE with CaOH, tends to increase the calcium stock in all the components of the system soil-plant-litter, what in long term may cause a nutritional imbalance and harmful impacts to the ecosystem. In the treatments with sewage sludge, a higher concentration of heavy metals in the leaves was observed in comparison with the control: Cu, Zn and Ni; in the leaf fall: Cu and Zn; in the soil: Cu and Zn (in the planting rows) and Zn (between-tree rows), only in the depth 0-5cm and in the fine roots: Zn and Ni. Therefore, before the application of sewage sludge in forestry plantations it is essential to know the concentration of the different elements present in it. The nutritional

monitoring of the trees and the nutrients cycling are fundamental practices of essential importance for the good management of this residue and for the forestry farmer.

Keywords: Sewage Sludge; Biosolids; Heavy metals; Nutrient cycling; *Eucalyptus grandis*

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a sociedade tem evoluído com base no antropocentrismo, no qual o homem é o centro das relações e a natureza, que se entende como o restante dos componentes bióticos e abióticos do meio ambiente, está exclusivamente a seu serviço. Neste sentido, os impactos ambientais gerados a partir de atividades antrópicas são dos mais diversos tipos e dimensões, como por exemplo, a poluição atmosférica por gases do efeito estufa e a contaminação dos corpos d'água por efluentes urbano/industriais. Estes impactos provocam atualmente certa preocupação à sociedade, inclusive no âmbito mundial, quanto à qualidade de vida das pessoas e as catástrofes ambientais.

Em virtude da poluição provocada por lançamento de esgotos *in natura* em cursos d'água, estações de tratamento de esgoto vêm sendo implementadas nas principais cidades brasileiras, obtendo-se, geralmente, considerável redução da carga orgânica dos efluentes (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002). No entanto, os mesmos autores ressaltam que as estações de tratamento de esgoto deparam-se com um novo problema: a destinação a ser dada ao lodo de esgoto, resíduo que permanece após o tratamento do esgoto.

O lodo de esgoto pode também ser comumente denominado *Biossólido*, de acordo com o tratamento que este resíduo tenha sofrido e conforme sua disposição final. Programas visando à reciclagem agrícola de biossólidos representam uma alternativa para minimizar o problema da disposição final desse material, bem como prevenir os possíveis efeitos adversos no ambiente, prezando pela conservação dos recursos naturais e buscando, ao mesmo tempo, benefícios agronômicos (ANDRADE; OLIVEIRA; CERRI, 2006). A utilização de biossólidos nas práticas agrícolas e florestais e sua reciclagem no solo necessitam, além da determinação das características biológicas, físicas e químicas do biossólido, de um amplo conhecimento das propriedades fundamentais e na quantidade de elementos poluentes que estão sendo incorporados ao solo para poder-se limitar a quantidade de biossólido a ser aplicado, prevenindo a ocorrência de qualquer problema futuro (TAMANINI et al., 2005).

A utilização do lodo de esgoto em plantações florestais, como fertilizante e condicionador do solo, tem sido apontada como uma das formas mais interessantes de disposição final deste resíduo, considerando que o produto final (madeira) não interfere diretamente na cadeia alimentar humana e que as reaplicações de lodo de esgoto no solo são realizadas em intervalos

relativamente longos, diluindo os efeitos acumulativos dos compostos químicos recalcitrantes, que possam se tornar prejudiciais ao meio ambiente.

A manutenção ou até o aumento da produtividade dos solos florestais tem demandado de inúmeras tecnologias, e estas por sua vez são normalmente avaliadas através de indicadores ambientais quanto sua real eficácia e impactos gerados. Existem diversos indicadores que podem ser utilizados para monitorar o comportamento da qualidade física, química e biológica do ambiente, sendo que os mais utilizados no campo florestal são: o crescimento das árvores em altura, diâmetro e acúmulo de fitomassa; a evolução da área basal das florestas; o teor de macro e micronutrientes nas folhas das árvores; a produção e a qualidade da água na bacia florestada; a ciclagem de nutrientes; etc.

Estudos sobre a ciclagem de nutrientes em povoamentos de eucaliptos permitem avaliar possíveis alterações decorrentes de técnicas de manejo aplicadas e possibilitam inferir sobre a sustentabilidade da produção (ZAIA; GAMA-RODRUGUES, 2004).

Assim, foi objetivo desta pesquisa avaliar comparativamente o lodo de esgoto, produzido por três Estações de Tratamento (ETEs) da SABESP localizadas na região metropolitana da Grande São Paulo, quanto sua potencialidade como adubo em plantios florestais de *Eucalyptus grandis*. Foi, portanto, estudada sua influência no crescimento das árvores, na ciclagem biogeoquímica dos nutrientes e no eventual impacto sobre o ecossistema, devido à presença de metais pesados no lodo. Teve o intuito, também, de gerar novas informações científicas que venham balizar a legislação ambiental, ampliar as alternativas para os gestores das estações de tratamento de esgoto e contribuir para melhorar a atividade dos produtores florestais, que visam incrementar a produção de madeira e reduzir os custos, cada vez mais elevados, com a aquisição de fertilizantes minerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Plantações Florestais no Brasil

Uma das principais formas de desmatamento no Brasil tem sido a comercialização da madeira, seguida do extrativismo de inúmeras espécies nativas de interesse econômico (MORA; GARCIA, 2000). O Brasil consome a cada ano 300 milhões de metros cúbicos de madeira e, desse total, apenas 70 milhões provêm de florestas plantadas, as quais somente nas últimas décadas começaram a se espalhar, predominantemente, sobre terrenos degradados, pastos e antigos cafezais, áreas que há séculos tinham perdido a cobertura arbórea (QUEIROZ; BARRICHELO, 2007).

Em 2005, a escassez de madeira em áreas com florestas plantadas, conhecida como “o apagão florestal”, já se constituía em risco a médio prazo, o que poderia comprometer a expansão do setor industrial de papel e celulose pela qual as indústrias vinham empreendendo grandes esforços (ZOGBI, 2005). Segundo o mesmo autor, é necessário ter em mente que a expansão da base florestal de pinus e eucalipto no país precisa acompanhar o ritmo de crescimento do consumo de celulose e papel, tanto para fins de abastecimento do mercado interno, como para as exportações. Atualmente, as plantações florestais de rápido crescimento são ecossistemas indispensáveis para o desenvolvimento do país, visto que, através de sua elevada produtividade, podem suprir o mercado com produtos madeireiros e não madeireiros, e, conseqüentemente, atenuar a devastação das matas nativas remanescentes (POGGIANI, 2006).

O objetivo das empresas filiadas à Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) é, em uma década, triplicar a área de florestas plantadas que, em 2006, chegou a 5.373.417 hectares; se isso for possível, o Brasil terá 15 milhões de hectares plantados no início da década de 2020 (QUEIROZ; BARRICHELO, 2007).

Com destaque histórico, as áreas de florestas plantadas no Brasil acumularam em 2008 o total estimado de 6.583.074 ha. Desse total, 6.126.000 ha estão ocupadas por eucaliptos e pinus, representando um acréscimo de cerca de 282.000 hectares plantados com essas espécies em relação ao total estimado do ano anterior (ABRAF, 2009).

Segundo dados divulgados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Secretaria de Relações Internacionais do Agronegócio (SRI/MAPA), o ano de 2008 apresentou superávit comercial de cerca de US\$ 60 bilhões para o agronegócio. Os produtos de madeira, que

integram o agronegócio, também apresentaram contribuição significativa para esse desempenho favorável, visto que as exportações brasileiras de produtos de florestas plantadas aumentaram 17,2% em 2008, quando atingiram US\$ 6,8 bilhões comparados aos US\$ 5,8 bilhões exportados no acumulado de 2007; o setor de florestas plantadas foi, em 2008, responsável por 3% do total das exportações do país (ABRAF, 2009).

A cadeia produtiva do setor florestal em 2006 foi responsável por cerca de 6,9 milhões de empregos. No mesmo ano, a cadeia produtiva exclusivamente do setor de florestas plantadas (primário e transformação industrial), respondeu por 4,33 milhões de empregos, um aumento de 6,1% em relação ao ano anterior (SBS, 2007).

Dentre as inúmeras espécies arbóreas existentes, o eucalipto, devido as suas características de rápido crescimento, alta produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicação para diferentes finalidades tem sido extensivamente utilizado em plantações florestais. Entretanto, os solos utilizados para plantações florestais comerciais são de baixa fertilidade; sabe-se, contudo, que os eucaliptos absorvem uma quantidade considerável de nutrientes que são armazenados nos diferentes componentes das árvores: folhas, galhos, casca e lenho (MORA; GARCIA, 2000). Quando as árvores são cortadas e retiradas do campo, elas exportam os nutrientes absorvidos e assimilados.

Sob tais circunstâncias, o plantio sucessivo de espécies florestais com alta capacidade de extração de nutrientes tem grande impacto sobre a disponibilidade e reservas de nutrientes minerais dos solos, resultando em queda da qualidade dos sítios de produção, quando não devidamente manejados, necessitando, portanto, de uma estratégia de fertilização para o adequado desenvolvimento das plantas, sem que haja perda de produtividade nos ciclos de produção subsequentes (PULITO, 2009).

O uso de fertilizantes minerais na implantação e manutenção de povoamentos florestais tem sido praticado há alguns anos, viabilizando o aumento da produtividade dos sítios com baixa fertilidade natural. Nas últimas décadas, grandes quantidades de fertilizantes têm sido aplicadas em solos sob plantios florestais com manejo intensivo (GONÇALVES et al., 2004); contudo, atualmente, a racionalização das aplicações de fertilizantes nos reflorestamentos comerciais tem se tornado essencial para que haja viabilidade econômica e ambiental deste tipo de empreendimento florestal (LACLAU et al., 2009).

Segundo Fixen (2009), as reservas mundiais de rochas minerais utilizadas para a produção

dos fertilizantes parecem ser adequadas para o sustento da produção agrícola atual e futura; contudo, os custos dos nutrientes deverão aumentar com o tempo à medida que os materiais que são extraídos com maior facilidade das jazidas forem sendo consumidos. O autor ressalta que o manejo racional das fontes não-renováveis de nutrientes é uma responsabilidade crucial para a indústria agrícola.

Atualmente, o Brasil importa cerca de 70% de sua demanda de fertilizantes e, em 2008, o dispêndio de divisas com importações de fertilizantes foi estimado em US\$ 11,31 bilhões – FOB (FERREIRA; VEGRO, 2009). Segundo Ferreira e Vergo (2009), as cotações dos principais fertilizantes no mercado internacional cresceram consideravelmente nos últimos dois anos (2007 e 2008), visto que os preços médios dos fertilizantes importados saltaram de US\$ 190,43 Mg⁻¹ em 2006 para US\$ 589,14 Mg⁻¹ em 2008.

Se por um lado, a expansão das áreas com plantio de pinus e eucaliptos é de fundamental importância para o crescimento do setor florestal brasileiro, ou até mesmo, para que não ocorra o chamado “apagão florestal”; por outro lado, o aumento do consumo de fertilizantes minerais convencionais é indesejável, visto que a maioria dos principais nutrientes utilizados na silvicultura é oriunda de reservas minerais não renováveis e que o preço dos fertilizantes minerais tende a aumentar com o tempo. Sendo assim, a busca por alternativas viáveis que minimizem a dependência dos plantios florestais por fertilizantes minerais convencionais é de fundamental importância para a sobrevivência e para a expansão das áreas de reflorestamento comercial com *Eucalyptus* no Brasil.

2.2 Lodo de Esgoto: origem, condicionamento e disposição final

Com a evolução da sociedade moderna, a necessidade de produzir, conservar e transportar quantidades cada vez maiores de alimentos e a busca constante por maior conforto na maneira de viver têm determinado o aparecimento de indústrias com os mais diferentes objetivos, agravando, de modo sensível, a produção de resíduos, além de aumentar o consumo de água e a produção de esgoto (MELO; MARQUES, 2000).

A crescente demanda por melhores condições ambientais tem exigido de empresas públicas e privadas a definição de políticas ambientais mais avançadas, incluindo o tratamento de efluentes domésticos e industriais (BARREIROS et al., 2007). Em virtude da poluição provocada por lançamento de esgotos *in natura* em cursos d'água, estações de tratamento de esgoto vêm

sendo implementadas nas principais cidades brasileiras, obtendo-se, geralmente, considerável redução da carga orgânica dos efluentes (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002). Entretanto, durante o tratamento do esgoto há geração de um novo resíduo, o lodo de esgoto ou biossólido (BORGES; COUTINHO, 2004b), cuja disposição final por meios convencionais (disposição em aterros sanitários, rios, lagos, oceano) representa alto custo para as estações de tratamento além de ser ambientalmente inaceitável (ANDRADE; MATTIAZZO, 2000; OLIVER; MCLAUGHLIN; MERRINGTON, 2005). Estima-se que a região metropolitana da cidade de São Paulo estará produzindo cerca de 780 toneladas (base seca) de lodo esgoto por dia no ano de 2015 (TSUTIYA, 2000).

A WEF (Water Environmental Federation) propõe o termo *Biossólido* para denominar o lodo proveniente do tratamento de esgotos sanitários ou industriais, que tenha sido devidamente higienizado, estabilizado e seco, e que apresente uma composição predominantemente orgânica, podendo ter uma utilização benéfica (ANDREOLI; PEGORINI, 1998; MELO; MARQUES, 2000).

Para cada processo adotado na estação de tratamento de esgoto (ETE), o lodo pode ser submetido a diferentes tipos de adensamento, estabilização, condicionamento e desidratação antes de sua disposição final. De modo geral, a estabilização é utilizada para a redução da massa de lodo, redução de microrganismos patogênicos e controle de odor; por sua vez, o adensamento, o condicionamento, a desidratação e a secagem são utilizados para a remoção de água e redução do volume de lodo (TSUTYA, 2000). O condicionamento do lodo de esgoto pode ser efetuado com coagulantes inorgânicos, como por exemplo, sais metálicos (e.g. cloreto férrico) e a cal virgem (CaO), ou através de coagulantes orgânicos, como por exemplo, os polieletrólitos (GONÇALVES et al., 2001).

A calagem do lodo é também um processo de higienização que consiste na mistura da cal virgem (de construção civil) ao lodo em proporções que variam de 30 a 50% do peso seco do lodo; neste caso, três fatores intervêm no processo de desinfecção: inicialmente a alteração da temperatura, o aumento do pH da massa resultante (mistura Lodo + Cal) e finalmente a ação da amônia que será formada a partir do nitrogênio do lodo em condições de temperatura e pH elevados (ILHENFELD; ANDREOLI; LARA, 1999). Segundo Gonçalves et al. (2001), os polímeros apresentam diversas vantagens em relação aos condicionadores inorgânicos, podendo-se citar: o pequeno acréscimo na massa do lodo resultante, visto que os condicionadores

inorgânicos normalmente aumentam a massa do lodo de 15 a 30%; as operações de manuseio de polímeros são mais limpas e seguras, além de reduzirem os problemas de operação e manutenção das ETEs. Contudo, vale ressaltar que os polímeros não exercem a função de desinfecção como a calagem do lodo com cal virgem.

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, que pode ser feito com cloreto férrico mais cal, ou simplesmente com a adição de polímeros (polieletrólitos), resulta em lodos com características bem distintas e que poderá influir significativamente no seu destino final, particularmente quando se pensa em uso do lodo de esgoto na agricultura (SOBRINHO, 2000).

Lodos estabilizados com cal atuam primeiramente elevando o pH do solo, e, em se tratando de solos com cargas dependentes de pH, que são muito comuns no Brasil, isso resulta em aumento da CTC (CHIBA; MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2008). Lodos de esgoto não estabilizados com cal, por sua vez, comportam-se de maneira diferente, podendo causar, inclusive, redução do pH devido à mineralização do resíduo orgânico e liberação de ácidos orgânicos (GUEDES et al., 2006).

Resultados de pesquisas com bioestabilizado em agricultura indicam que ele possui todos os nutrientes exigidos pelas plantas, devido aos altos teores de matéria orgânica, e que seu emprego é altamente recomendável em milho, café, cana-de-açúcar, citros, espécies florestais e outras plantas perenes (VEGA et al., 2004). Além de fornecer nutrientes, a elevada quantidade de matéria orgânica contida no bioestabilizado pode aumentar o conteúdo de húmus que melhora a capacidade de armazenamento e de infiltração da água no solo, aumentando a resistência dos agregados e reduzindo a erosão, facilitando a penetração das raízes e a vida microbiana (TAMANINI et al., 2005). O aproveitamento do bioestabilizado em culturas, como fertilizante e condicionador de solos para promover o crescimento de plantas, representa a possibilidade de associar ganhos para o produtor, por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais, com ganhos para os geradores de lodo, pela efetivação de métodos adequados e mais econômicos de disposição final desse resíduo (GUEDES et al., 2006; JORDÃO, 2006).

Diferentes são os destinos finais propostos para o bioestabilizado, sendo que o uso florestal

posiciona-se como uma das alternativas mais atraentes, tendo em vista os benefícios atribuídos à reciclagem de nutrientes devido aos altos teores de matéria orgânica (40-60%), nitrogênio (4%), fósforo (2%), e micronutrientes em geral, aliada à produção de madeira que não afetaria a cadeia alimentar humana (VIEIRA; SILVA, 2003; KIMBERLEY et al., 2003; VELASCO-MOLINA, 2004). No estado de São Paulo, vastas áreas destinadas a florestas poderiam absorver grande parte do biossólido produzido nas estações de tratamento de esgoto (ETE's) (ROCHA et al., 2004).

O reflorestamento, por não ser uma atividade que envolve produtos para consumo alimentar e pelo fato de poder ser instalado em áreas distantes de núcleos urbanos, com acesso restrito a pessoas e animais, apresenta grande vantagem em relação às culturas comerciais no tocante ao uso de lodo de esgoto (CAMPOS; ALVES, 2008).

Os teores de matéria orgânica e nutrientes em biossólido são os principais atrativos para o seu uso florestal, no entanto, sob certas circunstâncias a presença de patógenos humanos e/ou animais, de sais solúveis e metais pesados, de materiais orgânicos recalcitrantes e a possibilidade de lixiviação de nitrato no perfil do solo podem ser obstáculos em áreas tratadas com esse resíduo e por isso merecem especial atenção (FRANCO-HERNÁNDEZ et al., 2003; JOSHUA et al., 1998; VELASCO-MOLINA et al., 2006). Os lodos de esgoto carregam consigo significativa parcela do potencial poluidor dos esgotos dos quais se originaram e, portanto, apresentam teores variáveis de muitas substâncias prejudiciais ao meio ambiente, dentre estas destacam-se os metais pesados (ASSUNÇÃO; SÍGOLO, 1997).

O termo “metal pesado” refere-se aos elementos químicos de alta densidade, maior que 5 g/cm³, com número atômico acima de 20 e com caráter eletropositivo dos metais; embora, essa designação não seja muito adequada para diferenciar um grupo de elementos em sistemas biológicos, ela é muito utilizada (RAIJ, 1991).

Os metais pesados mais comumente encontrados no biossólido são: Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu) e o Zinco (Zn), e as concentrações desses metais são governadas pela natureza e pela intensidade da atividade industrial, bem como com o tipo de processo empregado durante o tratamento do lodo de esgoto (MATTIGOD; PAGE, 1983).

As principais preocupações em relação à adição de metais pesados ao solo são: entrada na cadeia alimentar, redução da produtividade agrícola devido a efeitos fitotóxicos, acúmulo no solo, alteração da atividade microbiana e contaminação dos recursos hídricos (PIRES, 2003). Elevadas

concentrações de metais pesados no solo podem levar a uma absorção excessiva destes elementos pela cultura e podem também afetar negativamente o crescimento das plantas; estes metais pesados em concentrações relativamente elevadas interferem nos processos metabólicos e inibem o crescimento, conduzindo às vezes as plantas até a morte (TOKALIOGLU; KARTAL; GÜLTEKIN, 2005).

Em alguns países, órgãos governamentais regulam os limites máximos de teores de metais pesados no bio sólido e outros resíduos para que estes possam ser aplicados no solo (BORGES; COUTINHO, 2004a). O Brasil é um dos países que se basearam nas normas da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos USEPA (EPA – 503) para regulamentar a aplicação de bio sólido em meio agrícola; contudo, solos altamente intemperizados como os que aqui ocorrem, em que predominam os óxidos e pH baixo, as reações de adsorção do metal são diferentes daquelas que ocorrem nos solos em que o regulamento foi baseado (SILVEIRA et al., 2003). Por isso, resultados de pesquisas geradas no Brasil são essenciais para subsidiar técnica e cientificamente uma normatização federal desta prática, evitando que impactos ambientais negativos sejam gerados (PIRES, 2003). Atualmente, a resolução vigente que regulamenta o uso agrícola do lodo de esgoto (CONAMA 375, 2006) define critérios relativamente rígidos quanto à concentração de metais pesados presentes no lodo a ser aplicado ao solo, tornando muitas vezes inviável o seu uso agrícola ou florestal.

A aplicação de lodo de esgoto ao solo, assim como de outros resíduos ricos em matéria orgânica (M.O), vem sendo estudada com o fim de otimizar a produção de alimentos, minimizando a poluição ambiental e podendo melhorar a qualidade do solo, se as quantidades aplicadas forem adequadas (BOEIRA; SOUZA, 2007).

Múltiplas pesquisas vêm testando a aplicação do bio sólido no cultivo de eucalipto e mostram que este material age como fonte de nutrientes para as plantas e matéria orgânica para o solo. Contudo, as decisões a serem tomadas nos próximos anos necessitam de estudos prévios exaustivos, principalmente relacionados com os aspectos da ciclagem de nutrientes, aspectos esses que vêm sendo pouco estudados, e do balanço nutricional nas plantações florestais onde o lodo de esgoto urbano já está sendo aplicado em caráter experimental (POGIANNI et al., 2000; VELASCO-MOLINA, 2004; POGGIANI et al., 2006).

2.3 Ciclagem de nutrientes e metais pesados em plantações florestais

Os elementos químicos, inclusive todos os elementos essenciais do protoplasma, tendem a circular na biosfera em vias características, do ambiente aos organismos e destes, novamente, ao ambiente; estas vias mais ou menos circulares se chamam ciclos biogeoquímicos (ODUM, 1983).

Como todos os organismos dependem da presença de nutrientes na forma que são usados, a reciclagem e a regeneração de nutrientes são importantes reguladores do funcionamento do ecossistema, uma vez que apenas 10% dos nutrientes do solo assimilados pela vegetação a cada ano são proporcionados pelo intemperismo da rocha matriz; a maior parte desses nutrientes se torna disponível para as plantas pela decomposição de detritos e pequenas moléculas orgânicas no perfil do solo (RICKLEFS, 2001).

Segundo Schumacher et al. (2004) a produção de serapilheira e a posterior decomposição desta nos ecossistemas florestais constituem a via mais importante do ciclo biogeoquímico (fluxo de nutrientes no sistema solo-planta-solo). Os autores destacam ainda que este ciclo, juntamente com o geoquímico e o bioquímico, permite que as árvores da floresta possam sintetizar a matéria orgânica através da fotossíntese, reciclando principalmente os nutrientes em solos altamente intemperizados onde a biomassa vegetal é seu principal reservatório.

O ciclo geoquímico é relativo às entradas de nutrientes do ecossistema, por meio de processos como precipitações atmosféricas, intemperismo da rocha matriz, fixação biológica de nitrogênio atmosférico, aplicação de fertilizantes; e saídas de nutrientes do ecossistema, por meio da erosão, lixiviação, volatilização e remoção com a colheita (PRICHETT, 1979). O ciclo bioquímico é relativo à movimentação de nutrientes entre tecidos da própria árvore, normalmente, a retranslocação de nutrientes dos tecidos senescentes para os tecidos em formação constitui a principal forma de transferência de nutrientes internamente na árvore; por sua vez, a ciclagem biogeoquímica abrange a movimentação dos nutrientes entre o solo e a biomassa vegetal, principalmente através da deposição, mineralização e reabsorção de nutrientes contidos nos materiais vegetais senescentes (GONÇALVES et al., 2005).

A serapilheira é formada pela queda dos componentes senescentes da parte aérea das plantas, e compreende as folhas, caules, frutos, flores, bem como restos animais e material fecal sobre o solo (GOLLEY, 1978). Muitos autores relatam que a fração folha, também denominada

como folheto, é a que mais contribui em massa dentre os componentes vegetais constituintes da serapilheira, tanto em plantios florestais de espécies exóticas quanto em florestas nativas.

A dinâmica da serapilheira e de seus nutrientes, representada pela entrada via deposição e saída via decomposição/mineralização do material orgânico senescente sobre o piso florestal é essencial à manutenção de florestas ou plantios comerciais (BALIEIRO et al., 2004; POGGIANI; MONTEIRO JUNIOR, 1990). Além de ser o aspecto da ciclagem de nutrientes que mais contribui para a nutrição de um ecossistema florestal, a serapilheira depositada sobre o piso florestal ameniza o impacto das gotas das chuvas sobre o solo, aumenta a infiltração de água e retenção de água, evita a erosão e possibilita o acúmulo de nutrientes no solo, fatos que auxiliam na sua sustentabilidade (KÖNIG et al., 2002; FREITAS et al., 2004).

Conforme Souza e Davide (2001), a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais, tanto em reflorestamentos como em florestas nativas, tem sido consideravelmente estudada, com o intuito de se obter maior conhecimento da dinâmica dos nutrientes nestes ambientes, não só para o entendimento do funcionamento dos ecossistemas, mas a fim de adquirir informações para o estabelecimento de práticas de manejo florestal.

A quantidade de nutrientes retornados ao solo florestal é sempre uma função da quantidade de serapilheira produzida e da concentração desses nutrientes no material analisado (KOEHLER; REISSMANN, 1992). A queda de acículas, ramos, folhas e outros componentes da biomassa acima do solo é uma estratégia da planta para evitar perda excessiva de água através da transpiração e evapotranspiração; além desses fatores fisiológicos, outros fatores podem atuar sobre a queda da serapilheira, como ventos fortes, granizo etc. (ZAIA; GAMA-RODRUGUES, 2004).

Segundo Vital (1999), cada parte da árvore apresenta diferentes concentrações de elementos químicos em seus tecidos, o que irá refletir na quantidade de nutrientes transferidos para o solo, conforme a produção de cada compartimento na serapilheira e sua taxa de decomposição. O teor dos nutrientes depositados com a serapilheira varia com a espécie, variedade, procedência, fatores edáficos, tipo e forma de adubação, com as condições climáticas e com o elemento em si. As diferentes frações da serapilheira possuem estrutura e composição química distintas e decompõem-se a diferentes velocidades. Portanto, a velocidade global de decomposição da serapilheira dependerá da proporção relativa dos diferentes componentes, mas,

sobretudo, variáveis climáticas como: temperatura, umidade e aeração são fatores que interferem significativamente na velocidade global de decomposição da serapilheira (MASON, 1980).

As informações a respeito das quantidades de nutrientes encontradas no solo, na serapilheira e na biomassa aérea são importantes para a definição de estratégias para manutenção da sua sustentabilidade florestal (SPANGENBERG et al., 1996). Em florestas plantadas, como nas de eucalipto, a quantidade de nutrientes existentes no solo e a exportada durante a exploração florestal são de grande importância na definição do balanço de nutrientes e da eventual necessidade de aplicação de fertilizantes (MELO et al., 1995). Em consequência da implantação de povoamentos em solos extremamente pobres, o estudo do ciclo de nutrientes nesses locais é de importância fundamental, possibilitando a previsão de situações que poderiam ser críticas a médio e longo prazo, tanto em relação à produtividade, como em relação às características do solo. (SCHUMACHER; WITSCHORECK, 2008)

A reação das plantas ao estresse químico, que pode ser causado pela deficiência ou pelo excesso de elementos traço (metais pesados) no solo, não pode ser determinada com exatidão; principalmente, devido a algumas espécies vegetais terem desenvolvido durante a evolução vários mecanismos bioquímicos distintos que possibilitam a adaptação à ambientes contaminados ou naturalmente ricos nestes elementos químicos, que normalmente são nocivos para o desenvolvimento das demais plantas (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

Segundo Berg e Laskowski (2006), um dos principais problemas relacionados a vários tipos de metais pesados é a afinidade que estes elementos têm pela matéria orgânica e pelas partículas minerais do solo; por causa disto, os metais pesados tendem a acumular no solo após moderadas adições (entradas) no ecossistema, podendo eventualmente exceder o limite de toxicidade para os microrganismos e invertebrados do solo.

Alloway (1993) relata que a ciclagem biogeoquímica de metais pesados e o fluxo natural desses elementos na biosfera têm sido alterados em função da crescente atividade de mineração e produção de resíduos industriais ricos em metais que contaminam o solo e demais componentes dos ecossistemas. Como a ciclagem de nutrientes é extremamente importante para a manutenção da vida e da produtividade de um ecossistema florestal, seja ele natural ou comercial, alterações neste processo ecológico acarretam em degradação ambiental e prejuízos financeiros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A área onde foi realizado o estudo está situada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), pertencente à Universidade de São Paulo (USP). Localizada na região centro-sul do Estado de São Paulo, a EECFI encontra-se no município de Itatinga, entre as coordenadas 23°10'S e 48°40'W, a 860 m de altitude.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa - mesotérmico úmido com inverno seco. A precipitação média anual é de 1.300 mm, ocorrendo à maior incidência de chuvas no período de outubro a março; e a temperatura média anual 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).

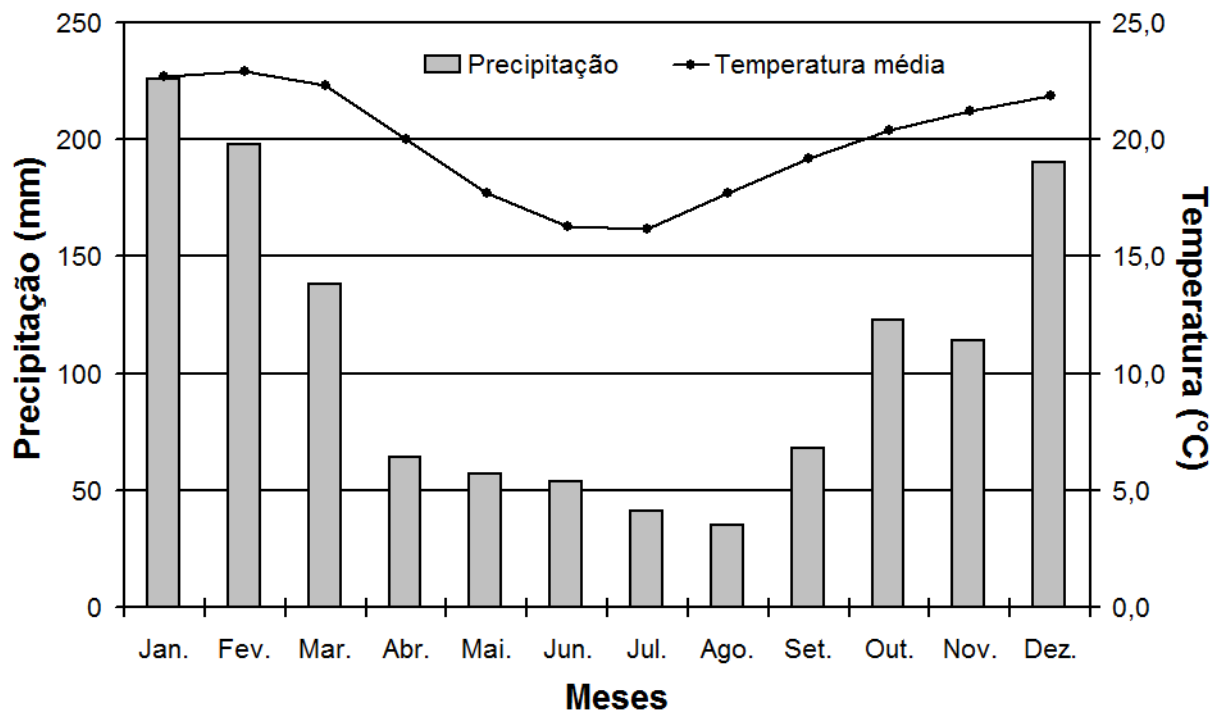


Figura 1 – Normais de precipitação e temperatura média do município de Itatinga-SP (ROLIM; SENTELHAS, 1999)

O histórico da área de estudo quanto ao tipo de ocupação do solo se resume basicamente em três períodos distintos: até meados dos anos 40, grande parte da área apresentava-se recoberta por vegetação de cerrado e a outra parte era utilizada para a criação de gado de leite e de corte. Após este período, a área passou a ser cultivada com eucaliptos pela extinta Ferrovia Paulista S/A

(FEPASA), visando à produção de lenha e dormentes, permanecendo assim por aproximadamente 50 anos. Em 1988, com a criação da EECFI, parte da área continuou sendo manejada com o cultivo de eucaliptos, ao passo que outra parte (cerca de 700 hectares) foi destinada à realização de experimentos científicos relacionados à silvicultura e ao manejo florestal.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, A moderado, textura média e relevo plano (GONÇALVES, 2003). Este solo apresenta baixa fertilidade natural, com pH ácido e baixo teor de argila (Tabela 1). Situação, portanto, característica das áreas do estado de São Paulo atualmente florestadas com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo antes da instalação do experimento

Profundidade (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 %
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

Profundidade (cm)	B -----	Cu -----	Fe mg dm ⁻³	Mn -----	Zn -----	Areia Total -----	Silte %	Argila Total -----
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

O povoamento de *Eucalyptus grandis* da área experimental foi implantado no mês de maio do ano de 2005, com mudas produzidas em tubetes, pelo viveiro da Companhia Suzano de Papel e Celulose, através de sementes oriundas de uma única progênie. O terreno foi preparado através de subsolagem até a profundidade de 40 cm e o espaçamento do plantio foi de 3 metros entre linhas e 2 metros entre plantas. Nos momentos oportunos, foram realizadas aplicações do herbicida Roundup, para o controle da matocompetição; e foi realizada também a aplicação de isca formicida Mirex-S®, para o controle de formigas cortadeiras.

3.2 Delineamento experimental

A área experimental foi dividida em quatro blocos, sendo cada um composto por cinco

parcelas distribuídas aleatoriamente. Em cada parcela foi instalado um dos seguintes tratamentos: 1) Testemunha Absoluta (TA), sem nenhuma adubação; 2) Fertilização mineral convencional (FM) usualmente aplicada pelas empresas florestais da região; 3) Adubação de base + K + 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto produzido na ETE de Barueri (LB); 4) Adubação de base + K + 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto produzido na ETE de São Miguel (LSM); 5) Adubação de base + K + 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto produzido ETE do Parque Novo Mundo (LPNM).

A dose de lodo aplicada foi calculada em base seca e as especificações quanto à fertilização efetuada em cada tratamento são apresentadas na tabela 2. Cada parcela foi composta por 100 plantas, totalizando uma área de 600 m². Como foi mantida a bordadura dupla com eucaliptos entre as parcelas, a área útil de cada parcela ficou constituída por 36 árvores, ocupando uma área de 216 m².

Tabela 2 - Quantidade dos diferentes fertilizantes adicionados em cada tratamento (Kg ha⁻¹)

Fertilização	Fórmula do Adubo	----- Tratamentos -----				
		TA	FM	LB	LPNM	LSM
Calagem	Calcário Dolomítico	-	1.500	-	-	-
Base A	NPK 6:30:6	-	200	100	100	100
Base B	FTE Br 12	-	80	40	40	40
Cobertura 1	NPK 18:6:24	-	200	-	-	-
Cobertura 2	NPK 18:6:24	-	200	-	-	-
Cobertura 3	NPK 18:6:24	-	200	-	-	-
Lodo de Esgoto	-	-	-	15.000*	15.000*	15.000*
Complementar 1	KCl	-	-	100	100	100
Complementar 2	KCl	-	-	100	100	100

Nota: Os códigos 1, 2 e 3 correspondem a 3, 6 e 9 meses respectivamente, períodos em que foram realizadas as fertilizações após o plantio das mudas.

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento

* Peso determinado com base em matéria seca.

A fertilização foi aplicada da seguinte forma: 1) Na calagem, o calcário foi aplicado a lanço; 2) As fertilizações de base foram aplicadas em covetas laterais; 3) As fertilizações de cobertura e complementar foram realizadas em coroa ao redor de cada planta e, por fim; 4) os lodos de esgoto, procedentes das três estações de tratamento, foram aplicados sobre a linha de plantio em uma faixa média de 30 cm de largura, com o auxílio de recipientes especialmente calibrados para que o material fosse distribuído ao longo da faixa de fertilização de forma homogênea.

Os lodos de esgoto da ETE de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo são oriundos de esgotos da grande região metropolitana de São Paulo com constituintes químicos e biológicos distintos entre si, além de serem condicionados por processos de tratamento diferenciados. Assim, os lodos procedentes das ETEs de Barueri e São Miguel foram condicionados com polieletrólito, ao passo que o lodo de esgoto da ETE Parque Novo Mundo foi condicionado com cal hidratada e cloreto férrico. As características químicas de cada lodo de esgoto são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização química dos lodos de esgoto das ETEs Parque Novo Mundo, São Miguel e Barueri utilizados como fertilizantes nos plantios de *Eucalyptus grandis* (continua)

Determinações	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	%	67,17	71,32	81,59
Matéria Orgânica Total	%	50,65	53,84	55,78
Matéria Orgânica Compostável	%	49,65	32,81	54,43
Carbono Total	%	28,14	29,92	31,02
Carbono Orgânico	%	27,57	18,24	30,26
Resíduo Mineral Total	%	49,35	46,16	44,22
Resíduo Mineral Insolúvel	%	8,83	4,53	19,93
Resíduo Mineral Solúvel	%	40,51	41,63	24,28
Nitrogênio Total	%	1,71	1,64	3,69
Fósforo (P ₂ O ₅) Total	%	2,89	2,48	4,45
Potássio (K ₂ O) Total	%	0,12	0,14	0,22
Cálcio (Ca) Total	%	11,24	10,84	2,77
Magnésio (Mg) Total	%	0,34	0,17	0,43
Enxofre (S) Total	%	0,61	0,66	0,65
Relação C/N (C total e N total)	-	16/1	18/1	8/1
Relação C/N (C orgânico e N total)	-	16/1	11/1	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

Tabela 3 - Caracterização química dos lodos de esgoto das ETEs Parque Novo Mundo, São Miguel e Barueri utilizados como fertilizantes nos plantios de *Eucalyptus grandis* (conclusão)

Determinações	Unidade	----- Estação de Tratamento de Esgoto -----		
		Parque N. Mundo	São Miguel	Barueri
Arsênio (As) Total	mg Kg ⁻¹	11	16	(nd)
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
Mercúrio (Hg) Total	mg Kg ⁻¹	1,00	3,00	0,18
Molibdênio (Mo) Total	mg Kg ⁻¹	20	15	(nd)
Níquel (Ni) Total	mg Kg ⁻¹	141	241	389
Selênio (Se) Total	mg Kg ⁻¹	1	1	(nd)

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.
 (nd) Não detectado.

Conforme constatado na tabela 3, os lodos de esgoto apresentam composições químicas diferentes entre si; conseqüentemente, as quantidades de nutrientes adicionadas ao solo com a aplicação de 15 Mg ha⁻¹ de cada lodo e com a fertilização mineral convencional foram distintas entre os tratamentos testados (Tabela 4).

Tabela 4 - Elementos aplicados ao solo nos tratamentos Testemunha, Fertilização Mineral e nos tratamentos adubados com os diferentes lodos de esgoto

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
	----- Kg ha ⁻¹ -----								
Fertilização Mineral	108	96	156	556	200	4,6	1,4	0,6	7,2
Lodo ETE Barueri	559	698	159	419	65	100,8	0,9	13,2	49,0
Lodo ETE São Miguel	252	402	147	1629	26	101,3	0,8	1,3	10,0
Lodo ETE Parque N. Mundo	263	464	144	1689	51	93,8	0,8	7,1	20,6
TRATAMENTO	Mn	Fe	Na	Cd	Pb	Cr	Ni	Mo	Hg
	----- Kg ha ⁻¹ -----								
Fertilização Mineral	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Lodo ETE Barueri	5,5	636	16,6	0,11	3,3	7,4	5,8	...	0,003
Lodo ETE São Miguel	4,9	523	34,9	0,03	0,5	0,7	3,6	0,2	0,045
Lodo ETE Parque N. Mundo	4,3	1239	13,2	0,07	1,1	7,9	2,1	0,3	0,015

Nota: Sinal convencional utilizado:
 ... dado numérico não disponível.

3.3 Coleta de dados

3.3.1 Crescimento e incremento volumétrico

Para estimar o crescimento e o volume de madeira produzido nos diferentes tratamentos, foram realizados inventários semestrais com a medição de altura e circunferência à altura do peito (CAP) dos eucaliptos existentes nas parcelas úteis. Para quantificar a altura foi utilizado o hipsômetro eletrônico modelo Vertex III; por sua vez, o CAP foi medido com fita métrica. Na determinação do volume individual das árvores foi adotada a equação $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times (CAP/\pi)^{1,9117} \times HT^{1,3065}$ obtida por Guedes (2005) em trabalho realizado na EECFI, onde também foi avaliado o crescimento do *Eucalyptus grandis* após aplicação de lodo de esgoto (biossólido).

3.3.2 Avaliação nutricional dos eucaliptos

A avaliação nutricional dos eucaliptos foi realizada aos 6, 18 e 42 meses pós-plantio das mudas no campo. Para isto, foram coletadas folhas do terço superior das copas de 8 árvores de cada parcela útil, conforme metodologia proposta por Bellote e Silva (2005). As folhas de cada parcela foram reunidas em uma amostra composta, que foi posteriormente processada e analisada quimicamente (Item 3.3.9).

3.3.3 Produção de folheto e transferência de nutrientes

Em cada parcela a produção de folheto foi determinada através da quantificação das folhas caducas dos eucaliptos, que foram coletadas mensalmente em 5 coletores distribuídos na parte central de cada parcela útil. Os coletores utilizados foram confeccionados com armação de madeira e fundo de tela tipo sombrite (50%), com superfície de 0,25 m² (50 cm x 50 cm) e suspensos a uma altura de 0,5 m acima do solo (Figura 2), conforme metodologia utilizada por Silva (2006).

As amostras simples de folheto retiradas mensalmente dos 5 coletores distribuídos em cada parcela útil, após determinação da biomassa seca, foram agrupadas em uma única amostra composta por parcela. Entretanto, para determinar a concentração mineral do folheto, as amostras compostas de folheto, coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos, foram agrupadas em dois períodos correspondentes a condições climáticas distintas, durante os quais se observou a ocorrência de “menor” precipitação (maio/07 a outubro/07) ou de “maior”

precipitação (de novembro/07 a abril/08). Assim, procurou-se comparar as características quantitativas (biomassa) e qualitativas (concentração mineral) do folheto produzido na época mais quente e chuvosa com as características do folheto produzido na época mais fria e seca do ano de estudo (Figura 1).



Figura 2 - Coletor utilizado para estimar a deposição de folheto dos eucaliptos nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos

Após a coleta, processamento e análise química das amostras, a quantidade de nutrientes (mineralomassa) transferida para o solo via deposição do folheto foi determinada pela eq. 1.

$$QNT = [] \text{ Nutriente} * BFD \quad (1)$$

onde:

QNT = Quantidade de nutriente transferido para o solo (Kg ha^{-1} ou g ha^{-1});

$[] \text{ Nutriente}$ = Concentração do nutriente no folheto produzido (g Kg^{-1} ou mg Kg^{-1});

BFD = Biomassa seca de folheto depositado (Kg ha^{-1}).

3.3.4 Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo

O folheto acumulado sobre o solo (folhas caducas constituintes da manta orgânica florestal) foi quantificado ao final de cada um dos períodos de “maior” e “menor” precipitação mencionados anteriormente; logo, as coletas foram realizadas no início dos meses de novembro/2007 e maio/2008. Para esta finalidade, utilizou-se uma moldura vazada de madeira com as dimensões 0,50 x 0,50 m, perfazendo uma área de coleta de $0,25 \text{ m}^2$; esta moldura foi alocada aleatoriamente dentro de cada parcela útil.

Durante a coleta, com auxílio de uma espátula e de um rastelo, retirou-se da superfície do solo (delimitada pela moldura vazada) o material vegetal constituído por folhas, galhos, frutos, sementes etc. (Figura 3). Em seguida este material passou por um processo de triagem de modo a separar as folhas caducas dos demais componentes da manta orgânica florestal.



Figura 3 – Local de coleta do folhedo acumulado antes e após a retirada de toda a manta orgânica do piso florestal, através da moldura vazada de madeira

Foram coletadas 4 amostras em cada parcela dos diferentes tratamentos, totalizando 16 amostras por tratamento. As amostras coletadas foram processadas e em seguida agrupadas por parcela para posterior análise química, visando determinar a concentração de nutrientes. Após análise química das amostras, a quantidade de nutrientes estocada no folhedo acumulado sobre o solo foi determinada pela eq. 2.

$$QNE = [] \text{ Nutriente } * BFA \quad (2)$$

onde:

QNE = Quantidade do nutriente estocado no folhedo acumulado sobre o solo (Kg ha^{-1} ou g ha^{-1});

$[] \text{ Nutriente}$ = Concentração do nutriente no folhedo acumulado (g Kg^{-1} ou mg Kg^{-1});

BFA = Biomassa seca de folhedo acumulado (Kg ha^{-1}).

3.3.5 Decomposição do folhedo e liberação de nutrientes

A decomposição do folhedo foi avaliada através de “bolsas de decomposição” que foram confeccionadas com tela de náilon (malha de 10 mm). Cada bolsa de decomposição foi preenchida com 10g de folhas caducas (Figura 4) retiradas dos coletores existentes nas

respectivas parcelas experimentais, propiciando assim a influência do tipo de tratamento (dos diferentes lodos de esgoto e da fertilização mineral) sobre a qualidade do folheto utilizado no estudo de decomposição. Antes de serem confinadas nas bolsas de decomposição, as folhas caducas foram secas em estufa de ventilação forçada a 60-65°C, até atingirem peso constante; além serem escolhidas por não apresentarem sinais de decomposição ou de ataque de insetos.



Figura 4 – Bolsas de decomposição inseridas sobre o solo entre os demais componentes da serapilheira

Portanto, foram preparadas 12 bolsas de decomposição por parcela, ou seja, 48 bolsas por tratamento. As bolsas foram distribuídas aleatoriamente sobre o solo dentro de cada parcela útil, no mês de novembro/2007, início do período de “maior” pluviosidade para o ano em estudo. Aos 3, 6 e 12 meses, contabilizados a partir da instalação das bolsas de decomposição no campo, foram coletadas quatro bolsas por parcela que, após limpeza com pincel para a retirada das partículas de solo aderidas à tela e ao material vegetal, foram secas em estufa, pesadas e submetidas á análise química para determinar a concentração dos nutrientes.

A quantidade de nutrientes devolvidos ao solo através da decomposição do folheto nos diferentes tratamentos foi determinada de acordo com a eq. 3.

$$QNL = \frac{[] \text{ Nutriente (REM.)} * BFR}{[] \text{ Nutriente (INI.)} * 10} * 100 \quad (3)$$

onde:

QNL = Quantidade do nutriente liberado pelo folheto contido na bolsa de decomposição (%);

$[] \text{ Nutriente (REM.)}$ = Concentração do nutriente no folheto remanescente (g Kg^{-1} ou mg Kg^{-1});

[] *Nutriente (INI.)* = Concentração do nutriente no folheto inicial (g Kg^{-1} ou mg Kg^{-1});

BFR = Biomassa seca do folheto remanescente (g).

3.3.6 Alterações da fertilidade do solo

Aos 36 meses após instalação do experimento, as alterações da fertilidade do solo em cada um dos tratamentos foram avaliadas através da coleta de amostras de terra em diferentes profundidades e posições. Dessa forma, devido à aplicação do lodo de esgoto ter sido realizada em uma faixa com largura aproximada de 30 cm ao longo da linha de plantio, a amostragem de solo foi realizada, nas respectivas unidades experimentais, da seguinte forma:

- a) **Sobre a linha de plantio:** foram coletadas amostras de terra nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, de modo a verificar a ação direta do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo nas linhas de plantio.
- b) **Entre as linhas de plantio:** foram coletadas amostras de terra na profundidade de 0-5 cm, visando averiguar a influência da transferência de nutrientes via folheto sobre a fertilidade do solo entre as linhas de plantio (entrelinhas).

Com relação às coletas de solo, foram retiradas aleatoriamente em cada parcela 4 amostras simples de terra nas linhas e nas entrelinhas de plantio. As amostras de terra, após misturadas, geraram uma amostra composta por parcela, a qual foi seca em estufa de ventilação forçada a uma temperatura de 40-45° C até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram peneiradas (malha de 2 mm), homogeneizadas e encaminhadas ao Laboratório de Ciências do solo da ESALQ/USP para determinações analíticas. O N-total foi determinado pelo método de micro-Kjedhal; o $P_{\text{(resina)}}$ por colorimetria; os elementos K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, Zn foram determinados por espectrometria de absorção atômica; o sulfato (SO_4^{2-}) por turbidimetria; matéria orgânica (M.O.) foi determinada por colorimetria; o potencial hidrogeniônico por potenciometria e o Al^{3+} por titulometria.

Os demais atributos do solo foram determinados de forma indireta, através dos seguintes cálculos: a soma de bases (SB) foi determinada através da soma ($\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$); a capacidade de troca catiônica (CTC) foi obtida através do cálculo $[\text{SB} + (\text{H} + \text{Al})]$; a saturação por bases (V%) foi obtida por $[(\text{SB}/\text{CTC}) * 100]$ e, por fim, a saturação pelo alumínio (m%) foi obtida pelo cálculo $[\text{Al}/(\text{SB} + \text{Al}) * 100]$.

3.3.7 Fitomassa e mineralomassa de raízes finas

Segundo Gonçalves e Mello (2005), a maioria das raízes finas dos eucaliptos, principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes, estão concentradas nos primeiros 30 cm de solo dependendo, fundamentalmente, da aeração e fertilidade do solo. Logo, aos 42 meses após a instalação do experimento, foram coletadas em cada parcela através de uma sonda de inox com 4 cm de diâmetro e 80 cm de altura (Figura 5) 30 amostras do conjunto "solo-raízes", na profundidade de 0-20 cm.



Figura 5 – Sistema de coleta das amostras de "solo-raízes" com sonda de inox, em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*

As 30 amostras simples de "solo-raízes", coletadas em cada parcela, foram agrupadas formando uma amostra composta, que em seguida foi lavada em água corrente sobre um sistema de peneiras conjugadas com tamanhos de 9 e 20 "mesh". Após a lavagem das amostras de "solo-raízes", as raízes remanescentes retidas nas peneiras foram encaminhadas ao laboratório da EECFI para serem processadas, visando determinar a biomassa e a concentração de nutrientes e

metais pesados.

No laboratório, as raízes foram banhadas sequencialmente em cinco bandejas contendo meios aquosos distintos: 1) Solução de água com detergente, para a solubilização e retirada das partículas grosseiras de solo; 2) Água destilada, para a retirada do detergente em excesso; 3) Solução de EDTA a 0,5%, para a retirada dos íons adsorvidos à superfície das raízes finas; 4) Água destilada, para a retirada do excesso de EDTA e do detergente. Após passarem pelo último recipiente com água destilada, as raízes finas foram secadas em estufa de ventilação forçada a 60-65°C. Após a secagem, foi constatado que outros tipos de materiais (ex. partícula de carvão) ainda permaneciam nas amostras de raízes finas; logo, este conjunto de materiais passou por um processo de triagem com pinça, para a separação das raízes finas (com diâmetro menor que 5 mm) dos demais materiais indesejáveis para a realização das análises. Feita a triagem, as raízes finas, livres de resíduos, foram submetidas à análise química conforme descrito no item 3.3.9.

3.3.8 Fitomassa e mineralomassa dos componentes do tronco

Aos 42 meses de idade dos eucaliptos, logo após o inventário florestal da área experimental, todas as árvores presentes nas parcelas úteis do experimento foram divididas em 20 grupos por classe de DAP. Ao mesmo tempo, as mesmas árvores foram desta vez divididas em 4 grupos por classe de DAP por tratamento. Toda esta sistemática de divisões das árvores em diferentes grupos por DAP foi precisamente efetuada para auxiliar na escolha das árvores que deveriam ser abatidas para a quantificação da fitomassa e mineralomassa dos componentes do tronco, de modo que todos os tratamentos fossem adequadamente amostrados.

Efetuada os diferentes agrupamentos de árvores, foi selecionada uma árvore por parcela com DAP pertencente a um dos 20 grupos da divisão geral (experimento) e, ao mesmo tempo, representante de um dos 4 grupos da divisão específica (tratamento). Este tipo de seleção foi efetuado para que se fosse ajustada apenas uma equação alométrica, para cada componente do tronco, capaz de representar toda a população de árvores do experimento e de estimar a biomassa de lenho e casca com certa precisão, primando pela particularidade de cada um dos tratamentos testados.

As árvores abatidas foram pesadas no campo através de balança digital com precisão de 0,1 Kg e com capacidade máxima de 60 Kg. A partir do ponto de corte da motosserra, foram retirados de cada árvore discos do tronco com aproximadamente 3 cm de espessura, a cada 2,0 m

de distância até a altura comercial (ponto onde o diâmetro mínimo é de 4 cm). Os discos coletados foram logo em seguida pesados para a obtenção do peso verde. Após a pesagem, cada disco foi separado em casca e lenho que, posteriormente, foram utilizados para determinação da umidade e para determinação das concentrações de macro e micronutrientes.

Após determinada a umidade média da casca e do lenho de cada árvore abatida, foram retiradas de cada disco de lenho 4 cunhas perpendiculares entre si. As cunhas obtidas foram agrupadas formando uma amostra composta representativa de cada parcela. Tanto as amostras compostas de casca quanto às de lenho foram processadas e analisadas quimicamente.

Efetuada a análise química das amostras, a quantidade de nutrientes estocada na casca e no lenho dos *E. grandis* foi determinada pela eq. 4.

$$QNECT = [] Nutriente * BCT \quad (4)$$

onde:

QNECT = Quantidade do nutriente estocado no componente do tronco (Kg ha⁻¹ ou g ha⁻¹);

[] *Nutriente* = Concentração do nutriente no componente do tronco (g Kg⁻¹ ou mg Kg⁻¹);

BCT = Biomassa seca do componente do tronco (g dm⁻³ de solo).

3.3.9 Processamento e análise química das amostras vegetais

Todas as amostras vegetais (folheto depositado, folheto acumulado, lenho, casca, raízes, etc.), depois de coletadas e preliminarmente preparadas, foram acondicionadas em sacos de papel previamente identificados com o código referente ao tipo de amostra, tratamento e período de coleta. Logo que acondicionadas nos invólucros, as amostras foram secadas em estufa de ventilação forçada a uma temperatura de 60 – 65°C até atingirem peso constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança eletrônica com precisão de 0,01 g, e posteriormente moídas em moinho tipo Willey. As raízes finas moídas foram acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados e posteriormente enviadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) do Departamento de Ciências Florestais da Esalq/USP para a análise das concentrações de macro e micronutrientes. No LEA, as amostras sofreram três diferentes tipos de digestão: digestão sulfúrica, para a determinação do nitrogênio; digestão a seco, para a determinação do boro e digestão perclórica para os demais elementos. Após a digestão das amostras, cada nutriente foi determinado da seguinte forma: o N foi determinado pelo método de

micro-Kjedhal; os elementos P e B foram determinados por colorimetria; o potássio por fotometria de chama, o enxofre por turbidimetria e os elementos Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Parte das amostras previamente preparadas para avaliação nutricional de lenho, casca, raízes finas e folhas foram encaminhadas ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para serem analisadas quanto às concentrações dos metais pesados: cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e níquel (Ni), de acordo com o método empregado pela Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency-EPA) dos Estados Unidos da América, com determinação por espectrometria de emissão atômica com indutor de argônio acoplado ICP-AES.

3.4 Análise estatística dos dados

Inicialmente, foi realizada a análise exploratória dos dados objetivando averiguar as pressuposições básicas e necessárias para as demais análises estatísticas subseqüentes, além de verificar a necessidade de transformação de dados ou de análises não paramétricas. Após a análise exploratória, os dados foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, comparados estatisticamente entre si através do teste de Tukey com nível de significância de 5%. As análises dos dados foram realizadas através do software estatístico SAS 9.1 for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003).

A constante de decomposição (eq. 5) e o tempo de meia vida (eq. 6) do folhedo acumulado sobre o solo das diferentes parcelas experimentais foram estimados através de das equações propostas por Olson (1963):

$$K = \frac{L}{X_{ss}} \quad (5)$$

onde:

K = Constante de decomposição para situações de equilíbrio dinâmico;

L = Quantidade de folhedo produzido anualmente (Kg ha^{-1});

X_{ss} = Média anual de folhedo acumulado sobre o solo (Kg ha^{-1}).

$$T_{0,5} = -\ln \frac{0,5}{K} \quad (6)$$

onde:

$T_{0,5}$ = Tempo estimado para que 50% do folheto seja decomposto em anos,

K = constante de decomposição para situações de equilíbrio dinâmico.

Ao mesmo tempo em que foram utilizadas as equações propostas por Olson (1963), a constante de decomposição (K) e o tempo de meia vida ($T_{0,5}$) também foram estimados através de regressão exponencial negativa, visto que o modelo matemático obtido com este tipo de regressão representa o modelo global de decomposição apresentado por Shanks e Olson (1961).

Para a estimativa de fitomassa dos componentes do tronco (casca e lenho – item 3.3.8) foram ajustadas equações alométricas através de regressão linear entre o CAP² (variável independente) e a biomassa seca dos componentes do tronco (variável dependente).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variações climáticas durante o período de estudo

Durante os dois anos estudo, (maio/2007 a abril/2008) e (maio/2008 a abril/2009), a temperatura média e a distribuição das chuvas ao longo dos meses (Figura 6) foi similar ao padrão apresentado pela normal da cidade de Itatinga-SP (Figura 1).

Os períodos de menor precipitação ocorreram entre os meses de maio a outubro, tanto no ANO 1 (precipitação_{total} = 296,8 mm) quanto no ANO 2 (precipitação_{total} = 466,9mm). Os períodos de maior precipitação ocorreram entre os meses de novembro a abril do ANO 1 (precipitação_{total} = 1056,1 mm) e também do ANO 2 (precipitação_{total} = 827,3 mm) (Figura 6).

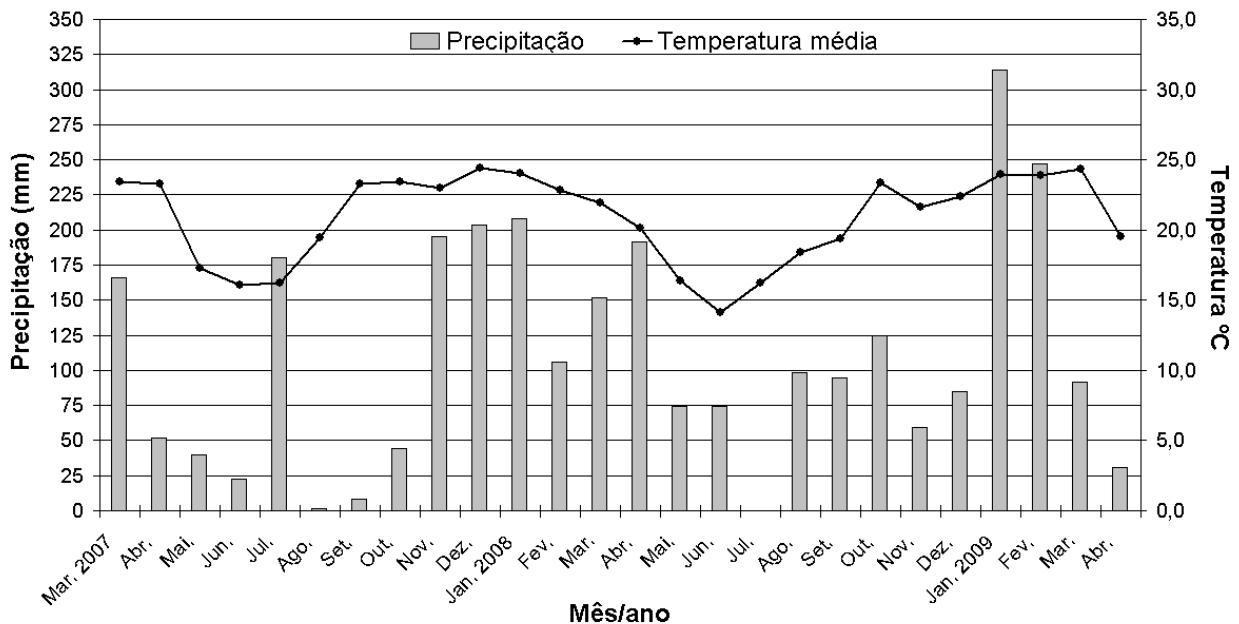


Figura 6 – Precipitação e temperaturas médias mensais observadas entre os meses de maio/2007 a abril/2009, durante o período de estudo na área experimental da EECFI

A análise prévia das normais de precipitação e temperatura média mensal do município de Itatinga-SP, juntamente com a análise exploratória dos dados climáticos observados durante os dois anos de estudo, comprovaram a existência de dois períodos climáticos consideravelmente distintos entre si, sendo eles: “Período de maior precipitação e temperaturas mais elevadas” e “Período de menor precipitação e temperaturas mais baixas”. Segundo Bellote e Silva (2005), as flutuações climáticas sazonais, além de afetar diretamente o crescimento e a fenologia, são as que

mais influenciam as variações da concentração de nutrientes nas folhas, galhos, lenha e demais componentes das árvores. Logo, os agrupamentos das amostras vegetais para a análise química e quantificação dos nutrientes, de acordo com os períodos de maior e menor precipitação, foram realizados de forma correta e com considerável precisão.

4.2 Crescimento e incremento volumétrico

A circunferência à altura do peito (CAP), a altura e o volume de madeira das árvores de *Eucalyptus grandis* adubadas com os diferentes lodos de esgoto foram, em todas as idades, significativamente superiores em comparação ao tratamento testemunha (Tabela 5), comprovando a ausência de efeitos prejudiciais do lodo de esgoto sobre o crescimento dos eucaliptos. Silva et al. (2008a), ao estudarem o crescimento de *E. grandis*, tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado), também verificaram que a altura dos eucaliptos adubados com lodo foi superior à do tratamento testemunha e semelhante à do tratamento com adubo mineral.

Neste trabalho, a maior altura dos eucaliptos foi verificada no tratamento com lodo de esgoto da ETE de Barueri-SP (LB), sendo que a diferença entre a altura dos eucaliptos adubados com o LB em relação aos eucaliptos do tratamento testemunha foi de aproximadamente 50%, aos 24 meses de idade e de 20%, aos 48 meses de idade; todavia, quando comparada aos eucaliptos adubados exclusivamente com fertilizante mineral (FM), a altura dos eucaliptos no tratamento com LB foi superior em 9% aos 24 meses de idade, mas apenas em 2% aos 48 meses de idade, sem diferença significativa.

O maior crescimento das árvores adubadas com o lodo de Barueri (LB) pode ter contribuído para a rápida cobertura do solo, principalmente em virtude da acentuada expansão da superfície foliar dos eucaliptos. Segundo Gonçalves et al. (2000), ainda que não resulte em elevações na produtividade de madeira no fim do ciclo de produção. Este maior crescimento inicial das árvores, causado principalmente pelo aumento da disponibilidade de N contido no lodo de esgoto é muito desejável, pois reduz os custos de controle das plantas invasoras.

Tabela 5 - Circunferência à altura do peito (CAP), altura, volume de madeira e incremento corrente semestral (ICS*), entre 24 e 48 meses de idade dos eucaliptos nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	CAP (cm)	Altura (m)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	*ICS (m ³ ha ⁻¹ semestre ⁻¹)
IDADE de 24 meses				
Testemunha	19,3 c	8,4 c	14,5 c	...
Fertilização mineral	27,0 ab	11,8 b	43,3 b	...
Lodo Barueri	28,3 a	12,9 a	53,2 a	...
Lodo São Miguel	26,3 b	11,8 b	41,2 b	...
Lodo Parque N. Mundo	26,2 b	11,4 b	39,2 b	...
IDADE de 30 meses				
Testemunha	22,7 d	10,4 d	25,8 d	11,4 c
Fertilização mineral	30,3 ab	13,7 b	65,2 ab	21,8 a
Lodo Barueri	30,8 a	14,4 a	71,8 a	18,5 b
Lodo São Miguel	29,0 bc	13,3 bc	58,1 bc	16,8 b
Lodo Parque N. Mundo	28,6 c	13,2 c	55,6 c	16,5 b
IDADE de 36 meses				
Testemunha	25,7 c	11,9 d	40,6 d	13,3 c
Fertilização mineral	32,6 a	15,2 b	86,8 ab	20,9 a
Lodo Barueri	32,8 a	15,8 a	92,7 a	20,5 a
Lodo São Miguel	31,5 ab	15,0 b	80,5 bc	20,7 a
Lodo Parque N. Mundo	30,9 b	14,4 c	73,6 c	16,3 b
IDADE de 42 meses				
Testemunha	28,3 c	13,2 d	53,8 c	14,5 b
Fertilização mineral	34,7 a	16,0 b	104,6 a	18,0 a
Lodo Barueri	34,6 ab	16,5 a	107,2 a	15,1 b
Lodo São Miguel	33,5 ab	15,9 b	96,4 ab	16,5 ab
Lodo Parque N. Mundo	32,9 b	15,3 c	88,1 b	15,0 b
IDADE de 48 meses				
Testemunha	29,6 c	14,1 d	66,3 c	9,7 c
Fertilização mineral	35,8 a	16,8 ab	118,6 a	13,2 a
Lodo Barueri	35,7 a	17,2 a	122,0 a	12,0 ab
Lodo São Miguel	34,7 ab	16,6 b	110,0 ab	11,3 ab
Lodo Parque N. Mundo	33,7 b	15,9 c	99,2 b	9,9 bc

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

* ICS – Incremento Corrente Semestral. Utiliza-se em silvicultura usualmente o Incremento Corrente Anual; todavia, como nesta pesquisa o inventário das parcelas experimentais foi realizado semestralmente, julgou-se oportuno aproveitar os resultados para evidenciar a progressiva redução no incremento dos eucaliptos ao longo do tempo.

Sinais convencionais utilizados:

... Dado numérico não disponível

Os tratamentos adubados com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral proporcionaram árvores com CAP semelhantes entre si e superiores às árvores do tratamento testemunha (T), com diferenças que variam entre 15% a 50%. Kimberley et al. (2004), ao estudarem os efeitos de diferentes doses de bio sólido (lodo de esgoto) no crescimento de *Pinus radiata* (com 11 anos de idade), verificaram que os DAPs (diâmetros a altura do peito) das árvores adubadas com bio sólido foram superiores às árvores do tratamento controle em cerca de 20%.

Em concordância com os dados de altura e CAP, o tratamento com o LB proporcionou o maior volume de madeira estimado por hectare; todavia, o resultado foi similar em quase todas as idades ao do tratamento com o LSM e com o fertilizante mineral (Tabela 5). Esses tratamentos proporcionaram aos 48 meses de idade o dobro de volume de madeira em relação ao tratamento testemunha ($66,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Isto demonstra a possibilidade de se utilizar o lodo de esgoto em plantações de *Eucalyptus* para a substituição total ou parcial da fertilização mineral, usualmente aplicada pelas empresas florestais no estado de São Paulo. Os resultados obtidos estão em consonância com os descritos por Poggiani, Silva e Guedes (2006), que testaram a aplicação do lodo de esgoto numa rede experimental com espécies do gênero *Eucalyptus* em ensaios de campo localizados em várias regiões do estado de São Paulo.

A redução da diferença entre o crescimento dos eucaliptos ao longo do tempo submetidos aos diferentes tratamentos, que pode ser constatada nos valores de incremento volumétrico semestral (ICS) apresentados na tabela 5, pode estar relacionada à maior competição, que se estabelece gradualmente ao longo do tempo entre as árvores por luz e disponibilidade de água no solo. Segundo Poggiani, Silva e Guedes (2006), em plantios de eucaliptos, a competição por luz começa a afetar o crescimento das árvores a partir do fechamento das copas. Por outro lado, com o fechamento das copas torna-se mais importante, do ponto de vista fisiológico, o papel do ciclo biogeoquímico no suprimento dos nutrientes necessários ao crescimento das árvores, que passam a depender cada vez menos da retirada dos nutrientes do solo. Assim Gonçalves et al. (2005) justificam a pequena resposta das plantações de eucalipto à fertilização mineral, quando aplicada tardiamente, após o fechamento das copas.

O incremento médio anual (IMA), avaliado aos 48 meses de idade dos eucaliptos, foi de aproximadamente $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos tratamentos com os lodos das ETEs de Barueri e São Miguel, bem como no tratamento com fertilizante mineral. Estes valores de IMA foram

superiores aos obtidos no tratamento adubado com o lodo de esgoto da ETE Parque Novo Mundo ($25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e também ao IMA observado no tratamento testemunha ($17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Por sua vez, Silva et al. (2008a) observaram em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* adubadas com diferentes doses de lodo de esgoto úmido ou seco, aos 3 anos de idade, que o Incremento Médio Anual (IMA) variou entre $35,7$ e $44,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

4.3 Fitomassa e mineralomassa dos componentes do tronco

A estimativa da fitomassa dos componentes do tronco (Lenho e Casca) foi estabelecida através da relação alométrica entre a circunferência a altura do peito (CAP) e a biomassa dos componentes do tronco das árvores amostradas em cada um dos tratamentos. Desta forma, foram ajustadas equações matemáticas específicas para cada componente do tronco por meio de regressão linear (Figura 7).

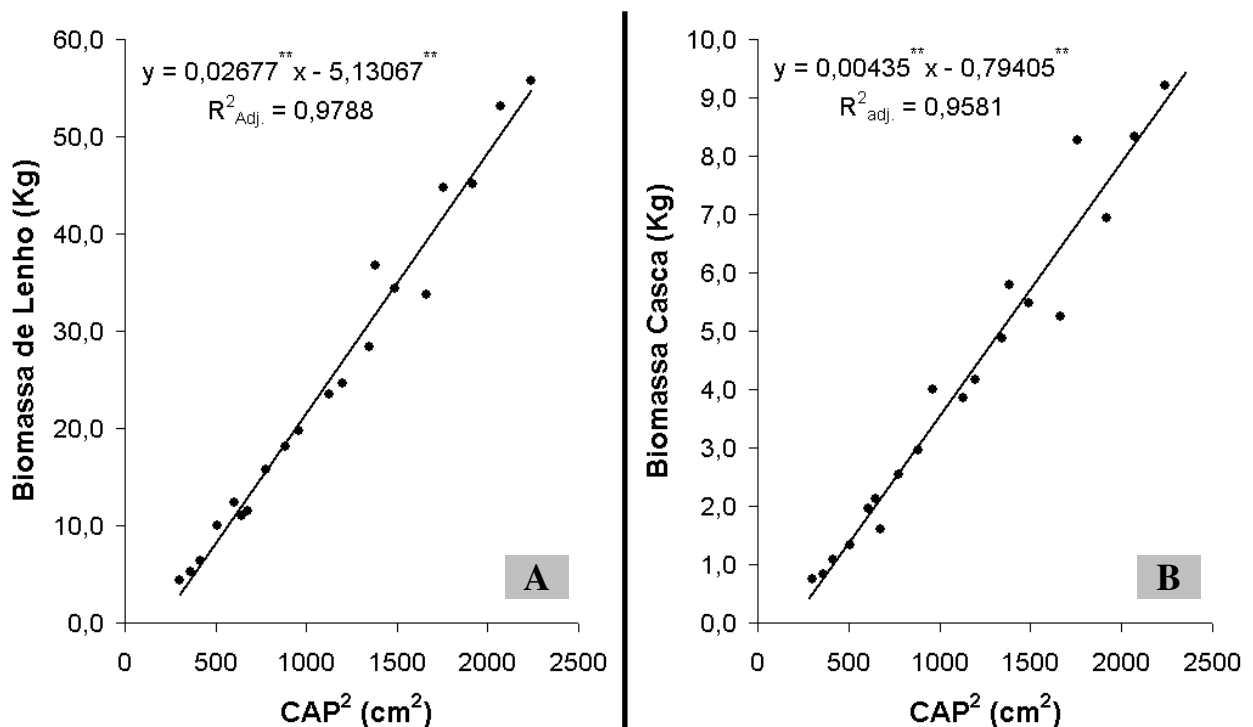


Figura 7 - Regressões lineares estabelecidas através da relação entre o CAP² e a biomassa seca de lenho (A) e casca (B) das árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, nos diferentes tratamentos

Os tratamentos adubados com os lodos da ETE de Barueri, ETE São Miguel e com a aplicação da fertilização mineral propiciaram a produção de uma maior quantidade de fitomassa

de lenho e de casca por parte dos eucaliptos. Por outro lado, no tratamento testemunha observou-se uma menor produção de biomassa lenhosa (Figura 8).

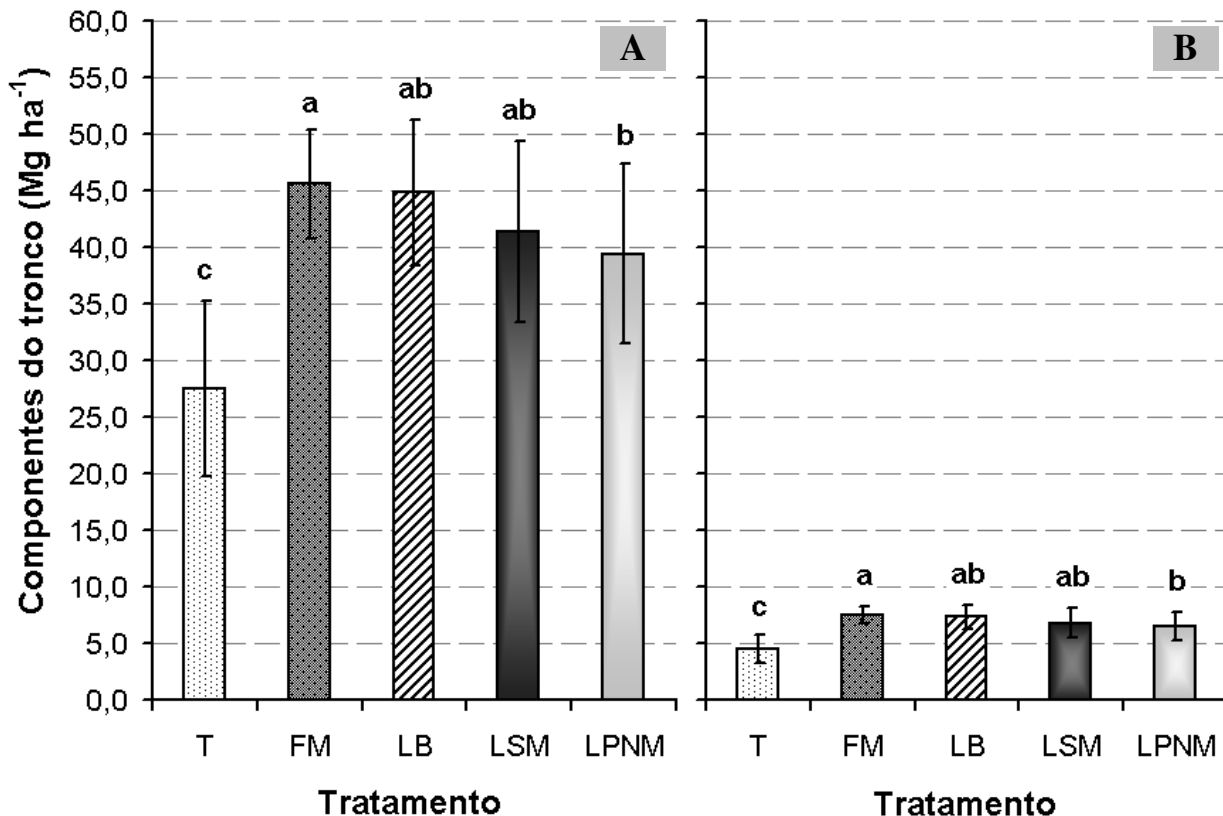


Figura 8 - Fitomassa seca de lenho (A) e de casca (B) de *Eucalyptus grandis* nos tratamentos Testemunha (T), Fertilização Mineral (FM), Lodo ETE Barueri (LB), Lodo ETE São Miguel (LSM) e Lodo ETE Parque Novo Mundo (LPNM), aos 42 meses de idade

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

Considerando a fitomassa acumulada nos troncos com casca (Lenho+Casca) nos tratamentos com LB e LSM e no tratamento com fertilizante mineral observa-se que girou ao redor de 50 Mg ha^{-1} ; ou seja, um incremento médio anual de $14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Guedes (2005), ao estudar a ciclagem de nutrientes após a aplicação de lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*, verificou que a fitomassa de tronco com casca acumulada em cinco anos foi de aproximadamente 95 Mg ha^{-1} , o que resultou num incremento médio anual de $19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As concentrações dos nutrientes nos compartimentos do tronco (Lenho e Casca) nos diferentes tratamentos são expressas na tabela 6. No lenho, as concentrações da maioria dos nutrientes analisados foram similares em todos os tratamentos, mas sempre inferiores às concentrações dos

mesmos nutrientes estocados na casca dos eucaliptos.

Tabela 6 - Concentração de macro e micronutrientes nos compartimentos do tronco (Lenho e Casca) de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g Kg ⁻¹ -----					
LENHO						
Testemunha	1,5 a	0,2 a	0,6 a	0,2 b	0,1 a	0,2 a
Fertilização mineral	1,5 a	0,2 a	0,6 a	0,3 b	0,1 a	0,2 a
Lodo Barueri	1,4 a	0,3 a	0,5 ab	0,3 b	0,1 a	0,1 a
Lodo São Miguel	1,4 a	0,3 a	0,4 b	0,4 a	0,1 a	0,1 a
Lodo Parque N. Mundo	1,4 a	0,3 a	0,5 ab	0,5 a	0,1 a	0,2 a
CASCA						
Testemunha	3,1 b	0,3 b	2,3 a	5,3 c	0,8 b	0,3 a
Fertilização mineral	3,4 ab	0,3 b	2,0 a	7,5 bc	2,2 a	0,3 a
Lodo Barueri	3,6 a	0,6 a	2,1 a	6,9 bc	0,9 b	0,3 a
Lodo São Miguel	3,9 a	0,5 a	2,0 a	12,1 ab	0,8 b	0,3 a
Lodo Parque N. Mundo	3,8 a	0,5 a	2,6 a	15,3 a	1,0 b	0,3 a
TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	----- mg Kg ⁻¹ -----					
LENHO						
Testemunha	3 a	2 a	20 a	32 a	7 ab	
Fertilização mineral	3 a	2 a	9 a	22 b	3 b	
Lodo Barueri	4 a	2 a	10 a	22 b	8 a	
Lodo São Miguel	4 a	2 a	10 a	22 b	4 b	
Lodo Parque N. Mundo	4 a	2 a	11 a	14 c	3 b	
CASCA						
Testemunha	10 ab	4 b	61 a	372 a	5 b	
Fertilização mineral	12 a	5 ab	66 a	380 a	6 b	
Lodo Barueri	10 ab	8 a	68 a	349 a	14 a	
Lodo São Miguel	11 ab	7 a	95 a	217 a	7 b	
Lodo Parque N. Mundo	9 b	5 ab	75 a	286 a	8 b	

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

Quanto aos macronutrientes são pequenas as variações observadas em sua concentração (Tabela 6), principalmente no lenho do tronco, devido ao “efeito de diluição” dos elementos na biomassa das árvores em crescimento, atribuída principalmente ao ciclo bioquímico, através do qual se processa a redistribuição dos nutrientes dentro da própria planta. Nota-se que o cálcio dobrou sua concentração na casca dos eucaliptos tratados com LSM e LPNM devido à grande quantidade de cálcio adicionada ao solo pela aplicação do lodo de esgoto gerado nestas duas estações. Observa-se ainda na tabela 6, que a concentração de fósforo é mais elevada na casca dos eucaliptos tratados com LB, LSM e LPNM, em virtude do elevado teor deste elemento em todos os lodos aplicados. O magnésio dobrou sua concentração na casca dos eucaliptos no tratamento com fertilização mineral, em virtude da aplicação prévia de calcáreo. Esta prática é usual em plantios comerciais, visando à correção da acidez do solo.

Os eucaliptos adubados exclusivamente com fertilizante mineral foram os que apresentaram a maior concentração de magnésio (Mg) na casca; chegando a ser o dobro da concentração verificada nos demais tratamentos testados. Esta diferença entre as concentrações de Mg na casca deve-se provavelmente a calagem com calcário dolomítico efetuada no tratamento com fertilização mineral, que adicionou ao solo cerca de 3 a 4 vezes mais magnésio quando comparado aos tratamentos com lodo de esgoto.

Quanto aos micronutrientes, o tratamento testemunha foi o que proporcionou maior concentração de manganês (Mn) no lenho quando comparado aos demais tratamentos; diferentemente do tratamento adubado com o LPNM, cuja concentração de Mn foi de 36% a 56% inferior aos demais tratamentos. Muito provavelmente este resultado possa ser explicado pelo pH mais elevado (8,2) do lodo de esgoto aplicado ao solo procedente da ETE Parque N. Mundo; pois, segundo Dechen e Nachtigal (2006), os principais fatores do solo que determinam à disponibilidade de Mn são o pH, as condições de oxidorredução e os teores de matéria orgânica. Esses autores afirmam ainda que os valores de pH superior a 5,5 favorecem a oxidação do Mn por ação biológica diminuindo sua disponibilidade no solo e, conseqüentemente, para a absorção pelas plantas.

Por sua vez, a concentração de Zn na casca dos eucaliptos adubados com o LB foi cerca de três vezes maior que a concentração de Zn no tratamento testemunha e aproximadamente duas vezes maior que a concentração de Zn nos demais tratamentos testados. Neste sentido, observa-se na tabela 3, que a concentração de zinco no LB é de 3.026 mg Kg^{-1} , portanto, várias vezes

superior à concentração deste elemento nos demais lodos utilizados no experimento.

As concentrações dos metais pesados cádmio (Cd), cromo (Cr) e chumbo (Pb) estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado, indicando que se presente no lenho ou na casca dos eucaliptos, em cada um dos tratamentos testados, o Cd encontra-se em concentração inferior a $0,005 \text{ mg kg}^{-1}$; o Cr em concentração inferior a $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ e o Pb em concentração inferior a $0,0025 \text{ mg kg}^{-1}$.

As concentrações de níquel (Ni) no lenho dos diferentes tratamentos testados também se encontraram abaixo do limite de determinação do método analítico ($0,025 \text{ mg kg}^{-1}$); contudo, a concentração de Ni na casca do tratamento adubado com o lodo de esgoto da ETE de Barueri foi de $1,02 \text{ mg kg}^{-1}$, diferente dos demais tratamentos que não apresentaram concentrações de níquel acima do nível de detecção do equipamento analítico utilizado.

Os estoques de macro e micronutrientes nos componentes do tronco (Lenho e Casca) dos eucaliptos nos diferentes tratamentos podem ser observados na tabela 7. É importante ressaltar que o acúmulo de nutrientes na biomassa arbórea varia de elemento para elemento, em função das características nutricionais de cada espécie, dos diferentes níveis de fertilidade do solo, da formulação do adubo aplicado e da idade da floresta (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993).

Na maioria dos casos, o tratamento testemunha apresentou os menores estoques de nutrientes, tanto na casca quanto no lenho, com exceção dos elementos enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn).

Em relação ao cálcio, os eucaliptos adubados com o lodo de esgoto da ETE de Parque Novo Mundo (LPNM) apresentaram o maior estoque de cálcio no lenho, sendo $14,0 \text{ Kg ha}^{-1}$ superior ao tratamento testemunha e $4,0 \text{ Kg ha}^{-1}$ superior ao tratamento com fertilização mineral. Por sua vez, o estoque de cálcio na casca dos eucaliptos do tratamento adubado com o LPNM foi de 97 Kg ha^{-1} de Ca; ou seja, aproximadamente 75 Kg ha^{-1} de cálcio a mais que no tratamento testemunha e superior em 42 Kg ha^{-1} ao tratamento com fertilização mineral. Resultados similares foram obtidos por Guedes (2005), que verificou nos tratamentos adubados com de lodo de esgoto (condicionado com cal) estoques de cálcio na casca que variaram, de acordo com as doses do lodo aplicadas, entre 75 a 115 Kg ha^{-1} .

No tratamento com fertilização mineral, devido à prática da calagem prévia, os eucaliptos apresentaram na casca maior estoque de magnésio comparado aos demais tratamentos, com aproximadamente 13 Kg ha^{-1} a mais que o tratamento testemunha e 11 Kg ha^{-1} superior ao menor

estoque de magnésio observado entre os tratamentos com lodo de esgoto.

Tabela 7 - Estoque de macro e micronutrientes nos compartimentos do tronco (Lenho e Casca) de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- Kg ha ⁻¹ -----					
LENHO						
Testemunha	43,4 c	5,4 d	17,1 c	5,2 d	2,8 c	5,3 c
Fertilização mineral	69,3 a	9,1 c	27,7 a	13,5 c	4,6 a	9,0 a
Lodo Barueri	64,1 ab	13,3 a	22,9 b	13,1 c	4,5 ab	4,4 d
Lodo São Miguel	59,8 b	12,3 ab	17,1 c	16,0 b	4,1 ab	4,0 d
Lodo Parque N. Mundo	57,0 b	11,7 b	20,4 b	19,2 a	3,9 b	7,7 b
CASCA						
Testemunha	14,1 b	1,3 d	10,4 c	22,8 d	3,5 d	1,4 c
Fertilização mineral	25,4 a	2,2 c	14,9 ab	55,3 c	16,3 a	2,2 a
Lodo Barueri	26,5 a	4,3 a	15,4 ab	49,6 c	6,5 b	2,2 ab
Lodo São Miguel	26,5 a	3,3 b	13,6 b	79,5 b	5,3 c	2,0 ab
Lodo Parque N. Mundo	24,6 a	3,2 b	16,8 a	96,8 a	6,3 b	1,9 b
TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	----- g ha ⁻¹ -----					
LENHO						
Testemunha	93,6 b	63,3 c	516,5 a	843,2 b	195,2 b	
Fertilização mineral	155,0 a	91,2 a	429,1 b	1002,8 a	148,3 c	
Lodo Barueri	156,9 a	80,7 ab	423,9 b	978,9 a	363,6 a	
Lodo São Miguel	157,3 a	82,8 a	408,8 b	912,9 ab	160,0 c	
Lodo Parque N. Mundo	165,5 a	70,9 bc	431,2 b	529,9 c	106,5 d	
CASCA						
Testemunha	44,1 d	20,1 e	274,2 c	1689,5 bc	24,1 d	
Fertilização mineral	85,2 a	39,4 c	488,1 b	2840,0 a	48,1 b	
Lodo Barueri	71,3 b	53,3 a	493,4 b	2562,3 a	100,8 a	
Lodo São Miguel	71,3 b	47,1 b	638,6 a	1473,0 c	48,5 b	
Lodo Parque N. Mundo	59,6 c	33,9 d	483,3 b	1853,3 b	39,9 c	

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

Quanto aos micronutrientes, pode-se observar que o estoque de zinco na casca e no lenho dos eucaliptos adubados com o LB foi significativamente superior aos estoques de Zn nos demais tratamentos, devido à elevada concentração de Zn no lodo da ETE Barueri. Em relação aos metais pesados na biomassa aérea dos eucaliptos, verificou-se que, devido à baixa concentração destes elementos nos componentes das árvores (geralmente inferior ao limite de determinação do método analítico), seus estoques podem ser considerados insignificantes na biomassa dos eucaliptos. Apenas o estoque de níquel na casca dos eucaliptos adubados com o lodo de esgoto da ETE de Barueri evidenciou um valor próximo a $6,4 \text{ g ha}^{-1}$ e, portanto, não preocupante, quanto à possível geração de qualquer impacto ambiental.

Através deste estudo ficou evidente, portanto, que os eucaliptos adubados com lodos gerados nas diferentes estações de tratamento de esgoto (ETEs) da região metropolitana de São Paulo apresentam diferenças quanto à quantidade de nutrientes estocados no tronco das árvores, bem como em relação à partição dos elementos em seus componentes: lenho e casca. Neste sentido, a quantificação dos nutrientes estocados nos diferentes compartimentos deve servir de orientação nas atividades de colheita florestal, assegurando a manutenção do equilíbrio nutricional principalmente das florestas de produção (REIS; BARROS, 1990).

4.4 Avaliação nutricional dos eucaliptos

Na tabela 8 são apresentadas as concentrações foliares dos macronutrientes nas árvores de *Eucalyptus grandis* referentes a cada tratamento e período avaliado. Os tratamentos que receberam a aplicação do lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs, independentemente da origem, apresentaram, aos 6 meses de idade, concentrações de N (concentração média = $33,3 \text{ g Kg}^{-1}$) e P (concentração média = $1,5 \text{ g Kg}^{-1}$) significativamente superiores aos demais tratamentos. Guedes e Poggiani (2003) estudaram a variação da concentração de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com doses crescentes de biossólido (lodo de esgoto) produzido na ETE de Barueri e verificaram, no período de 6 a 20 meses de idade, concentrações mais elevadas de N foliar em relação à testemunha nas árvores adubadas com biossólido a partir da dose de 10 Mg ha^{-1} .

Segundo Kriedemann e Cromer (1996), as concentrações de nitrogênio nas folhas de *Eucalyptus grandis* são freqüentemente relacionadas com o crescimento das árvores. São, portanto, utilizadas como parâmetro na área de ecofisiologia para a modelagem do crescimento

de plantações florestais em estágio avançado de desenvolvimento, onde os efeitos do nitrogênio na expansão da copa se fazem perceber pelos efeitos sobre a taxa fotossintética dos eucaliptos.

Tabela 8 - Concentração de macronutrientes nas folhas dos *Eucalyptus grandis* em diferentes idades nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g Kg ⁻¹ -----					
IDADE de 6 meses						
Testemunha	23,6 b	0,8 c	6,0 a	3,9 d	1,8 c	0,9 c
Fertilização mineral	23,1 b	1,0 c	6,1 a	5,1 c	3,1 a	1,0 bc
Lodo Barueri	34,9 a	1,6 a	5,4 a	6,1 b	2,3 b	1,6 ab
Lodo São Miguel	33,2 a	1,5 a	4,6 a	5,8 bc	2,1 bc	1,7 a
Lodo Parque N. Mundo	31,9 a	1,3 b	5,4 a	9,5 a	2,3 bc	1,2 abc
IDADE de 18 meses						
Testemunha	20,4 a	1,1 b	3,7 a	5,0 b	2,2 b	0,6 b
Fertilização mineral	21,2 a	1,1 b	3,3 ab	4,7 b	3,2 a	0,4 c
Lodo Barueri	20,5 a	1,2 ab	2,9 b	5,5 b	2,2 bc	0,4 c
Lodo São Miguel	21,8 a	1,6 a	3,4 ab	6,7 a	2,1 bc	0,8 a
Lodo Parque N. Mundo	21,9 a	1,2 ab	3,3 ab	7,8 a	2,0 c	0,6 b
IDADE de 42 meses						
Testemunha	18,2 ab	1,0 bc	3,3 a	2,6 d	1,3 b	0,7 a
Fertilização mineral	16,2 b	0,9 c	2,2 b	3,2 cd	2,5 a	0,6 a
Lodo Barueri	17,7 ab	1,1 ab	2,8 ab	3,5 bc	1,6 b	0,6 a
Lodo São Miguel	16,5 b	0,9 bc	2,4 b	4,3 b	1,2 b	0,7 a
Lodo Parque N. Mundo	19,0 a	1,1 a	2,7 ab	6,8 a	1,5 b	0,6 a

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

A maior concentração foliar de N e P constada aos 6 meses de idade nos eucaliptos adubados com lodo de esgoto (Tabela 8) pode estar relacionada inicialmente à grande quantidade de N e P adicionada ao solo nestes tratamentos, bem como à gradual mineralização desses elementos presentes na matéria orgânica. Todavia, aos 18 e 42 meses de idade, as concentrações de N e P nas folhas dos eucaliptos apresentaram valores semelhantes em todos os tratamentos, mas geralmente inferiores aos observados aos 6 meses de idade. Rocha, Gonçalves e Moura (2004), ao estudarem a aplicação de lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*, verificaram aos 24 meses de idade, teores foliares de N menores aos que foram observados aos 6

meses de idade. Estes pesquisadores atribuíram como possíveis causas deste fenômeno: (a) diluição das quantidades de N numa maior biomassa das árvores; (b) queda da disponibilidade de N no solo ao longo do tempo; (c) diminuição da demanda de N pela árvore, devido ao fechamento de copas e à queda do metabolismo foliar ocasionada por maior competição entre as folhas das copas; (d) retranslocação interna de N das folhas maduras para folhas em fase ativa de crescimento.

Com relação ao fósforo, observa-se que sua concentração nas folhas se apresenta geralmente mais elevada nos tratamentos com lodo de esgoto do que no tratamento com fertilizante mineral. Isto pode ser atribuído à rápida fixação do P mineral pelos colóides de argila do solo, tornando rapidamente indisponível este elemento para o sistema radicular das plantas (SILVA, 2006).

A elevada mobilidade do potássio dentro da planta, atribuída à sua presença na forma iônica e à alta permeabilidade das membranas celulares a este elemento, faz com que o K seja facilmente distribuído nos diferentes compartimentos da árvore (folhas, galhos, casca, etc.) (MILLS; JONES Jr., 1996). Com o crescimento das árvores, principalmente quando cultivadas em solos de baixa fertilidade, a importância da ciclagem de nutrientes e mais especificamente da ciclagem bioquímica do potássio tende a se tornar mais efetiva do que a própria absorção deste elemento do solo (PRITCHETT, 1979). Isto pode acarretar como consequência a menor concentração de K nas folhas, devido à diluição deste elemento na biomassa das árvores, o que explica a concentração decrescente do K observada ao longo do tempo nos eucaliptos, independentemente dos tratamentos.

Outros dois macronutrientes que se destacaram bastante na nutrição dos eucaliptos foram o cálcio e o magnésio. Os eucaliptos adubados com lodo de esgoto da ETE de Parque Novo Mundo (LPNM) apresentaram, em todas as idades, a maior concentração foliar de cálcio (concentração média = $8,0 \text{ g Kg}^{-1}$) quando comparada aos demais tratamentos. Guedes e Poggiani (2003) também verificaram altas concentrações foliares de cálcio (concentração média = $11,6 \text{ g Kg}^{-1}$) nos eucaliptos adubados com 15 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto, que também foi condicionado com cal.

Observa-se na Tabela 8, que apesar de ser quase equivalente a quantidade de cálcio adicionada ao solo dos tratamentos LSM e LPNM, através da aplicação dos respectivos lodos (conforme Tabela 4), os efeitos sobre as concentrações foliares de Ca foram mais acentuados no

tratamento LPNM. O resultado pode ser decorrente das fontes diferentes de cálcio presentes em cada lodo, visto que no LPNM o cálcio provém da cal hidratada (CaOH), utilizada na ETE para o seu condicionamento, ao passo que no LSM o cálcio provém do sulfato de cálcio (CaSO₄) introduzido pelo lançamento de efluentes industriais despejados no esgoto juntamente com os efluentes domésticos da região de São Miguel.

Os eucaliptos adubados com fertilizante mineral apresentaram, em todas as idades avaliadas, concentrações foliares de magnésio (Mg) superiores aos demais tratamentos testados. Silva et al. (2008b), ao estudarem o volume de madeira e a concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco, verificaram que as concentrações foliares de Mg foram estatisticamente similares nos tratamentos com aplicação de lodo; porém inferiores aos valores obtidos no tratamento com fertilização mineral (2,5 g Kg⁻¹), devido a calagem prévia aplicada nesse tratamento.

As concentrações de enxofre nas folhas dos eucaliptos (Tabela 8) foram, até os 18 meses de idade, mais elevadas no tratamento com lodo de esgoto da ETE de São Miguel, principalmente quando comparadas às concentrações de S nas folhas dos eucaliptos dos tratamentos testemunha ou fertilização mineral. Vaz e Gonçalves (2002) também verificaram maiores concentrações foliares de S nas folhas dos eucaliptos com 24 meses de idade adubados com diferentes doses de lodo de esgoto. Os pesquisadores atribuíram o resultado à constante mineralização da matéria orgânica presente no lodo.

As concentrações foliares dos micronutrientes nos eucaliptos de cada tratamento e em diferentes idades são apresentadas na tabela 9. Tanto as concentrações foliares de Boro quanto as concentrações foliares de Manganês foram relativamente similares nos diferentes tratamentos. Observa-se também que a concentração foliar do manganês em todos os tratamentos diminuiu cerca de 3 vezes entre as idades de 6 e 42 meses. De acordo com a literatura, o manganês apresenta baixa mobilidade dentro da planta e tende a acumular-se nas folhas mais velhas; logo, em solos com baixa disponibilidade de manganês, as plantas apresentam a cada período de crescimento menor concentração de Mn nas folhas mais jovens (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

As concentrações foliares de cobre e zinco, na idade de 6 meses, também foram superiores nos tratamentos adubados com lodo de esgoto. Guedes e Poggiani (2003) também verificaram maiores concentrações de Zn (concentração média = 27 mg Kg⁻¹) em um plantio

Eucalyptus grandis, com aproximadamente 2 anos de idade, adubado com 15 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto tratado com cal. Nesta pesquisa, a quantidade de zinco adicionada ao solo com a aplicação de lodo chegou a ser 7 vezes maior que a quantidade de zinco adicionada ao solo com a fertilização mineral (Tabela 4); logo, as maiores concentrações foliares de zinco nos tratamentos com lodo devem-se à maior quantidade desse elemento adicionada ao solo.

Tabela 9 - Concentração de micronutrientes e de níquel nas folhas dos *Eucalyptus grandis*, em diferentes idades, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ni
	----- mg Kg ⁻¹ -----					
IDADE de 6 meses						
Testemunha	13 b	15 b	82 b	788 ab	20 b	...
Fertilização mineral	20 a	13 b	90 b	678 ab	20 b	...
Lodo Barueri	17 ab	25 a	110 a	804 ab	31 a	...
Lodo São Miguel	16 ab	23 a	110 a	866 a	29 a	...
Lodo Parque N. Mundo	15 ab	29 a	102 a	625 b	29 a	...
IDADE de 18 meses						
Testemunha	22 a	15 a	84 b	707 a	27 b	...
Fertilização mineral	21 a	8 c	89 ab	287 c	20 c	...
Lodo Barueri	22 a	10 bc	111 ab	459 b	34 a	...
Lodo São Miguel	21 a	16 a	115 a	662 a	34 a	...
Lodo Parque N. Mundo	18 a	14 ab	106 ab	444 b	30 ab	...
IDADE de 42 meses						
Testemunha	15 a	10 a	71 ab	213 b	12 bc	1,1 c
Fertilização mineral	15 a	8 b	73 ab	233 ab	10 c	0,0 d
Lodo Barueri	13 a	10 a	88 a	341 a	16 ab	5,6 a
Lodo São Miguel	12 a	9 ab	87 ab	340 a	12 bc	5,5 a
Lodo Parque N. Mundo	13 a	11 a	63 b	276 ab	18 a	2,6 b

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

Sinais convencionais utilizados:

... Dado numérico não disponível.

Com relação aos metais pesados, apenas o níquel (Ni) teve sua concentração quantificada nas folhas dos *Eucalyptus grandis* (tabela 9); uma vez que os demais metais pesados analisados (Cr, Cd e Pb) não foram quantificados por se apresentarem em concentrações abaixo do nível de

determinação do método analítico. Assim, as concentrações foliares de níquel (Ni) nos eucaliptos adubados com os lodos das ETEs de Barueri e São Miguel foram respectivamente de 5 e 2 vezes maiores que as concentrações foliares observadas nos tratamentos testemunha e adubação com LPNM.

O níquel faz parte da metaloenzima uréase, que contém dois átomos Ni por molécula, a qual participa da hidrólise enzimática da uréia, transformando-a em NH_4^+ e CO_2 . Logo o Ni passa a ser importante para as plantas que recebem adubações com uréia ou com seus derivados (por exemplo, na adubação foliar), exercendo papel importante no metabolismo do N (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Estes mesmos autores relatam ainda que as concentrações de níquel nas plantas variam entre 0,3 e 3,5 mg Kg^{-1} de matéria seca, dependendo da parte amostrada e da espécie, considerando-se concentrações próximas a 1,5 mg Kg^{-1} como adequadas ao crescimento normal das plantas. Logo, em nosso trabalho, apenas os eucaliptos do tratamento testemunha apresentaram concentração de Ni (1,1 mg Kg^{-1}) próxima ao valor tido como ideal, sendo que as folhas dos eucaliptos de todos os tratamentos adubados com lodo de esgoto apresentaram concentrações de Ni superiores a 1,5 mg Kg^{-1} .

Velasco-Molina et al. (2006), estudaram a concentração de metais pesados no solo e em folhas de árvores de eucaliptos adubados com diferentes doses de biossólido e encontraram valores de níquel variando de 4,23 a 7,83 mg Kg^{-1} . Contudo, os autores concluíram que essas concentrações não foram prejudiciais a ponto de afetarem o crescimento normal dos eucaliptos.

Como técnica auxiliar a análise química de solo nas práticas de adubação de espécies florestais, a diagnose foliar permite estabelecer as relações mais adequadas entre as concentrações dos nutrientes necessários, sendo cada vez mais utilizada. Este tipo de estudo é importante para nortear a recomendação mais precisa de adubação e calagem e apresenta certas vantagens principalmente em culturas perenes, como por exemplo, as plantações florestais, quando se visa o suprimento de nutrientes minerais, bem como a adição ao solo de adubos orgânicos. Neste trabalho, as relações entre as concentrações dos nutrientes contidos nas folhas dos eucaliptos nos diferentes tratamentos são apresentadas na tabela 10.

Nas três idades avaliadas, a relação Ca/Mg nos folhas foi significativamente maior nos eucaliptos adubados com o lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo, cujos valores variaram de 3,9 a 4,5. Silveira et al. (2005), num levantamento nutricional de povoamentos de *E. grandis* adubados com lama de cal, verificaram que quanto menor era a relação Ca/Mg nas folhas, maior

era a produtividade dos eucaliptos, aos 2 anos de idade. Observa-se no presente trabalho que as maiores produtividades foram alcançadas quando a razão Ca/Mg nas folhas estava na faixa de 2,7 a 3,0.

Tabela 10 - Relações entre as concentrações dos nutrientes nas folhas dos *Eucalyptus grandis*, em diferentes idades, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento

TRATAMENTO	Ca/Mg	K/Mg	Ca/K	N/P	N/S	K/P
	----- unidade -----					
IDADE de 6 meses						
Testemunha	2,1 c	3,3 a	0,6 d	30,3 a	25,1 a	7,7 a
Fertilização mineral	1,7 d	2,0 b	0,8 c	24,1 b	23,3 a	6,4 a
Lodo Barueri	2,6 b	2,3 b	1,1 bc	22,3 b	21,4 a	3,5 b
Lodo São Miguel	2,8 b	2,2 b	1,3 ab	21,8 b	20,1 a	3,0 b
Lodo Parque N. Mundo	4,2 a	2,4 b	1,7 a	25,3 b	27,5 a	4,4 b
IDADE de 18 meses						
Testemunha	2,2 c	1,6 ab	1,4 c	18,6 a	36,6 b	3,3 a
Fertilização mineral	1,5 d	1,0 c	1,4 bc	18,9 a	54,0 a	2,9 ab
Lodo Barueri	2,5 c	1,3 b	1,9 ab	16,8 ab	49,8 a	2,4 b
Lodo São Miguel	3,3 b	1,7 a	2,0 a	14,1 b	27,1 c	2,2 b
Lodo Parque N. Mundo	3,9 a	1,7 a	2,4 a	17,8 a	36,4 b	2,7 ab
IDADE de 42 meses						
Testemunha	2,0 c	2,6 a	0,8 d	19,1 a	28,1 a	3,4 a
Fertilização mineral	1,3 d	0,9 c	1,5 bc	17,3 b	27,8 a	2,3 b
Lodo Barueri	2,2 c	1,8 b	1,3 c	16,1 b	30,3 a	2,5 b
Lodo São Miguel	3,5 b	1,9 ab	1,8 b	17,7 ab	24,6 a	2,5 b
Lodo Parque N. Mundo	4,5 a	1,8 b	2,6 a	17,2 b	31,6 a	2,4 b

Nota: Para cada relação entre os elementos químicos e cada idade (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

O tratamento que apresentou a menor razão Ca/Mg nas folhas foi o com fertilização mineral, cujos valores variaram de 1,7 (6 meses de idade) a 1,2 (42 meses de idade). Por sua vez, o tratamento com o lodo da ETE de São Miguel, apesar de não ter sido tratado com cal hidratada, também conferiu razões Ca/Mg nas folhas, após os 18 meses de idade, significativamente maiores que os demais tratamentos testados, com exceção do tratamento com o LPNM.

A razão foliar K/Mg, na idade de 6 meses, foi significativamente maior no tratamento testemunha, quando comparado aos demais tratamentos, ou seja, cerca de 50% maior. Nas idades

de 18 e 42 meses, os eucaliptos adubados com fertilizante mineral apresentaram razões foliares K/Mg significativamente menores quando comparadas aos demais tratamentos. Na literatura, a relação K/Mg igual 8/1 é considerada ótima para o crescimento das plantas (MILLS e JONES Jr., 1996). Em nosso trabalho, nenhum tratamento proporcionou eucaliptos com relações K/Mg nas folhas superior a 4/1.

Segundo Silveira et al. (2005), no trabalho onde foi avaliado o estado nutricional das árvores de *E. grandis* adubadas com cal, verificaram que a alta produtividade dos eucaliptos foi observada quando a relação Ca/K na folhas estava na faixa de 0,55 a 0,85; e relações superiores a 1,00 proporcionaram quedas significativas na produtividade ($<30 \text{ st ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Levando em consideração estas informações, observou-se que aos 6 meses de idade os eucaliptos adubados com os diferentes lodos de esgoto apresentaram relação Ca/K nas folhas superiores a 1 e apenas os tratamentos testemunha e fertilização mineral apresentaram razão Ca/K dentro da faixa tida como adequada (0,55 a 0,85). Nas idades de 18 e 42 meses, todos os tratamentos apresentaram relação Ca/K nas folhas superior a 1; principalmente os eucaliptos adubados com o lodo da ETE de Parque N. Mundo que apresentaram relação Ca/K médio de 2,5.

Levando em consideração as razões foliares Ca/Mg e Ca/K observadas nos tratamentos testados, pode-se constatar que os eucaliptos adubados com o lodo da ETE de Parque N. Mundo foram os que tiveram maior desbalanço nutricional no que concerne a concentração desses íons na folha; isto, muito provavelmente, contribuiu para o menor crescimento e, conseqüentemente, para a menor produção de biomassa pelos eucaliptos adubados com este tipo de lodo.

Em todas as idades avaliadas, a razão N/P nas folhas foi, na maioria das vezes, maior no tratamento testemunha quando comparado aos demais tratamentos. Aos 6 meses de idade, a razão N/P nas folhas do tratamento testemunha foi de 30,3 e a razão dos demais tratamentos foi em média de 23,4. Segundo Schonau e Herbert (1982), em estudo sobre a relação entre o crescimento e a concentração foliar de nitrogênio, fósforo e potássio em *Eucalyptus grandis*, verificaram que a razão N/P associada às maiores altura estava compreendida entre 10 a 15 unidades. Com bases nesta informação, o único momento em que algum tratamento apresentou uma razão N/P dentro da faixa tida como adequada (10 a 15 unidades) foi aos 18 meses de idade, nos eucaliptos adubados com o lodo da ETE de São Miguel, cuja razão N/P foi de 14 unidades. Quanto aos demais, nenhum dos tratamentos apresentou razão N/P inferior a 16.

Shonau e Herbert (1982) determinaram também que a razão K/P associada às maiores

alturas estiveram compreendidas entre 3,8 e 4,2 unidades. Em todas as idades de avaliação, nenhum dos tratamentos testados neste estudo apresentou razão K/P dentro da faixa tida como adequada; sendo que o tratamento testemunha apresentou razão K/P nas folhas maior quando comparado aos demais tratamentos testados, superando-os em cerca de 40% (aos 42 meses de idade).

Por fim, a razão N/S foi significativamente diferente entre os tratamentos testados apenas aos 18 meses de idade, onde os eucaliptos adubados com fertilizante mineral e com o lodo de esgoto da ETE de Barueri apresentaram em média razão N/S nas folhas igual a 51,9. A razão N/S observada nestes dois tratamentos foi superior em aproximadamente 40% ao tratamento testemunha. Para Mills e Jones Jr. (1996), as maiorias das culturas requerem em média uma razão N/S igual a 15/1 para a síntese de proteínas; contudo, os autores enfatizam que esta razão pode variar consideravelmente a cada estágio de crescimento da planta e também entre diferentes espécies de planta. Em todas as idades, os tratamentos testados apresentaram razão N/S nas folhas acima de 20.

Apesar dos eucaliptos adubados com lodo de esgoto apresentarem certo desbalanço nutricional para a maioria das relações entre os nutrientes avaliados, segundo os valores tidos como adequados pela literatura; o crescimento e o volume de madeira obtido até os 48 meses de idade dos eucaliptos adubados com lodo foi satisfatório, principalmente, se comparados aos eucaliptos adubados com fertilizante mineral. Contudo, os resultados de nutrição mineral dos eucaliptos obtidos no presente trabalho indicam a importância de se fazer o acompanhamento do estado nutricional das árvores adubadas com lodo de esgoto, principalmente nos casos onde o lodo foi condicionado com cal virgem, de modo que se possam efetuar ao longo do tempo fertilizações minerais complementares que minimizem a deficiência de certos nutrientes no solo e melhorem a proporcionalidade entre os nutrientes na planta. Estes ajustes com fertilização mineral complementar podem possibilitar maior resposta dos eucaliptos à adubação com lodo de esgoto, gerando ao final do ciclo produtivo um volume de madeira adequado ou acima das expectativas do empreendedor florestal.

4.5 Produção de folheto e transferência de nutrientes

A produção de folheto em todos os tratamentos testados foi consideravelmente superior no período de maior precipitação comparada à produção do período de menor precipitação

(Tabela 11). A produção de folheto no período de maior precipitação correspondeu em média a 65% da produção total observada nos tratamentos durante todo o ano de estudo (maio/2007 a abril/2008). Poggiani et al. (1984), estudaram a ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos e observaram que a maior produção de folheto em plantios de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus saligna*, com três anos de idade e adubados com fertilizante mineral, ocorreu nos meses mais quentes e chuvosos de novembro a abril.

Tabela 11 - Produção de folheto (Kg ha⁻¹) nos tratamentos Testemunha (T), Fertilização mineral (FM), Lodo ETE Barueri (LB), Lodo ETE São Miguel (LSM) e Lodo ETE Parque Novo Mundo (LPNM); nos meses correspondentes aos períodos de menor e maior precipitação

MÊS/ANO	T	FM	LB	LSM	LPNM
MENOR PRECIPITAÇÃO					
Maio/07	159,2 b	288,9 a	265,9 a	272,3 a	320,1 a
Junho/07	226,2 b	360,7 a	377,8 a	375,1 a	347,6 a
Julho/07	175,7 b	438,4 a	457,3 a	456,7 a	487,5 a
Agosto/07	134,8 a	121,5 a	120,1 a	109,4 a	124,4 a
Setembro/07	227,8 c	593,2 b	789,9 a	859,4 a	744,5 ab
Outubro/07	122,4 b	247,9 a	226,7 a	256,1 a	282,0 a
Total	1065,1 b	2069,5 a	2250,4 a	2341,5 a	2319,6 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO					
Novembro/07	19,7 b	42,4 a	42,4 a	38,5 a	50,5 a
Dezembro/07	149,9 c	266,8 a	240,9 ab	178,4 bc	230,2 ab
Janeiro/08	530,7 b	700,7 a	627,5 ab	586,2 ab	633,6 ab
Fevereiro/08	859,5 c	1391,3 b	1616,6 ab	1739,0 a	1498,3 ab
Março/08	760,7 b	1132,2 a	1223,6 a	1166,4 a	1079,1 a
Abril/08	285,8 b	624,7 a	560,5 a	498,2 a	541,7 a
Total	2662,3 b	4195,9 a	4252,3 a	4249,3 a	4094,5 a
ANUAL (maio/07 a abril/08)					
Total/Ano	3727,4 b	6265,5 a	6620,2 a	6590,7 a	6414,1 a

Nota: Para cada mês/ano ou para cada total (linha), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Diferente das florestas subtropicais nativas do Brasil, a deposição de folhas pelos eucaliptos não estaria ligada à redução de água no solo (período de inverno seco) e à necessidade de diminuir a perda de água pela transpiração, mas sim devido à maior translocação de

compostos orgânicos e nutrientes de tecidos mais velhos para os tecidos mais novos, que ocorre com maior intensidade no período de primavera-verão (GUEDES, 2005). Segundo Street e Öpik (1974), durante a fase de desenvolvimento mais acentuado das plantas, quando os diferentes órgãos entram em competição por nutrientes, o crescimento de um determinado órgão pode resultar na senescência e morte de outro órgão, em função da translocação de compostos orgânicos e nutrientes das folhas adultas/senescentes para as folhas em fase de crescimento.

Em ambos os períodos avaliados, a produção de folheto no tratamento testemunha foi inferior à produção de folheto observada nos demais tratamentos, chegando a ser em determinados momentos metade da quantidade de folheto obtida nos tratamentos com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral. No período de menor precipitação, a produção de folheto nos tratamentos com fertilizante mineral ou com lodo de esgoto foi similar, com exceção do mês de setembro/07 (pico de produção de folheto), onde os eucaliptos adubados com lodo da ETE de Barueri ou com lodo da ETE de São Miguel produziram cerca de 230 Kg ha⁻¹ a mais de folheto, comparado ao tratamento com fertilização mineral (Tabela 11).

No período de maior precipitação, a produção de folheto nos tratamentos com fertilizante mineral ou com lodo de esgoto também foi similar; entretanto, no mês de fevereiro/08 (pico de produção de folheto), os eucaliptos adubados com o lodo da ETE de São Miguel produziram aproximadamente 350 Kg ha⁻¹ a mais de folheto, comparado aos eucaliptos adubados com fertilizante mineral. Guedes (2000), ao estudar os efeitos do lodo de esgoto sobre a nutrição e a ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto, também verificou diferenças entre os tratamentos durante os picos de produção de folheto.

No computo final (Anual), os eucaliptos dos tratamentos com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral produziram em média 6.500 Kg ha⁻¹ ano⁻¹ de folheto; o que representou cerca de 2.750 Kg ha⁻¹ ano⁻¹ a mais, quando comparados à produção anual de folheto no tratamento testemunha. Apesar de existir algumas diferenças entre as quantidades de folheto produzidas mensalmente nos diferentes tratamentos, vale ressaltar que o padrão de distribuição da produção de folheto ao longo do ano de estudo foi similar entre os tratamentos testemunha, com fertilização mineral ou com lodo de esgoto (Figura 9); ou seja, todos os tratamentos apresentaram pico de produção anual de folheto no mês de fevereiro/2008 e tiveram a menor produção de folheto no mês de novembro/2007.

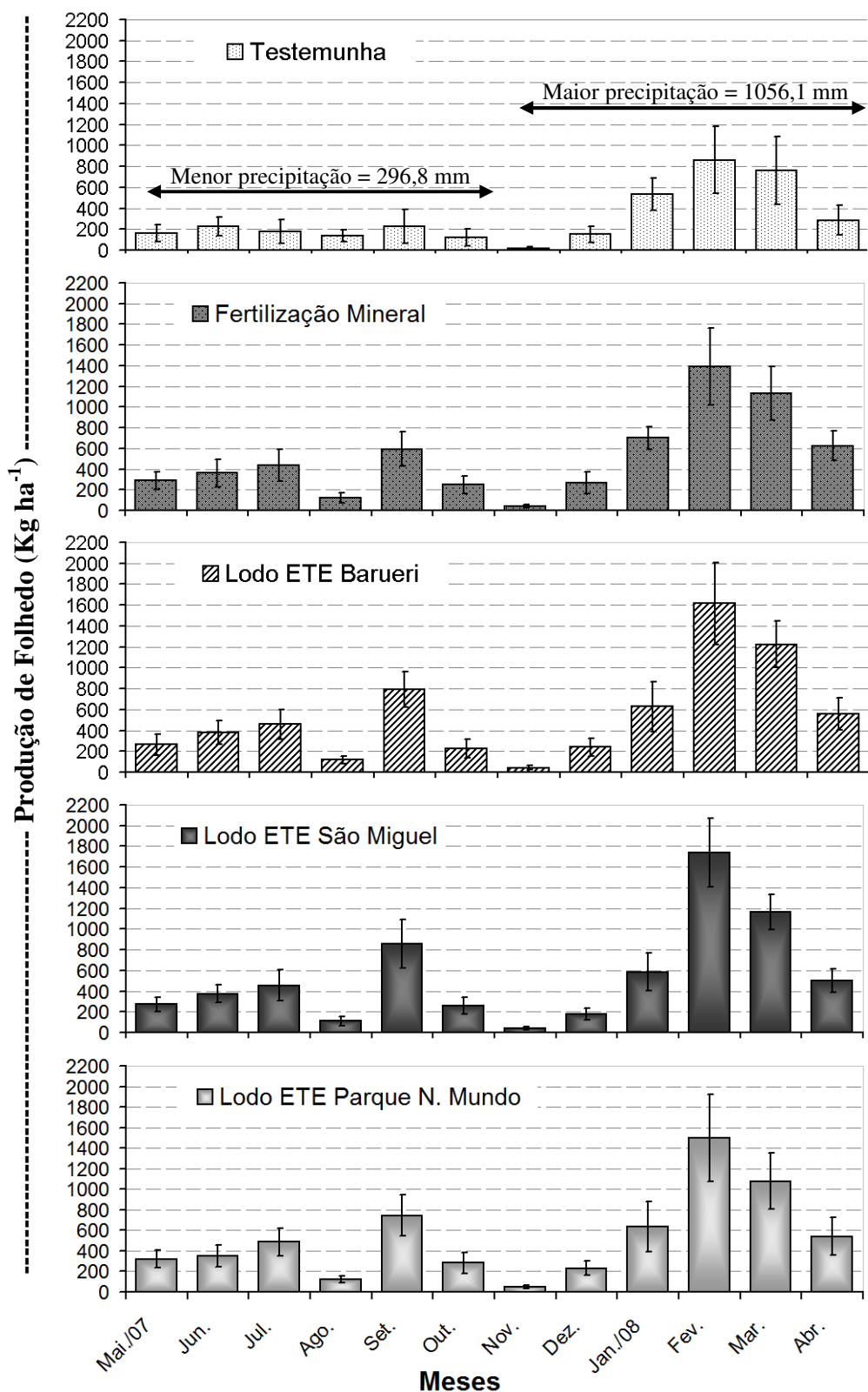


Figura 9 - Distribuição da produção de folheto ao longo do ano de estudo, em cada um dos tratamentos testados: Testemunha (T), Fertilização Mineral (FM), Lodo ETE Barueri (LB), Lodo ETE São Miguel (LSM) e Lodo ETE Parque Novo Mundo (LPNM); nos meses correspondentes aos períodos de menor e maior precipitação

Diferentemente da similaridade observada entre a quantidade de folheto produzido pelos tratamentos com lodo de esgoto e com fertilizante mineral; a concentração dos nutrientes no folheto depositado diferiu entre os tratamentos (Tabela 12).

Tabela 12 - Concentração de macro e micronutrientes no folheto produzido pelos eucaliptos durante os períodos de menor e maior precipitação nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g Kg ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	11,8 b	0,5 b	1,1 a	4,4 d	1,3 b	1,4 a
Fertilização mineral	14,4 ab	0,5 b	1,1 a	5,3 c	2,7 a	1,3 a
Lodo Barueri	13,7 ab	0,7 a	1,1 a	5,5 c	1,6 b	1,4 a
Lodo São Miguel	15,3 ab	0,6 ab	1,0 a	6,9 b	1,3 b	1,4 a
Lodo Parque N. Mundo	16,1 a	0,8 a	1,1 a	8,5 a	1,3 b	1,4 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	10,6 c	0,4 c	0,6 a	3,5 d	1,0 bc	1,3 b
Fertilização mineral	12,8 bc	0,4 bc	0,5 a	4,6 c	2,4 a	1,3 ab
Lodo Barueri	15,4 ab	0,7 a	0,5 a	4,7 c	1,3 b	1,4 a
Lodo São Miguel	16,8 a	0,6 ab	0,5 a	5,8 b	0,9 c	1,4 a
Lodo Parque N. Mundo	15,2 ab	0,6 a	0,6 a	8,7 a	1,1 bc	1,3 ab
TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	----- mg Kg ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	25 a	17 a	310 a	509 a	13 c	
Fertilização mineral	31 a	11 d	285 a	317 b	10 d	
Lodo Barueri	28 a	14 b	263 a	431 ab	17 a	
Lodo São Miguel	27 a	12 cd	288 a	498 a	14 bc	
Lodo Parque N. Mundo	26 a	13 bc	315 a	362 b	16 ab	
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	25 ab	15 a	190 a	387 a	8 c	
Fertilização mineral	29 a	9 d	195 a	280 c	8 c	
Lodo Barueri	21 b	12 bc	200 a	333 abc	13 a	
Lodo São Miguel	22 b	10 c	191 a	360 ab	11 b	
Lodo Parque N. Mundo	20 b	12 b	185 a	302 bc	14 a	

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

No período de maior precipitação, todos os tratamentos com lodo apresentaram maior concentração de N no folheto quando comparados ao tratamento testemunha; contudo, apenas o tratamento com o lodo da ETE de São Miguel apresentou concentração de N no folheto superior (cerca de 30%) ao tratamento com adubação exclusivamente mineral.

Resultado semelhante foi observado por Prescott et al. (1993), ao estudarem os efeitos a longo prazo da aplicação de lodo de esgoto em plantio de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, localizado em Seattle-WA, sobre a ciclagem de nutrientes via serapilheira.

A concentração de fósforo (P) no folheto produzido pelos eucaliptos, em ambos os períodos avaliados, foi nos tratamentos com os lodos das ETEs de Barueri e Parque N. Mundo cerca de 40 a 75% superior às concentrações de P no folheto produzido no tratamento testemunha ou com fertilização mineral. A maior concentração de fósforo no folheto produzido pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto deve estar relacionada à maior disponibilidade deste nutriente no solo, acarretando em maior assimilação de P pelas árvores.

A concentração de K no folheto produzido pelos eucaliptos no período de menor precipitação foi consideravelmente maior quando comparada ao período de maior precipitação; comprovando que este elemento é extremamente móvel e facilmente lixiviado das folhas pela água da chuva. Kolm e Poggiani (2003) estudaram a ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* submetidos à prática de desbastes e também verificaram maiores concentrações de K no período seco de inverno. Os autores relatam que isto poderia ser explicado por ser esta uma época de crescimento lento dos eucaliptos, na qual haveria uma redução no processo de translocação interna deste elemento das folhas caducas para as mais novas, resultando uma maior concentração de K nas folhas senescentes.

A concentração de Mg no folheto produzido pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral superou os demais tratamentos em 90% no período de menor precipitação e em 120% no período de maior precipitação. Almeida (2009) estudou a nutrição e crescimento em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio e verificou uma taxa média de retranslocação do magnésio das folhas senescentes de 20%. Sendo assim, a principal explicação para a maior concentração de magnésio no folheto produzido pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral está relacionada à maior quantidade de magnésio adicionada ao solo via calagem; pois, com baixa taxa de retranslocação, a concentração de magnésio no folheto passa a ser diretamente proporcional à quantidade de magnésio absorvida pelo eucalipto,

que nesse caso deve ter sido maior, devido à adição do calcário agrícola.

Em ambos os períodos avaliados, o folheto produzido no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo apresentou a maior concentração de Ca, quando comparado aos demais tratamentos. Como o cálcio é um elemento praticamente imóvel na planta, por fazer parte da parede celular, ele possui baixa taxa de retranslocação e se acumula nas folhas senescentes; sendo assim, a variação da sua concentração no folheto é função direta da quantidade do elemento absorvida pelas plantas (GUEDES, 2005).

Com relação à concentração dos micronutrientes no folheto produzido pelos eucaliptos nos diferentes tratamentos (Tabela 12); valem ser destacados o cobre (Cu) e o zinco (Zn). Em ambos os períodos avaliados, a concentração de cobre no folheto produzido pelos eucaliptos no tratamento testemunha chegou a ser praticamente 40% maior que a concentração de Cu no folheto produzido nos demais tratamento testados. Segundo Mills e Jones Jr. (1996), o cobre é um elemento com pouca ou quase nenhuma mobilidade dentro da planta; normalmente, após absorvido pelas raízes, o cobre é complexado por compostos nitrogenados solúveis, tais como os aminoácidos, que o conduz pelo xilema até as folhas onde irá fazer parte do citocromo-oxidase e da plastocianina presentes no cloroplasto. Logo, a maior concentração de cobre no folheto produzido no tratamento testemunha é compreensível; pois, as árvores deste tratamento apresentaram menor crescimento em biomassa e por isso acabaram acumulando maior quantidade de cobre em suas folhas e, sucessivamente, no folheto.

Nos três tratamentos com lodo de esgoto, a concentração de zinco (Zn) no folheto produzido pelos eucaliptos foi significativamente superior aos tratamentos testemunha ou com fertilização mineral, tanto no período de menor quanto no de maior precipitação. Este resultado muito provavelmente esteja relacionado à maior quantidade de zinco adicionada ao solo com a aplicação dos lodos de esgoto.

A quantidade de macronutrientes transferida para o solo via deposição do folheto é apresentada na tabela 13. Em todas as épocas de avaliação, o tratamento testemunha devolveu menores quantidades de macro e micronutrientes ao solo, sendo em média a metade da quantidade dos nutrientes transferidos para o solo pela deposição do folheto nos demais tratamentos testados.

Tabela 13 – Transferência de macronutrientes ao solo durante os períodos de menor e maior precipitação (maio/2007 a abril/2008), através do folhede depositado nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- kg ha ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	12,3 d	0,5 d	1,2 b	4,5 d	1,3 d	1,5 c
Fertilização mineral	29,7 c	1,0 c	2,3 a	10,9 c	5,6 a	2,7 b
Lodo Barueri	30,7 bc	1,6 b	2,5 a	12,3 c	3,6 b	3,2 ab
Lodo São Miguel	35,6 ab	1,4 b	2,3 a	16,0 b	3,0 c	3,3 a
Lodo Parque N. Mundo	37,1 a	1,8 a	2,6 a	19,5 a	3,0 c	3,2 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	28,2 d	1,0 d	1,6 c	9,2 d	2,7 e	3,5 b
Fertilização mineral	53,7 c	1,7 c	2,1 b	19,3 c	10,1 a	5,5 a
Lodo Barueri	65,5 ab	3,0 a	2,2 ab	20,4 c	5,5 b	6,0 a
Lodo São Miguel	71,4 a	2,5 b	2,1 b	24,6 b	3,8 d	5,9 a
Lodo Parque N. Mundo	62,2 b	2,4 b	2,5 a	35,5 a	4,5 c	5,3 a
TOTAL ANUAL						
Testemunha	40,8 c	1,6 d	2,8 c	13,8 d	4,0 d	5,0 c
Fertilização mineral	83,5 b	2,7 c	4,4 b	30,2 c	15,7 a	8,1 b
Lodo Barueri	98,1 a	4,6 a	4,7 ab	32,8 c	9,3 b	9,3 a
Lodo São Miguel	107,2 a	3,9 b	4,5 ab	40,7 b	6,9 c	9,2 a
Lodo Parque N. Mundo	99,6 a	4,3 ab	5,0 a	55,2 a	7,5 c	8,6 ab

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

Nos períodos de menor e maior precipitação, a quantidade de nitrogênio (N) devolvida ao solo através do folhede produzido nos tratamentos com lodo de esgoto foi significativamente maior que à quantidade de N transferida no tratamento com fertilização mineral. No computo final (anual), a quantidade de nitrogênio devolvida ao solo pelo folhede produzido nos tratamentos com lodo de esgoto foi cerca de 20 Kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N a mais comparada ao tratamento com fertilização mineral.

Silva (2006) estudou a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo em plantio de *Eucalyptus grandis*, após adubação com 10 Mg ha⁻¹ lodo de esgoto úmido e seco, tendo verificado que os tratamentos adubados com lodo ou com fertilizante mineral devolveram ao

solo, aos 3 anos de idade, aproximadamente $49 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de nitrogênio. Este dado foi consideravelmente diferente dos resultados obtidos no presente trabalho, visto que a quantidade de nitrogênio devolvida ao solo nos tratamentos com lodo de esgoto foi em média de $101,6 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esta diferença entre os trabalhos pode ser explicada pelas diferentes doses e composições químicas dos lodos de esgoto utilizados em cada estudo.

A quantidade de fósforo (P) transferida ao solo pelo folheto produzido nos tratamentos com lodo de esgoto também foi superior à quantidade de P transferida no tratamento com fertilização mineral; chegando a ser 50 a 60% superior nos períodos de menor e maior precipitação, respectivamente. Ao final do ano de estudo, os eucaliptos adubados com lodo transferiram para o solo aproximadamente $2 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de fósforo a mais, quando comparados aos eucaliptos adubados com fertilizante mineral.

Guo, Sims e Horne (2006), estudaram a produção de biomassa e a ciclagem de nutrientes em um plantio de *Eucalyptus* manejado para curtos ciclos de cultivo, verificaram que os eucaliptos irrigados com efluente de indústria alimentícia devolveram ao solo via deposição de serapilheira cerca de $5,0 \text{ Kg ha}^{-1}$ de fósforo; destoando consideravelmente da quantidade de fósforo (cerca de 2 Kg ha^{-1}) devolvida ao solo via deposição da serapilheira pelos eucaliptos do tratamento controle.

A quantidade de cálcio devolvida ao solo pelo folheto produzido no tratamento com lodo da ETE Parque N. Mundo foi, em ambos os períodos, significativamente superior à quantidade de Ca devolvida ao solo nos tratamentos com fertilização mineral ou na testemunha. No computo final (anual), foi devolvido ao solo no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo entre 15 a $40 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de cálcio a mais comparado à quantidade de cálcio devolvido ao solo pelo folheto produzido nos demais tratamentos.

Guedes (2005), ao estudar a ciclagem de nutrientes em plantios de *E. grandis* adubados com diferentes doses de lodo de esgoto (condicionado com cal), verificou que a quantidade de cálcio devolvida ao solo nos tratamentos com lodo variou proporcionalmente e positivamente com as doses crescentes de lodo aplicadas no campo.

O tratamento com fertilização mineral transferiu para o solo cerca de $5,0 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de magnésio a mais, quando comparado aos tratamentos com lodo de esgoto. No tratamento com o lodo da ETE Barueri foi transferido para o solo cerca de 30% a mais de magnésio em relação à quantidade de Mg devolvida ao solo pelos folhetos produzidos nos outros dois tratamentos com

lodo de esgoto. Silva (2006), ao estudar a ciclagem de nutrientes em plantios de *E. grandis* adubados com lodo de esgoto seco e úmido, também verificou maiores quantidades de magnésio devolvidas ao solo no tratamento com fertilização mineral em relação aos tratamentos com lodo de esgoto.

A quantidade de micronutrientes transferida para o solo, através da deposição do folheto nos tratamentos, é apresentada na tabela 14. Nos tratamentos aonde foram efetuadas as aplicações de lodo de esgoto, a quantidade de cobre (Cu) devolvida ao solo via folheto foi em média 30% maior que a quantidade de Cu devolvida no tratamento com fertilização mineral.

Tabela 14 – Transferência de micronutrientes ao solo durante os períodos de menor e maior precipitação (maio/2007 a abril/2008), através do folheto depositado nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- g ha ⁻¹ -----				
MENOR PRECIPITAÇÃO					
Testemunha	27,1 a	18,1 b	330,2 c	541,6 c	13,3 c
Fertilização mineral	63,5 a	22,4 b	588,8 b	655,6 c	19,5 b
Lodo Barueri	63,5 a	31,5 a	592,5 b	968,8 b	37,5 a
Lodo São Miguel	62,0 a	28,1 a	675,0 ab	1165,6 a	32,5 a
Lodo Parque N. Mundo	59,8 a	30,2 a	730,2 a	839,7 b	37,5 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO					
Testemunha	67,6 c	38,6 bc	505,8 b	1031,1 d	22,1 d
Fertilização mineral	121,3 a	35,7 c	819,5 a	1172,8 cd	31,5 c
Lodo Barueri	93,5 b	50,2 a	851,7 a	1415,2 ab	56,6 a
Lodo São Miguel	91,4 b	43,8 ab	809,5 a	1527,6 a	44,6 b
Lodo Parque N. Mundo	82,3 b	49,1 a	756,7 a	1236,5 bc	56,5 a
TOTAL ANUAL					
Testemunha	94,7 c	56,7 c	836,0 b	1572,7 c	35,1 d
Fertilização mineral	184,8 a	58,0 c	1408,3 a	1828,4 bc	51,1 c
Lodo Barueri	157,0 b	83,1 a	1467,8 a	2423,1 a	95,5 a
Lodo São Miguel	153,4 b	71,9 b	1484,5 a	2693,2 a	77,2 b
Lodo Parque N. Mundo	142,1 b	79,3 ab	1486,9 a	2076,2 b	94,0 a

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

Nos tratamentos com lodo da ETE de São Miguel e da ETE Barueri, foram devolvidos ao solo aproximadamente 600 g ha^{-1} de Mn a mais em relação aos tratamentos com lodo da ETE Parque N. Mundo e fertilização mineral, e também cerca de 1000 g ha^{-1} de Mn a mais em relação ao tratamento testemunha. Guo, Sims e Horne (2006), ao estudar a produção de biomassa e ciclagem de nutrientes em reflorestamento de *Eucalyptus* com espaçamento de plantio adensado, verificaram que os eucaliptos com três anos de idade e irrigados com efluente de indústria alimentícia retornaram ao solo, via deposição de serapilheira, cerca de $20 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de manganês. Os autores comentam que o manganês pode vir a ser tóxico para muitas plantas cultivadas em solo com pH baixo; neste caso, o retorno de elevadas quantidades de Mn ao solo via deposição de serapilheira pelos eucaliptos poderia ser uma estratégia de auto-preservação das árvores contra qualquer tipo efeito tóxico que o manganês pudesse oferecer em altas quantidades dentro das plantas.

Em todos os períodos de avaliação, o folhedo produzido nos tratamentos com lodo de esgoto devolveu ao solo uma maior quantidade de zinco (Zn) em relação aos demais. No computo final (anual), o folhedo produzido nos tratamentos com lodo da ETE de Barueri e da ETE de Parque N. Mundo devolveu ao solo cerca de 20 a 60 g ha^{-1} a mais de Zn quando comparado aos folhedos produzidos nos demais tratamentos testados.

Constata-se, portanto, que de maneira geral as quantidades de micronutrientes transferidas ao solo das parcelas experimentais via deposição do folhedo, mesmo nos tratamentos adubados com lodo de esgoto, foram pouco expressivas dentro do âmbito do sistema solo-eucaliptos-serapilheira, inclusive para o zinco (considerado metal pesado), levando em conta a adição de até 20 Kg ha^{-1} deste elemento, através da aplicação do lodo de esgoto produzido na ETE de Parque Novo Mundo (Tabela 4).

4.6 Estoque de nutrientes no folhede acumulado sobre o solo

Consta na figura 10 a quantidade de folhede acumulado sobre o solo nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos e períodos avaliados. Todos os tratamentos apresentaram maior acúmulo de folhede sobre o solo no período de maior precipitação em comparação ao período de menor precipitação. As diferenças foram comprovadas estatisticamente com $p < 0,001$.

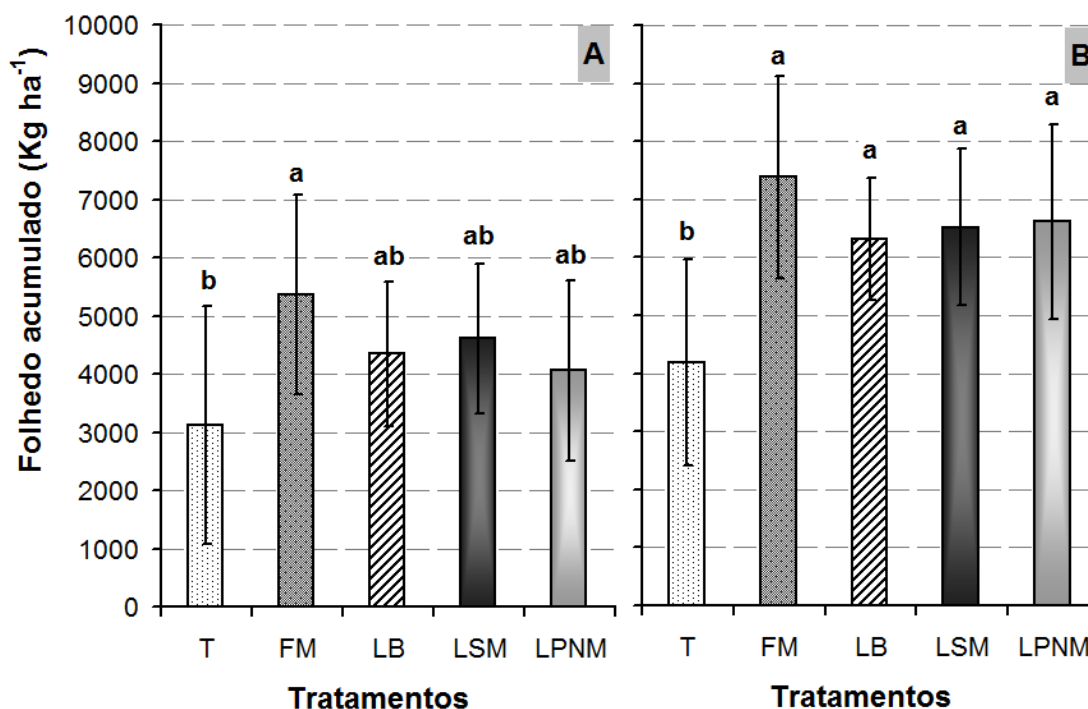


Figura 10 - Folhede acumulado sobre o solo nos tratamentos: Testemunha (T), Fertilização mineral (FM), Lodo ETE Barueri (LB), Lodo ETE São Miguel (LSM) e Lodo ETE Parque Novo Mundo; nos períodos de menor precipitação (A) e maior precipitação (B)

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

No tratamento testemunha, a diferença entre a quantidade de folhede acumulado nos dois períodos avaliados foi aproximadamente de 1.000 Kg ha^{-1} e nos tratamentos com fertilização mineral ou com lodo de esgoto a diferença entre os períodos foi cerca de 2.000 Kg ha^{-1} de folhede.

No período de menor precipitação, o tratamento com fertilização mineral acumulou sobre o solo aproximadamente 2.250 Kg ha^{-1} a mais, quando comparado ao tratamento testemunha. No período de maior precipitação, a quantidade de folhede acumulada sobre o solo nos tratamentos adubados com lodo de esgoto foi aproximadamente de 6.500 Kg ha^{-1} ; ou seja, cerca de 2.300 Kg

ha⁻¹ de folheda a mais, comparada ao tratamento testemunha. Por sua vez, no tratamento com fertilização mineral, a quantidade de folheda acumulada sobre o solo, no período de maior precipitação, foi cerca de 3.200 Kg ha⁻¹ a mais, comparada à quantidade de folheda acumulada no tratamento testemunha.

O acúmulo de folheda sobre o solo é determinado pelo balanço entre a queda de folhas e a taxa de decomposição (GAMA-RODRIGUES et al., 2008); normalmente, a quantidade do folheda acumulado pode variar em função da idade e da taxa de incremento dos povoamentos florestais, das condições climáticas, das características químicas do folheda, dos atributos do solo (ZAIA; GAMA-RODRIGUES, 2004); além de ser influenciada pelas práticas silviculturais empregadas desde a implantação até a colheita florestal.

A concentração dos nutrientes no folheda acumulado sobre o solo, em cada um dos tratamentos e período avaliado, é apresentada na tabela 15. No período de menor precipitação, a concentração de nitrogênio (N) no folheda acumulado nos tratamentos com lodo da ETE de Barueri e da ETE de São Miguel foi cerca de 30% superior à concentração de N no folheda acumulado no tratamento com fertilização mineral e testemunha.

Em ambos os períodos avaliados, a concentração de fósforo (P) no folheda acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto foi aproximadamente o dobro da concentração de P no folheda acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral. Por sua vez, a concentração de P no folheda acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo da ETE Barueri foi cerca de 20% a 50% superior às concentrações de P no folheda acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo da ETE São Miguel. Poggiani e Kolm (2003) estudaram a ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* submetidos à prática de desbaste, verificaram que a concentração média de fósforo na serapilheira acumulada sobre o solo pelos eucaliptos foi de 0,4 g Kg⁻¹; valor este similar a concentração de fósforo verificada no folheda acumulado pelos eucaliptos nos tratamentos testemunha e com fertilização mineral do presente trabalho.

Também nos dois períodos avaliados, a concentração de Ca no folheda acumulado do tratamento com lodo ETE de Parque N. Mundo foi cerca de duas vezes maior que a concentração de Ca no folheda produzido pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral ou com lodo da ETE de Barueri. De forma similar, a concentração de cálcio no folheda acumulado no tratamento com lodo da ETE de São Miguel foi cerca de 30% maior que à concentração de Ca no folheda acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral. Rezende (2005), ao estudar a

influência da aplicação do lodo de esgoto sobre a concentração e o estoque de nutrientes na serapilheira de um talhão de *Eucalyptus grandis*, verificou também concentração elevada de cálcio (concentração média = 14,8 g kg⁻¹) na serapilheira acumulada sobre o solo no tratamento com a aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto condicionado com cal.

Tabela 15 - Concentração de macro e micronutrientes no folheto acumulado sobre o solo, nos períodos de menor e maior precipitação, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g Kg ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	11,7 b	0,3 c	0,4 b	4,4 d	0,7 b	1,5 b
Fertilização mineral	12,0 b	0,3 c	0,5 ab	6,4 c	1,9 a	1,5 ab
Lodo Barueri	15,5 a	0,7 a	0,5 a	6,0 c	0,9 b	1,6 ab
Lodo São Miguel	15,2 a	0,6 b	0,5 a	8,2 b	0,7 b	1,5 ab
Lodo Parque N. Mundo	13,9 ab	0,7 a	0,5 a	12,9 a	0,7 b	1,6 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	14,0 a	0,4 c	0,4 b	3,8 d	0,7 c	1,6 a
Fertilização mineral	12,2 a	0,4 c	0,4 b	5,3 c	1,8 a	1,5 b
Lodo Barueri	15,9 a	0,9 a	0,5 ab	6,1 bc	1,0 b	1,3 c
Lodo São Miguel	15,9 a	0,6 b	0,4 b	7,1 b	0,7 c	1,3 c
Lodo Parque N. Mundo	14,9 a	0,7 ab	0,7 a	13,2 a	0,7 c	1,3 c
TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	----- mg Kg ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	13 b	88 b	3355 ab	439 a	17 c	
Fertilização mineral	15 a	132 a	3408 ab	354 a	15 c	
Lodo Barueri	14 ab	135 a	2778 bc	398 a	62 a	
Lodo São Miguel	15 a	143 a	2335 c	463 a	24 b	
Lodo Parque N. Mundo	15 a	129 a	3905 a	353 a	63 a	
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	14 c	58 b	3368 ab	366 a	15 c	
Fertilização mineral	19 a	68 ab	3410 ab	314 a	13 c	
Lodo Barueri	17 b	87 a	3515 ab	356 a	52 a	
Lodo São Miguel	16 bc	74 ab	2635 b	392 a	19 b	
Lodo Parque N. Mundo	17 ab	75 ab	4368 a	327 a	38 a	

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

A concentração de magnésio (Mg) no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral foi, nos períodos de menor e maior precipitação, cerca de duas vezes maior que a concentração de Mg observada no folheto acumulado pelos eucaliptos nos demais tratamentos testados. Novamente os efeitos da calagem, efetuada no tratamento com fertilização mineral, estão se fazendo perceber na concentração de Mg no folheto acumulado sobre o solo.

Por fim, nos tratamentos com lodo de esgoto, a concentração de zinco no folheto acumulado pelos eucaliptos, em ambos os períodos avaliados, foi praticamente 2 a 4 vezes maior que a concentração de Zn observada no folheto acumulado pelos eucaliptos nos tratamentos testemunha ou com fertilização mineral. Entre os tratamentos com lodo, a concentração de Zn no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com o lodo da ETE de Barueri ou da ETE de Parque N. Mundo foi cerca de 100% superior à concentração de zinco no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados lodo da ETE de São Miguel.

O estoque de macronutrientes no folheto acumulado sobre o solo, nos diferentes tratamentos e períodos avaliados, é apresentado na tabela 16. Como o estoque de nutrientes no folheto acumulado é diretamente proporcional à quantidade de biomassa e à concentração de cada elemento químico no folheto disposto sobre a superfície do solo; o menor estoque de nutrientes no folheto acumulado pelos eucaliptos no presente trabalho foi verificado no tratamento testemunha.

Em ambos os períodos avaliados, o estoque de nitrogênio (N) no folheto acumulado sobre o solo nos tratamentos com lodo de esgoto foi cerca de 30 Kg ha⁻¹ a mais que o estoque de N observado no tratamento testemunha. Lira (2006), ao estudar o estoque de carbono e nitrogênio em um plantio de *Eucalyptus grandis* adubado com lodo de esgoto, verificou que o estoque de nitrogênio na serapilheira acumulada (manta florestal) pelos eucaliptos adubados com 20 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto, condicionado com cal, foi de 152 Kg ha⁻¹; ou seja, cerca de 30 Kg ha⁻¹ a mais que o estoque de N na serapilheira acumulada pelos eucaliptos do tratamento testemunha.

O estoque de fósforo (P) no folheto acumulado sobre o solo pelos eucaliptos adubados com lodo foi cerca de 1,0 Kg ha⁻¹ superior ao estoque de P no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral e cerca de 2,0 Kg ha⁻¹ a mais comparado ao tratamento testemunha. No período de maior precipitação, o estoque de K no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo da ETE de Parque N. Mundo foi cerca de 2,0 Kg ha⁻¹ superior ao estoque de K no folheto acumulado pelos eucaliptos nos demais tratamentos testados.

A pesar das dos estoques de P e K serem estatisticamente diferentes entre nos tratamentos testados; sob o aspecto silvicultural de um plantio florestal, estas quantidades excedentes entre um tratamento e outro são mínimas perto da quantidade que é aplicada de K e P a cada prática de adubação efetuada em um plantio de eucaliptos convencional.

Tabela 16 - Estoque de macronutrientes no folheto acumulado sobre o solo durante os períodos de menor e maior precipitação (maio/2007 a abril/2008) nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- kg ha ⁻¹ -----					
MENOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	36,5 b	0,8 c	1,2 b	12,1 d	1,9 c	4,7 b
Fertilização mineral	64,4 a	1,6 b	2,7 a	33,3 cb	9,9 a	8,0 a
Lodo Barueri	67,4 a	3,0 a	2,2 a	25,5 c	3,8 b	7,0 ab
Lodo São Miguel	70,0 a	2,7 a	2,3 a	36,9 ab	3,2 b	6,9 ab
Lodo Parque N. Mundo	56,4 ab	2,7 a	2,0 a	50,3 a	2,7 bc	6,5 ab
MAIOR PRECIPITAÇÃO						
Testemunha	58,7 b	1,7 d	1,6 c	15,0 c	2,8 d	6,7 b
Fertilização mineral	90,0 a	3,0 c	2,9 b	38,4 b	13,1 a	11,1 a
Lodo Barueri	100,4 a	5,7 a	3,1 b	38,1 b	6,3 b	8,2 b
Lodo São Miguel	103,7 a	3,9 b	2,6 b	45,7 b	4,5 c	8,5 b
Lodo Parque N. Mundo	98,6 a	4,6 b	4,6 a	85,4 a	4,5 c	8,6 b
MÉDIA ANUAL						
Testemunha	47,6 b	1,3 d	1,5 c	14,2 d	2,4 d	5,7 c
Fertilização mineral	77,2 a	2,3 c	2,8 b	36,3 bc	11,6 a	9,6 a
Lodo Barueri	83,9 a	4,4 a	2,7 b	32,2 c	5,1 b	7,6 b
Lodo São Miguel	86,9 a	3,3 b	2,5 b	41,7 b	3,9 c	7,7 b
Lodo Parque N. Mundo	77,5 a	3,7 b	3,3 a	69,3 a	3,7 c	7,5 b

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

Em ambos os períodos avaliados, o estoque de cálcio (Ca) no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo da ETE de Parque N. Mundo foi cerca de 20 a 40 Kg ha⁻¹ superior ao estoque de Ca no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo da ETE de Barueri ou com fertilizante mineral; além de ser cerca de 40 a 70 Kg ha⁻¹ superior ao estoque de cálcio no folheto acumulado no tratamento testemunha.

O estoque de magnésio (Mg) no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral foi, em ambos os períodos avaliados, aproximadamente 7 a 9 Kg ha⁻¹ superior ao estoque de Mg no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto. Silva (2006) estudou o efeito da aplicação de lodos de esgoto úmido e seco sobre a ciclagem de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* e verificou também elevada quantidade de magnésio estocada no folheto acumulado (9,5 Kg ha⁻¹ de magnésio) pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral e cujo solo também teve sua acidez corrigida através da calagem.

Em relação ao estoque de micronutrientes presentes no folheto acumulado sobre o solo (Tabela 17) destacam-se o boro (B) e o zinco (Zn); visto que o estoque dos demais micronutrientes no folheto acumulado foi consideravelmente similar entre os tratamentos. Em relação aos os períodos avaliados, o estoque de boro no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral foi cerca de 20 a 40 g ha⁻¹ superior ao estoque de B no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto; e cerca de 40 a 80 g ha⁻¹ maior que o estoque de B no folheto acumulado no tratamento testemunha.

Em ambos os períodos, estoque de zinco no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com o lodo da ETE de Barueri foi de 160 a 230g ha⁻¹ maior que o estoque de Zn no folheto acumulado pelos eucaliptos adubados com fertilizante mineral ou com o lodo da ETE de São Miguel. Rezende (2005) verificou que as árvores de *Eucalyptus grandis* adubadas com 20 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto, condicionado com cal, estocaram no folheto acumulado sobre o solo cerca de 1400 g ha⁻¹ de Zn; ou seja, aproximadamente 1000 g ha⁻¹ a mais quando comparado aos tratamentos testemunha ou com fertilização mineral. Os valores encontrados por Rezende (2005) foram consideravelmente superiores aos valores encontrados no presente estudo; muito provavelmente estas diferenças estejam atreladas a dose e ao tipo de lodo de esgoto utilizado, além das condições edáficas características de cada local de estudo.

Tabela 17 - Estoque de micronutrientes no folheto acumulado sobre o solo, nos períodos de menor e maior precipitação (maio/2007 a abril/2008), nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- g ha ⁻¹ -----				
MENOR PRECIPITAÇÃO					
Testemunha	39,7 c	254,3 b	9439,3 c	1369,6 b	44,9 c
Fertilização mineral	82,6 a	696,4 a	17831,7 a	1897,9 ab	79,8 b
Lodo Barueri	60,0 bc	576,5 a	11830,3 bc	1727,3 ab	263,6 a
Lodo São Miguel	67,2 ab	649,2 a	10553,2 bc	2131,6 a	106,3 b
Lodo Parque N. Mundo	58,8 bc	509,4 a	15328,3 ab	1431,7 b	245,5 a
MAIOR PRECIPITAÇÃO					
Testemunha	57,4 c	245,1 b	14107,8 d	1532,5 b	60,4 d
Fertilização mineral	141,7 a	501,1 a	25166,2 ab	2319,6 a	94,4 c
Lodo Barueri	105,4 b	550,6 a	22192,7 bc	2246,4 a	324,2 a
Lodo São Miguel	101,7 b	484,6 a	17186,0 cd	2553,4 a	121,1 c
Lodo Parque N. Mundo	113,1 b	498,8 a	28893,6 a	2162,0 a	244,0 b
MÉDIA ANUAL					
Testemunha	48,5 c	260,6 b	12293,2 c	1451,0 c	55,6 e
Fertilização mineral	112,2 a	605,7 a	21722,5 a	2108,7 ab	88,4 d
Lodo Barueri	82,7 b	568,2 a	17130,9 b	1986,8 ab	298,5 a
Lodo São Miguel	84,5 b	571,9 a	13970,4 bc	2342,5 a	115,0 c
Lodo Parque N. Mundo	86,0 b	510,9 a	22370,0 a	1796,8 bc	250,7 b

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

4.7 Decomposição do folhede e liberação de nutrientes

Os valores estimados para a constante de decomposição (K) e o tempo de meia vida ($T_{0,5}$) do folhede de *Eucalyptus grandis*, em cada um dos tratamentos, são apresentados na tabela 18. Os tratamentos com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral não apresentaram diferenças estatísticas quanto à quantidade total de folhede produzido ao longo do ano ou quanto à quantidade de folhede acumulado sobre o solo, depositando em média $2.750 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de folhede e totalizando cerca de 2.000 Kg ha^{-1} de folhede acumulando a mais, em relação ao tratamento testemunha.

Tabela 18 - Folhede produzido (Folhede Prod.), Folhede Acumulado (Folhede Acum.), Constante de decomposição (K) e Tempo de meia vida ($T_{0,5}$) característicos de cada um dos tratamentos, no período de maio/2007 a abril/2008

TRATAMENTO	Folhede Prod. - $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ -	Folhede Acum. ---- Kg ha^{-1} ----	K* anos	$T_{0,5}$ * anos
Testemunha	3.727,4 b	3.656,3 b	1,02 bc	0,69 ab
Fertilização mineral	6.265,5 a	6.372,2 a	0,99 c	0,71 a
Lodo Barueri	6.620,2 a	5.329,5 a	1,25 a	0,56 c
Lodo São Miguel	6.590,7 a	5.564,0 a	1,19 abc	0,59 abc
Lodo Parque N. Mundo	6.414,1 a	5.336,8 a	1,23 ab	0,58 bc

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

* Constante de decomposição (K) e tempo de meia vida ($T_{0,5}$) segundo Olson (1963).

A constante de decomposição (K) e os tempo de meia vida ($T_{0,5}$) do folhede produzido pelos eucaliptos também foram similares entre os tratamentos. Entretanto, a constante de decomposição do folhede no tratamento com lodo de esgoto da ETE Barueri foi significativamente superior às constantes de decomposição calculadas para os folhedos dos tratamentos com fertilização mineral e testemunha.

Zaia e Gama-Rodrigues (2004) estudaram a ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucaliptos na região norte fluminense e verificaram uma taxa de decomposição (K) para a serapilheira de *Eucalyptus grandis* igual a 1,00. Este valor de K encontrado por esses pesquisadores foi similar ao valor de K calculado no presente trabalho para o folhede pertencente aos tratamentos testemunha e com fertilização mineral.

Guo e Sims (2001) estudaram a decomposição da serapilheira (manta florestal) em plantios de *Eucalyptus globulus* e verificaram que o valor da constante de decomposição (K) da serapilheira produzida pelos eucaliptos irrigados com efluente de indústria alimentícia foi de 0,55; ao passo que a constante de decomposição da serapilheira pertencente à parcela controle foi de 1,37, indicando decomposição mais rápida. Os valores de K obtidos no presente trabalho (tabela 18) foram diferentes dos valores de K obtidos por Guo e Sims (2001); entretanto, os autores comentam que a falta de concordância entre os valores de $K_{(\text{com efluente})}$ e $K_{(\text{sem efluente})}$, bem como com os valores de K relatados pela literatura, pode estar relacionada a outros fatores que controlam a velocidade de decomposição da serapilheira, como por exemplo, a umidade e a temperatura do solo, que são normalmente distintas entre as áreas de estudo.

O tempo de meia vida do folheto no tratamento com lodo da ETE de Barueri foi de 0,56 anos; em contrapartida, o tempo de meia vida do folheto nos tratamentos testemunha e com fertilização mineral foi de 0,7 anos. A velocidade de decomposição do folheto pode variar de acordo com diversos fatores, como por exemplo: o regime pluviométrico, a temperatura e a umidade do ar e do solo, o vento, a energia radiante, os organismos decompositores e principalmente com a composição química e estrutural do folheto (MASON, 1980).

Vale ressaltar que os atributos “Constante de decomposição (K)” e “Tempo de meia vida ($T_{0,5}$)”, obtidos de acordo com as equações de Olson (1963), refletem a dinâmica do folheto no solo ao longo do tempo, à medida que o povoamento florestal caminha para um estado de equilíbrio dinâmico “steady state”.

Por sua vez, a utilização de bolsas destinadas ao estudo da decomposição do folheto, uma vez distribuídas sobre o solo (entre os componentes da serapilheira), possibilita averiguar a velocidade de decomposição do folheto durante um período específico dentro da escala de evolução do povoamento florestal. Assim sendo, a velocidade de decomposição do folheto específica do período de estudo (novembro/2007 a outubro de 2008) foi estimada, em cada um dos tratamentos, por meio de equações de regressão, ajustadas através dos dados da porcentagem de massa do folheto remanescente contido nas bolsas de decomposição (Figura 11).

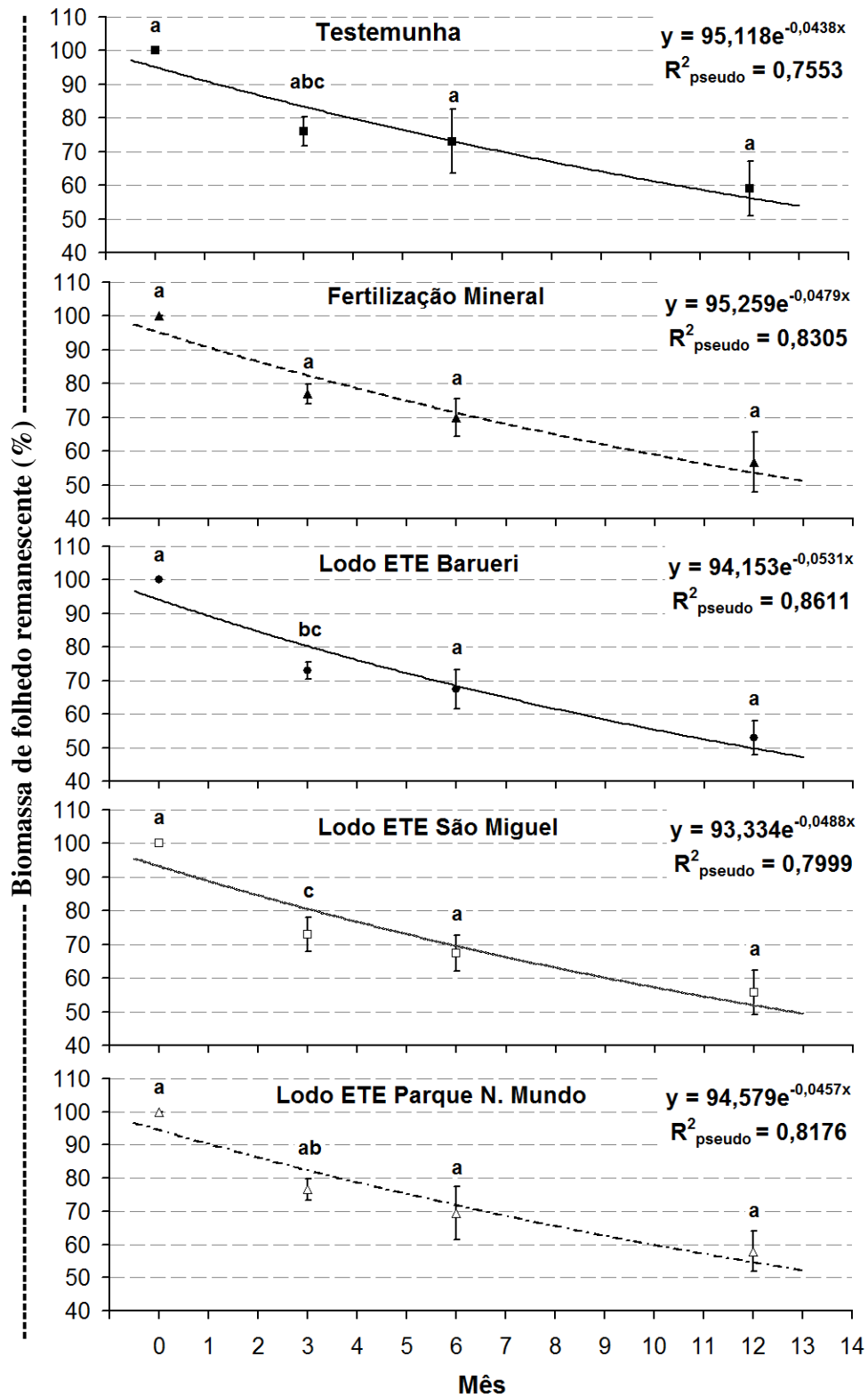


Figura 11 - Curva de decomposição do folheto de *Eucalyptus grandis* ao longo do ano de estudo (novembro/07 a outubro/08), nos diferentes tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Aducação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo

Nota: Para cada mês (vertical), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Três meses após a instalação das bolsas sobre o solo das parcelas experimentais, o tratamento com lodo da ETE de São Miguel apresentou a menor quantidade de folheto remanescente, quando comparado aos tratamentos com fertilização mineral ou com lodo de esgoto da ETE Parque N. Mundo. Em contrapartida, nos períodos de 6 e 12 meses, após a instalação das bolsas no campo, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre a quantidade de folheto remanescente nas bolsas de decomposição coletadas em cada um dos tratamentos testados.

Prescott et al. (1993), estudaram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em um plantio de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) com 70 anos de idade e verificaram que a taxa de decomposição das acículas durante o primeiro ano foi significativamente maior nas parcelas que receberam o lodo, quando comparada à decomposição observada no tratamento testemunha. Os autores comentam ainda, que após o segundo ano de estudo, a taxa de decomposição das acículas dentro das bolsas diminuiu significativamente nas parcelas com aplicação do lodo de esgoto, visto que a massa remanescente das acículas neste tratamento ficou semelhante à massa remanescente de acículas no tratamento controle. As diferenças verificadas entre a biomassa remanescente, no período de 3 meses após a instalação das bolsas, podem estar relacionadas à qualidade do material vegetal exposto a ação dos microrganismos decompositores e às condições climáticas que ocorreram na região ao longo do período de avaliação.

Neste sentido, é importante destacar que nos 3 primeiros meses, após a instalação das bolsas no campo (novembro/07 a janeiro/08), a precipitação e a temperatura média foram relativamente elevadas (203,7 mm e 23,8 °C respectivamente). Este fato pode ter favorecido a decomposição do folheto e potencializado as diferenças entre as biomassas remanescentes em cada um dos tratamentos testados.

A concentração dos nutrientes na biomassa remanescente de folheto contido dentro das bolsas decompositoras em cada um dos tratamentos pode ser visualizada na tabela 19. Aos 3 e 6 meses (momentos de coleta das bolsas de decomposição), a concentração de nitrogênio (N) no folheto remanescente do tratamento com lodo da ETE de Barueri foi cerca de 30% maior que a concentração de N no folheto remanescente do tratamento com fertilização mineral. Contudo, esta diferença provavelmente não resultou em uma relação C/N menor, o que poderia ter alterado a velocidade de decomposição do folheto, pois, ambos os tratamentos não apresentaram diferenças significativas quanto à biomassa de folheto remanescente nas bolsas.

Baker et al. (1990), estudaram a decomposição da serapilheira em plantio de *Pinus radiata*, após a aplicação de lodo de esgoto ao solo e verificaram que a concentração de nitrogênio nas acículas remanescentes foi, aos 6 e 12 meses após a instalação das bolsas de decomposição no campo, cerca de 30 a 40 % superior à concentração de N nas acículas remanescentes dentro das bolsas instaladas no tratamento testemunha.

Tabela 19 - Concentração de macronutrientes no folheto remanescente, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, aos 3, 6 e 12 meses após instalação das bolsas de decomposição no campo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	g Kg ⁻¹					
PERÍODO de 3 meses						
Testemunha	10,7 b	0,3 c	0,4 b	4,1 d	0,7 c	1,3 a
Fertilização mineral	10,1 b	0,3 c	0,5 ab	6,2 c	1,8 a	1,3 a
Lodo Barueri	12,4 a	0,6 a	0,5 a	7,2 bc	1,0 b	1,3 a
Lodo São Miguel	11,3 ab	0,4 b	0,4 ab	8,3 b	0,7 c	1,2 a
Lodo Parque N. Mundo	11,2 ab	0,5 a	0,5 ab	13,1 a	0,7 c	1,3 a
PERÍODO de 6 meses						
Testemunha	11,5 ab	0,4 b	0,4 b	3,4 d	0,5 c	1,6 a
Fertilização mineral	10,1 b	0,3 b	0,4 b	6,0 c	1,7 a	1,6 a
Lodo Barueri	13,0 a	0,7 a	0,5 a	6,5 c	0,9 b	1,5 a
Lodo São Miguel	12,4 a	0,5 ab	0,4 ab	8,1 b	0,6 c	1,5 a
Lodo Parque N. Mundo	11,2 ab	0,7 a	0,4 b	12,1 a	0,6 c	1,5 a
PERÍODO de 12 meses						
Testemunha	11,2 a	0,4 c	0,3 b	4,0 c	0,6 c	1,1 ab
Fertilização mineral	11,2 a	0,4 c	0,4 a	6,2 b	1,7 a	1,0 ab
Lodo Barueri	13,0 a	0,8 a	0,4 a	6,6 b	0,8 b	1,0 b
Lodo São Miguel	12,7 a	0,6 b	0,5 a	7,5 b	0,6 c	1,0 b
Lodo Parque N. Mundo	12,2 a	0,8 a	0,4 ab	12,5 a	0,6 c	1,1 a

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

A concentração de fósforo (P) no folheto remanescente dos tratamentos com lodo de esgoto, em todos os períodos avaliados, foi em média o dobro da concentração de P observada no folheto remanescente dos tratamentos com fertilização mineral e na testemunha. Provavelmente a maior concentração de fósforo no folheto remanescente dos tratamentos com lodo esteja

relacionada à maior disponibilidade deste elemento no solo, o que acarretou uma maior absorção pelas plantas e, conseqüentemente, maior concentração de P no folheto produzido pelos eucaliptos.

Nos três períodos avaliados, a concentração de cálcio (Ca) no folheto remanescente do tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo foi cerca de duas a três vezes maior do que à concentração de Ca nos tratamentos com fertilização mineral, com lodo da ETE de Barueri e na testemunha. Por sua vez, a concentração de magnésio (Mg) no folheto remanescente dentro das bolsas decompositoras do tratamento com fertilização mineral foi em média, nos três períodos avaliados, 170% maior que a concentração de magnésio no folheto remanescente nas bolsas dos demais tratamentos testados. Em ambos os casos, as concentrações de cálcio e magnésio no folheto remanescente denotaram estar diretamente relacionadas com a quantidade de cada um desses elementos adicionados ao solo nos diferentes tratamentos.

A concentração de micronutrientes no folheto remanescente nas bolsas decompositoras em cada um dos tratamentos testados pode ser visualizada na tabela 20. Em todos os períodos avaliados, a concentração de zinco no folheto remanescente nas bolsas decompositoras dos tratamentos com lodo de esgoto foi de 70 a 700% superior a concentração de zinco no folheto remanescente dos tratamentos testemunha ou com fertilização mineral. Vale ressaltar também, que a concentração de zinco em todos os tratamentos testados aumentou ao longo do tempo; principalmente no folheto remanescente nas bolsas dos tratamentos com lodo de esgoto.

Segundo Boardman e McGuire (1990), o grande atrativo para a aplicação de resíduos como, por exemplo, o lodo de esgoto em plantios florestais tem sido a absorção e retenção de elementos metálicos, como o zinco, pela madeira das árvores, evitando que este elemento adentre na cadeia alimentar humana. Os autores comentam ainda que a serapilheira das plantações florestais, entrando em estado de “equilíbrio dinâmico com o solo”, é capaz de adsorver quantidades significativas de zinco por muitos anos. Logo, as maiores concentrações de Zn encontradas no folheto remanescente dos tratamentos com lodo de esgoto estão diretamente relacionadas à quantidade de Zn adicionada ao solo, que acabou sendo absorvida pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto. Além disso, há também uma constante adsorção de Zn do solo pela serapilheira em via de decomposição acumulada no piso florestal.

Tabela 20 - Concentração de micronutrientes no folheto remanescente nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, aos 3, 6 e 12 meses, após instalação das bolsas de decomposição no campo

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg Kg ⁻¹ -----				
PERÍODO de 3 meses					
Testemunha	17 b	38 ab	4728 a	424 ab	17 d
Fertilização mineral	20 a	28 b	4938 a	302 c	13 d
Lodo Barueri	19 ab	40 a	3265 b	423 ab	77 a
Lodo São Miguel	18 ab	31 ab	3303 b	437 a	26 c
Lodo Parque N. Mundo	19 ab	32 ab	4108 ab	322 bc	46 b
PERÍODO de 6 meses					
Testemunha	14 b	43 ab	7900 a	359 ab	16 c
Fertilização mineral	19 a	31 b	6195 ab	286 b	15 c
Lodo Barueri	18 ab	51 a	4653 b	370 ab	88 a
Lodo São Miguel	17 ab	48 ab	4520 b	422 a	28 b
Lodo Parque N. Mundo	17 ab	43 ab	6405 ab	327 b	67 a
PERÍODO de 12 meses					
Testemunha	17 b	55 a	7685 a	375 ab	20 d
Fertilização mineral	19 ab	70 a	7190 a	322 b	18 d
Lodo Barueri	20 a	59 a	4229 b	487 a	134 a
Lodo São Miguel	20 a	51 a	4065 b	464 a	36 c
Lodo Parque N. Mundo	22 a	59 a	5641 ab	374 ab	74 b

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

A porcentagem dos nutrientes mineralizados (transferidos para o solo através da decomposição) ou imobilizados no folheto remanescente na manta florestal, nos diferentes tratamentos e períodos avaliados, pode ser observada na tabela 21. A menor porcentagem de nitrogênio e fósforo liberados para a solução do solo, devido à decomposição do folheto, foi observada, em todos os períodos avaliados, no tratamento com lodo da ETE de Barueri.

Guo e Sims (2002), ao estudarem a decomposição da serapilheira e a liberação de nutrientes em plantios de *Eucalyptus* sp. irrigados com efluente, constataram que a taxa de liberação de nitrogênio e fósforo pela decomposição do folheto no tratamento irrigado com efluente foi de aproximadamente 40% para ambos os nutrientes; resultado este que pode ser considerado similar às constatações efetuadas no presente trabalho.

Tabela 21 - Porcentagem de macronutrientes liberados (+) ou imobilizados (-) pelo folhodo remanescente nas bolsas de decomposição, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo, aos 3, 6 e 12 meses após instalação das bolsas decompositoras no campo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- % -----					
PERÍODO de 3 meses						
Testemunha	31,2 b	54,4 a	72,3 a	29,3 a	59,1 a	29,5 b
Fertilização mineral	46,0 a	53,8 a	65,0 c	10,0 b	48,7 c	23,0 c
Lodo Barueri	34,0 b	37,5 c	66,8 b	4,5 c	54,4 b	32,3 b
Lodo São Miguel	45,6 a	51,4 b	70,8 a	12,3 b	60,8 a	37,5 a
Lodo Parque N. Mundo	46,7 a	52,1 ab	65,1 c	-18,0 d	58,8 a	28,9 b
PERÍODO de 6 meses						
Testemunha	27,9 d	40,6 b	73,4 a	43,5 a	71,9 a	16,5 b
Fertilização mineral	51,1 a	58,1 a	74,6 a	20,9 b	56,0 d	14,0 b
Lodo Barueri	36,4 c	33,0 c	69,4 b	20,3 b	62,1 c	27,8 a
Lodo São Miguel	45,5 b	44,0 b	73,0 a	20,9 b	68,9 ab	27,8 a
Lodo Parque N. Mundo	51,9 a	39,7 b	74,7 a	1,1 c	67,9 b	25,6 a
PERÍODO de 12 meses						
Testemunha	42,2 c	52,8 a	83,9 a	46,3 a	72,7 a	52,2 c
Fertilização mineral	55,9 a	54,6 a	79,4 b	33,6 b	65,1 b	56,4 bc
Lodo Barueri	49,7 b	39,5 b	80,7 b	36,4 b	73,5 a	62,2 a
Lodo São Miguel	53,7 ab	44,2 b	72,1 c	39,4 ab	74,3 a	60,2 ab
Lodo Parque N. Mundo	56,1 a	42,1 b	78,9 b	16,4 c	73,3 a	54,5 c

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

Apesar de terem sido observadas diferenças significativas entre as porcentagens de potássio (K) liberado para o solo em cada um dos tratamentos, estas diferenças não apresentaram um padrão definido ao longo das avaliações. Contudo, vale destacar que desde o “período de 3 meses” (Tabela 21) a porcentagem de K liberada do folhodo para o solo, em todos os tratamentos foi relativamente alta (por volta de 70%). Gama-Rodrigues e Barros (2002), ao estudarem a ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucaliptos no sudeste da Bahia, verificaram nos primeiros 90 dias uma acentuada redução da concentração de potássio (aproximadamente 63%) no folhodo remanescente dos eucaliptos. Os mesmos autores relatam que a acentuada redução da concentração de potássio no folhodo remanescente indica que a

lixiviação seria um dos principais mecanismos de transferência do K para o solo, uma vez que ele não é componente estrutural de qualquer parte das plantas e a mineralização não é pré-requisito para a sua liberação no solo.

No “período de 3 meses” (Tabela 21), observou-se no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo, que o folheto remanescente imobilizou 18% de Ca e só passou a liberar cálcio para o solo a partir do “período de 6 meses” de decomposição; mesmo assim, esta porcentagem de Ca liberada foi significativamente menor quando comparada aos demais tratamentos. Costa, Gama-Rodrigues e Cunha (2005), estudaram a decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, adubados com fertilizante mineral e verificaram, que durante o período de decomposição do folheto houve uma ligeira liberação (7%) a até uma tênue imobilização de cálcio (5%) pelo folheto remanescente; mas, ao final do período de decomposição, houve liberação líquida entre 18 e 20% de Ca. Os resultados obtidos por Costa, Gama-Rodrigues e Cunha (2005) foram similares aos encontrados nesta pesquisa, o que pode ser atribuídos ao fato do cálcio ser um elemento pouco móvel nos tecidos vegetais, dificultando sua mineralização pelos microorganismos do solo.

A porcentagem de liberação ou imobilização dos micronutrientes contidos na biomassa do folheto remanescente, nos respectivos tratamentos, é apresentada na tabela 22. Os micronutrientes cobre, ferro e zinco no folheto remanescente apresentaram, ao longo dos períodos avaliados, porcentagens negativas o que significa que estes elementos foram retirados do solo ou do folheto acumulado adjacente e foram imobilizados no folheto remanescente dentro das bolsas de decomposição.

Nos três períodos avaliados, o tratamento que menos imobilizou Cu na biomassa do folheto remanescente foi a testemunha, com 83% do cobre vindo do sistema solo - serapilheira. Por outro lado, a porcentagem de ferro imobilizada pelo folheto remanescente nos tratamentos com fertilização mineral ou na testemunha foi maior, quando comparada à porcentagem de Fe imobilizada pelo folheto remanescente dos tratamentos com lodo de esgoto. Tais constatações podem estar relacionadas ao conteúdo e a qualidade da matéria orgânica, com maior ou menor estágio de decomposição, presente no solo em cada um dos tratamentos testados; pois, tanto o cobre quanto o ferro possuem alta afinidade pela matéria orgânica do solo e são comumente adsorvidos por ela, tornando-se indisponíveis para as plantas.

Tabela 22 - Porcentagem de micronutrientes liberados (+) ou imobilizados (-) pelo folheto remanescente nas bolsas de decomposição, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo, aos 3, 6 e 12 meses após instalação das bolsas decompositoras no campo

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- % -----				
PERÍODO de 3 meses					
Testemunha	49,2 a	-71,0 a	-1057,8 d	36,5 a	1,5 a
Fertilização mineral	50,1 a	-101,7 c	-1235,9 e	26,6 c	-9,4 b
Lodo Barueri	51,4 a	-109,9 c	-804,3 b	28,1 c	-233,4 e
Lodo São Miguel	51,1 a	-92,1 b	-734,8 a	35,7 a	-36,4 c
Lodo Parque N. Mundo	43,9 b	-85,6 b	-899,4 c	31,6 b	-115,2 d
PERÍODO de 6 meses					
Testemunha	58,6 a	-86,1 a	-1804,4 c	48,4 a	10,9 a
Fertilização mineral	56,5 ab	-98,1 a	-1422,3 b	36,9 c	-8,2 a
Lodo Barueri	57,4 a	-143,2 b	-1091,2 a	42,1 bc	-254,7 d
Lodo São Miguel	55,7 ab	-166,8 c	-956,8 a	42,8 ab	-36,3 b
Lodo Parque N. Mundo	52,9 b	-128,7 b	-1313,4 b	37,3 bc	-183,8 c
PERÍODO de 12 meses					
Testemunha	61,4 ab	-92,1 a	-1408,7 c	56,5 a	9,1 a
Fertilização mineral	64,9 a	-265,5 d	-1329,3 c	42,4 bc	-8,7 a
Lodo Barueri	62,1 a	-122,5 b	-750,7 a	40,1 c	-323,7 d
Lodo São Miguel	56,9 b	-136,1 bc	-686,5 a	48,1 b	-45,0 b
Lodo Parque N. Mundo	51,3 c	-164,3 c	-938,4 b	40,2 c	-158,2 c

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

Nos três períodos avaliados (3, 6 e 12 meses), os tratamentos com lodo de esgoto apresentaram as maiores porcentagens de zinco (Zn) imobilizadas no folheto remanescente disposto sobre o solo; tais porcentagens variaram de 36 a 324%. Guedes (2005), ao estudar a ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* adubados com lodo de esgoto (condicionado com cal), verificou que as porcentagens de imobilização do zinco na biomassa remanescente de folheto variaram de -112 a 182%, conforme a dose de lodo aplicada ao solo. A alta porcentagem de imobilização do Zn no folheto avaliado no presente estudo pode ser explicada pela elevada afinidade do zinco com a matéria orgânica do sistema solo-serapilheira; Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001), em solos arenosos e ácidos, a matéria orgânica é um

dos agentes principais na complexação do zinco, ao passo que os óxidos de alumínio, ferro e manganês parecem ter menor importância na sua imobilização no solo.

4.8 Alterações na fertilidade do solo

As alterações na fertilidade do solo ocorreram principalmente na faixa onde foram dispostos os lodos de esgoto (na linha de plantio), principalmente na camada mais superficial do solo entre 0 e 5 cm de profundidade (Tabela 23).

A aplicação do lodo de esgoto da ETE Parque N. Mundo na linha de plantio elevou o pH do solo, na camada de 0 a 5 cm de profundidade, em aproximadamente 2,0 unidades, quando comparado ao pH médio de 4,0 observado nos outros tratamentos. A cal hidratada (CaO) utilizada inicialmente no condicionamento do lodo de esgoto da ETE Parque N. Mundo, além de ter tido a função de aglutinar a matéria orgânica presente no lodo, acabou funcionando como um corretivo da acidez do solo.

Bezerra et al. (2002), ao estudarem o uso de lodo de esgoto em revegetação de área degradada, verificaram que diferentes doses de lodo (sem cal) aplicadas no solo reduziram significativamente o seu pH. Guedes et al. (2006) atribuem o efeito acidificante dos lodos de esgoto às reações de nitrificação, oxidação de sulfitos e produção de ácidos orgânicos. A diminuição ou o aumento do pH do solo, após a aplicação de lodo de esgoto, tem sido apontado em diferentes trabalhos da literatura, onde os autores relacionam as alterações do pH do solo com a natureza química de cada lodo de esgoto utilizado (alcalino ou ácido) (NAVAS; BERMÚDES; MACHÍN, 1998).

Os teores de matéria orgânica (M.O.) e de nitrogênio total (N_{total}) na camada de 0-5 cm de profundidade do solo, na linha de plantio, nos tratamentos com lodo de esgoto das ETEs de São Miguel e de Parque N. Mundo foram cerca de 100% a 200% superiores, respectivamente, aos teores de M.O. e de N_{total} observados nos tratamentos com fertilização mineral e na testemunha. A quantidade de C.O. e de N_{total} adicionada ao solo com a aplicação dos dois lodos de esgoto foi, em média, de 3.400 Kg ha⁻¹ e de 250 Kg ha⁻¹, respectivamente; o que certamente contribuiu para o aumento dos teores de M.O. e N_{total} no solo adubado com esses dois lodos de esgoto. 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 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em plantio de *Pinus ponderosa*, com 15 anos de idade, quando comparado aos teores de M.O. e de N_{total} no solo do tratamento controle.

Tabela 23 – Atributos químicos do solo, em diferentes profundidades e posições, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, 36 meses após a instalação do experimento

(continua)

TRATAMENTO	pH (CaCl ₂)	M.O g dm ⁻³	N _(total) ppm	P _(resina) ----- mg dm ⁻³ -----	S-SO ₄ ²⁻ -----
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (na linha)					
Testemunha	3,5 c	29 c	756 c	2 b	6 bc
Fertilização mineral	4,1 bc	37 bc	972 c	2 b	5 c
Lodo Barueri	3,7 c	53 ab	1464 bc	127 a	9 ab
Lodo São Miguel	4,3 b	67 a	2341 ab	102 a	13 a
Lodo Parque N. Mundo	6,4 a	69 a	2999 a	223 a	8 abc
PROFUNDIDADE de 5 – 10 cm (na linha)					
Testemunha	3,6 bc	23 a	...	1 c	6 b
Fertilização mineral	3,7 b	28 a	...	2 bc	5 b
Lodo Barueri	3,4 c	30 a	...	5 a	16 a
Lodo São Miguel	3,7 b	32 a	...	2 c	28 a
Lodo Parque N. Mundo	4,3 a	33 a	...	4 ab	7 b
PROFUNDIDADE de 10 – 20 cm (na linha)					
Testemunha	3,6 ab	21 a	...	1 b	9 c
Fertilização mineral	3,7 a	25 a	...	2 ab	4 d
Lodo Barueri	3,5 b	26 a	...	3 a	22 ab
Lodo São Miguel	3,6 ab	26 a	...	1 b	43 a
Lodo Parque N. Mundo	3,8 a	27 a	...	5 a	11 bc
PROFUNDIDADE de 20 – 40 cm (na linha)					
Testemunha	3,7 ab	18 b	600 a	1 a	7 b
Fertilização mineral	3,7 ab	22 ab	697 a	1 a	7 b
Lodo Barueri	3,6 b	22 a	684 a	2 a	47 a
Lodo São Miguel	3,7 ab	24 a	731 a	2 a	101 a
Lodo Parque N. Mundo	3,9 a	23 a	815 a	1 a	14 b
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (entre linhas)					
Testemunha	3,4 ab	31 b	870 a	2 a	6 a
Fertilização mineral	3,6 a	37 ab	960 a	2 a	6 a
Lodo Barueri	3,3 b	49 a	1244 a	3 a	5 a
Lodo São Miguel	3,4 ab	42 ab	1230 a	2 a	9 a
Lodo Parque N. Mundo	3,4 ab	45 ab	925 a	3 a	6 a

Tabela 23 - Atributos químicos do solo, em diferentes profundidades e posições, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, 36 meses após a instalação do experimento

(continuação)

TRATAMENTO	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺
	----- mmolc dm ⁻³ -----				
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (na linha)					
Testemunha	0,4 b	1 d	1 c	14 a	96 a
Fertilização mineral	0,4 b	10 c	9 a	8 b	62 ab
Lodo Barueri	0,5 ab	11 c	3 ab	11 ab	103 a
Lodo São Miguel	0,5 b	80 b	1 c	15 a	87 a
Lodo Parque N. Mundo	0,7 a	249 a	3 b	0 c	27 b
PROFUNDIDADE de 5 – 10 cm (na linha)					
Testemunha	0,2 bc	1 c	1 b	11 c	84 ab
Fertilização mineral	0,3 a	2 bc	4 a	11 c	88 ab
Lodo Barueri	0,3 ab	2 c	1 b	16 b	119 a
Lodo São Miguel	0,2 c	6 b	1 b	21 a	124 a
Lodo Parque N. Mundo	0,3 a	27 a	1 b	6 d	64 b
PROFUNDIDADE de 10 – 20 cm (na linha)					
Testemunha	0,3 a	1 c	1 b	12 bc	81 ab
Fertilização mineral	0,2 a	1 c	2 a	10 bc	86 ab
Lodo Barueri	0,2 a	1 c	1 b	15 ab	105 a
Lodo São Miguel	0,2 a	3 b	1 b	20 a	108 a
Lodo Parque N. Mundo	0,2 a	13 a	1 b	7 c	63 b
PROFUNDIDADE de 20 – 40 cm (na linha)					
Testemunha	0,1 a	1 c	1 a	10 bc	67 ab
Fertilização mineral	0,2 a	1 bc	2 a	10 bc	76 ab
Lodo Barueri	0,1 a	1 c	1 a	13 ab	90 ab
Lodo São Miguel	0,1 a	4 ab	1 a	17 a	98 a
Lodo Parque N. Mundo	0,2 a	9 a	1 a	7 c	54 b
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (entre linhas)					
Testemunha	0,4 a	1 c	1 b	16 a	106 ab
Fertilização mineral	0,4 a	3 a	4 a	14 a	82 b
Lodo Barueri	0,4 a	2 abc	1 b	21 a	150 a
Lodo São Miguel	0,3 a	1 bc	1 b	18 a	150 a
Lodo Parque N. Mundo	0,4 a	3 ab	1 b	16 a	131 ab

Tabela 23 - Atributos químicos do solo, em diferentes profundidades e posições, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, 36 meses após a instalação do experimento

(continuação)

TRATAMENTO	SB ----- mmolc dm ⁻³ -----	CTC	V%	m%
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (na linha)				
Testemunha	2,6 d	96,0 b	3 d	84 a
Fertilização mineral	18,9 c	98,5 b	20 c	27 b
Lodo Barueri	14,5 c	120,2 b	13 c	37 ab
Lodo São Miguel	80,5 b	168,3 b	48 b	16 b
Lodo Parque N. Mundo	252,7 a	396,7 a	84 a	0 c
PROFUNDIDADE de 5 – 10 cm (na linha)				
Testemunha	2,2 d	86,0 a	2 b	83 a
Fertilização mineral	5,5 bc	94,3 a	6 b	65 b
Lodo Barueri	3,0 cd	121,8 a	2 b	83 a
Lodo São Miguel	6,9 b	131,0 a	5 b	74 ab
Lodo Parque N. Mundo	21,0 a	88,1 a	26 a	27 c
PROFUNDIDADE de 10 – 20 cm (na linha)				
Testemunha	2,5 b	82,3 a	3 b	82 a
Fertilização mineral	3,5 b	87,9 a	4 b	74 a
Lodo Barueri	2,4 b	106,0 a	2 b	86 a
Lodo São Miguel	3,8 b	110,3 a	3 b	83 a
Lodo Parque N. Mundo	13,9 a	77,8 a	18 a	40 b
PROFUNDIDADE de 20 – 40 cm (na linha)				
Testemunha	2,2 c	68,2 b	3 b	82 a
Fertilização mineral	3,1 bc	77,0 ab	4 ab	75 ab
Lodo Barueri	2,1 c	90,7 ab	2 b	86 a
Lodo São Miguel	4,8 ab	102,3 a	4 ab	76 a
Lodo Parque N. Mundo	8,7 a	68,5 b	14 a	52 b
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (entre linhas)				
Testemunha	2,6 b	109,2 a	2 b	85 a
Fertilização mineral	7,7 a	118,8 a	7 a	65 b
Lodo Barueri	3,3 b	153,2 a	2 b	86 a
Lodo São Miguel	2,7 b	152,6 a	2 b	87 a
Lodo Parque N. Mundo	4,0 b	135,2 a	3 b	80 a

Tabela 23 - Atributos químicos do solo (Micronutrientes), em diferentes profundidades e posições, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo, 36 meses após a instalação do experimento

TRATAMENTO	(conclusão)				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
----- mg dm ⁻³ -----					
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (na linha)					
Testemunha	0,24 a	4,6 c	117 b	0,5 b	0,3 b
Fertilização mineral	0,27 a	6,3 bc	124 b	3,8 a	0,6 b
Lodo Barueri	0,23 a	20,0 ab	277 a	3,4 a	61,2 a
Lodo São Miguel	0,31 a	3,5 c	327 a	0,8 b	30,3 a
Lodo Parque N. Mundo	0,24 a	22,1 a	99 b	3,3 a	56,3 a
PROFUNDIDADE de 5 – 10 cm (na linha)					
Testemunha	0,23 a	0,7 c	74 b	0,3 b	0,2 b
Fertilização mineral	0,16 a	1,1 bc	94 ab	0,7 a	0,4 b
Lodo Barueri	0,21 a	2,1 ab	166 a	0,4 b	4,9 a
Lodo São Miguel	0,19 a	0,6 c	116 ab	0,2 b	2,6 a
Lodo Parque N. Mundo	0,20 a	2,8 a	82 ab	0,5 ab	1,7 b
PROFUNDIDADE de 10 – 20 cm (na linha)					
Testemunha	0,17 a	0,8 ab	78 a	0,3 ab	0,2 c
Fertilização mineral	0,13 a	1,0 ab	79 a	0,6 a	0,3 c
Lodo Barueri	0,14 a	1,8 ab	124 a	0,3 ab	3,0 a
Lodo São Miguel	0,15 a	0,8 b	104 a	0,2 b	1,8 ab
Lodo Parque N. Mundo	0,11 a	1,9 a	80 a	0,3 ab	0,8 b
PROFUNDIDADE de 20 – 40 cm (na linha)					
Testemunha	0,08 a	0,8 b	58 a	0,2 ab	0,1 b
Fertilização mineral	0,21 a	1,0 ab	62 a	0,4 a	0,2 b
Lodo Barueri	0,15 a	1,6 a	80 a	0,3 ab	1,7 a
Lodo São Miguel	0,08 a	0,9 ab	75 a	0,1 b	1,4 a
Lodo Parque N. Mundo	0,02 a	1,4 ab	62 a	0,2 ab	0,5 a
PROFUNDIDADE de 0 – 5 cm (entre linhas)					
Testemunha	0,20 a	2,6 a	215 a	0,7 b	0,5 b
Fertilização mineral	0,22 a	1,8 ab	211 a	2,8 a	0,5 ab
Lodo Barueri	0,22 a	1,8 ab	276 a	1,3 ab	1,1 a
Lodo São Miguel	0,22 a	0,9 b	224 a	0,9 b	0,5 b
Lodo Parque N. Mundo	0,21 a	1,4 ab	295 a	1,3 ab	0,6 ab

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

Sinais convencionais utilizados:

... Dado numérico não disponível

A concentração de fósforo resina, na camada de 0-5 cm do solo na linha de plantio, foi cerca de 50 vezes maior nos tratamentos com lodo de esgoto quando comparado aos tratamentos com fertilização mineral ou testemunha, cuja concentração de $P_{(resina)}$ no solo foi em média de 2 mg dm^{-3} . Vaz e Gonçalves (2002), ao estudarem os efeitos do uso de lodo de esgoto em povoamento de eucalipto sobre os atributos químicos do solo, não verificaram alteração dos teores de $P_{(resina)}$, na camada de 0-5 cm do solo, 6 meses após a aplicação do lodo de esgoto. Contudo, aos 13 meses após aplicação do lodo no solo, os mesmos autores constaram considerável elevação dos teores $P_{(resina)}$: os teores elevaram-se de 6 mg dm^{-3} , na testemunha, para 25 mg dm^{-3} , no tratamento que recebeu 40 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto. Em relação à fertilização mineral, o lodo de esgoto apresenta a vantagem de liberar lentamente os nutrientes contidos em sua composição para o solo; isto permite otimizar a absorção dos nutrientes pelas plantas e minimizar as perdas por lixiviação (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006).

A concentração de enxofre ($S\text{-SO}_4^{2-}$), em praticamente todas as camadas do solo avaliadas na linha de plantio, foi maior nos tratamentos com lodo da ETE de Barueri e da ETE de São Miguel, principalmente quando comparados aos tratamentos com fertilização mineral e testemunha, cuja concentração de $S\text{-SO}_4^{2-}$ foi até 10 vezes menor. Vale ressaltar ainda, que em todos os tratamentos, a concentração de $S\text{-SO}_4^{2-}$ aumentou com a profundidade. Similar ao presente estudo, Silva 2006 verificou aos 18 meses de idade dos eucaliptos maiores concentrações de $S\text{-SO}_4^{2-}$ no solo adubado com lodo de esgoto comparado ao solo com fertilização mineral; além disso, o mesmo autor verificou ainda que a concentração de $S\text{-SO}_4^{2-}$ elevou-se gradualmente com a profundidade do solo, independentemente do tratamento avaliado. Em ambos os casos, fica evidente a grande mobilidade do enxofre no solo, que em decorrência de sua carga negativa é menos atraído para a superfície da argila e da matéria orgânica, comparativamente aos cátions. Logo, o $S\text{-SO}_4^{2-}$ permanece, em grande parte, na solução do solo favorecendo sua rápida absorção pelas plantas ou sua lixiviação para as camadas mais profundas do solo (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006).

A maior concentração de cálcio na linha de plantio de todas as camadas avaliadas foi observada no solo adubado com lodo da ETE de Parque N. Mundo. Neste tratamento, a concentração de Ca^{2+} chegou a ser, na camada de 0-5 cm do solo, até 25 vezes maior do que a concentração de cálcio observada no solo com fertilização mineral. Por sua vez, a concentração de cálcio na camada de 0-5 cm do solo, na linha de plantio, no tratamento com o lodo da ETE de

São Miguel foi cerca de 8 vezes maior, quando comparada à concentração de Ca^{2+} no solo com fertilização mineral.

Além dos tratamentos com LPSM e LPNM terem adicionado ao solo quantidades de cálcio superiores à quantidade adicionada ao solo através da fertilização mineral; a fonte de Ca em cada um desses lodos foi um fator determinante para a disponibilidade deste elemento no solo. Como já foi mencionado, o lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo foi condicionado com cal virgem (CaO) e o lodo de esgoto da ETE de São Miguel possui em sua composição o sulfato de cálcio (CaSO_4), também conhecido por gesso agrícola, resultante dos despejos industriais misturados aos efluentes domésticos proveniente da zona urbana de São Miguel. A porcentagem de Ca na cal virgem é de 60% e o seu poder de neutralizante é de 150 a 175%. Ao passo que, a porcentagem de Ca no CaSO_4 é de 22%, além de não apresentar nenhum poder neutralizante da acidez do solo (VITTI; LIMA, CICARONE, 2006). O poder de neutralização é a capacidade potencial do corretivo em neutralizar ácidos; normalmente, é expressa em equivalente de carbonato de cálcio ($\% E_{\text{CaCO}_3}$) (ALCARDE; RODELA, 1996).

Em todas as camadas do solo, tanto na linha quanto na entre linha de plantio, a concentração de magnésio (Mg^{2+}) observada no solo com fertilização mineral foi de 2 a 9 vezes maior do que a concentração de Mg^{2+} observada nos demais tratamentos. Além do cálcio, a calagem com calcário agrícola fornece ao solo quantidades significativas de magnésio (MgCO_3). No caso do tratamento com fertilização mineral, a calagem adicionou cerca de 4 a 8 vezes mais Mg, se comparada à quantidade de magnésio adicionada ao solo com a aplicação dos lodos de esgoto. Apesar de a calagem ter sido efetuada no início do experimento, a ciclagem de magnésio em ecossistemas florestais perdura por muito tempo, uma vez que o magnésio tende a permanecer no ambiente florestal por muito tempo ciclando entre os diferentes compartimentos do ecossistema.

A capacidade de troca catiônica (CTC), na profundidade de 0-5 cm do solo na linha de plantio, foi no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo de duas a quatro vezes maior do que a CTC do solo dos demais tratamentos. A CTC é diretamente influenciada pelo teor de matéria orgânica presente no solo; visto que a M.O. contribui para a retenção de íons e para a capacidade de tamponamento das concentrações de H^+ na solução do solo (CANELLAS; SANTOS; SOBRINHO, 1999).

Na linha de plantio, a concentração de alumínio (Al^{3+}), $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ e a saturação por

alumínio (m%) foram, principalmente na camada de 0-5 cm do solo, significativamente menores no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo, quando comparadas aos demais tratamentos. Com a elevação do pH do solo, devido à adição da cal virgem utilizada no condicionamento do lodo da ETE de Parque N. Mundo, a solubilidade do alumínio (Al^{3+}) pode ter diminuído, fazendo com que este elemento viesse a precipitar na forma de $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (ROSSIELLO; NETTO, 2006). Conseqüentemente, a acidez potencial passou a patamares relativamente menores. Além disso, com a aplicação do lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo, o aumento da matéria orgânica no solo deve ter contribuído também para a diminuição da concentração do alumínio, na camada de 0-5 cm de profundidade na linha de plantio, visto que a M.O. do solo forma complexos com o Al^{3+} , deixando-o indisponível (BARROS; NOVAIS; NEVES, 1990).

Na entre linha, o tratamento com fertilização mineral apresentou menor concentração de Al^{3+} e H^+ e menor valor de m%, bem como maior soma de bases e saturação por bases, quando comparado aos tratamentos com lodo da ETE Barueri e da ETE de São Miguel; certamente, a calagem foi à principal responsável pela diminuição da concentração do Al^{3+} e H^+ e também pelo aumento da SB e V%.

A soma de bases (SB) e a saturação por bases (V%), para a maioria das profundidades avaliadas nas parcelas experimentais do tratamento com lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo foram superiores à SB e ao V% observadas no solo dos demais tratamentos. Tais resultados devem-se principalmente à elevada concentração de cálcio no solo do tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo, visto que o Ca chegou a representar cerca de 60% da saturação por bases. Guedes et al. (2006) também constataram maiores valores de SB e V% na camada de 0-30 cm do solo onde foram aplicadas diferentes doses de lodo de esgoto (tratado com cal), variando entre 0 e 160 Mg ha^{-1} .

A concentração de Cu no tratamento com lodo da ETE de Parque N. Mundo (LEPNM), principalmente na camada de 0-5 cm do solo, foi de duas a quatro vezes maior do que a concentração de cobre no solo dos tratamentos com fertilização mineral, adubação com LESM e testemunha. A concentração de cobre no solo parece estar relacionada a dois aspectos principais: a quantidade de cobre adicionada ao solo com a aplicação do lodo de esgoto e à velocidade de decomposição do lodo em contato com o solo. A aplicação do lodo da ETE de Parque N. Mundo adicionou ao solo cerca de 7 Kg ha^{-1} de Cu; ou seja, cerca de 5 vezes mais, se comparada à

quantidade deste elemento adicionada ao solo com a aplicação do lodo de esgoto da ETE de São Miguel. Segundo Stein et al. (2008), o tempo de meia vida do lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo é de 1,6 anos e o tempo de meia vida dos lodos das ETES de Barueri e São Miguel é, em média, de 3,8 anos. Portanto, o lodo da ETE Parque N. Mundo decompõe-se com maior velocidade e, conseqüentemente, libera uma maior quantidade de cobre num menor espaço de tempo em comparação aos demais lodos utilizados nesta pesquisa.

Em todas as profundidades avaliadas, na linha e entre linha de plantio, a concentração de manganês (Mn) no solo do tratamento com LSM foi de 3 a 5 vezes menor que a concentração de Mn no solo do tratamento com fertilização mineral. Segundo Dechen e Nachtigall (2006), devido aos diferentes graus de oxidação do manganês (Mn^{2+} , Mn^{3+} e Mn^{4+}) e à propriedade de passar com facilidade de uma forma para outra, o comportamento do Mn no solo é complexo.

Na linha de plantio, a concentração de zinco na profundidade de 0-5 cm, nos tratamentos adubados com lodo de esgoto, foi cerca de 100 vezes maior do que a concentração de Zn existente no solo dos tratamentos testemunha e fertilização mineral. Contudo, na camada entre 20 e 40 cm de profundidade, o zinco atingiu baixas concentrações, variando entre 0,5 e 1,1 mg dm⁻³. Bramryd (2001) estudou o efeito da aplicação de lodos de esgoto seco e úmido em floresta de *Pinus sylvestris* L. e encontrou na camada orgânica do solo cerca de 140 mg Kg⁻¹ de Zn, sendo 3 vezes maior do que à concentração de zinco na camada orgânica do solo do tratamento controle. Andrade e Mattiazzo (2000) estudaram a disponibilidade de metais pesados no solo, após aplicação de lodo de esgoto, em plantações de *Eucalyptus grandis* e verificaram um efeito significativo das doses de lodo sobre o teor de Zn, tanto nas camadas mais superficiais (0-10 cm de profundidade), como nas camadas mais profundas (60-90 cm). Segundo estes autores, o Zn foi o único elemento que apresentou movimentação no perfil do solo e se acumulou na camada entre 60 e 90 cm, devido à possível complexação por substâncias orgânicas solúveis.

Observa-se ainda na tabela 23, que as análises de solo cujas amostras foram retiradas das entrelinhas de plantio, evidenciaram poucas alterações significativas na camada superficial (0-5 cm) como, por exemplo, o aumento do teor de matéria orgânica nos tratamentos com lodo de esgoto e com fertilização mineral, bem como o aumento do teor de zinco no tratamento com LB. Estas alterações podem ser atribuídas ao efeito da maior produção de serapilheira e principalmente de folheto nestes tratamentos em relação à testemunha. Entretanto, os resultados evidenciam que a maior quantidade de nutrientes devolvidos ao solo através do ciclo

biogeoquímico poderá, em prazo mais longo, afetar positivamente a fertilidade do solo também nas entrelinhas de plantio.

4.9 Fitomassa e mineralomassa de raízes finas

A fitomassa de raízes finas foi avaliada apenas na faixa ao longo das linhas de plantio na profundidade de 0 a 20 cm, onde foram aplicados os lodos produzidos nas diferentes ETEs e a fertilização mineral convencional, conforme exposto no item 3.3.7.

Observa-se na figura 12, que a fitomassa de raízes finas ($\varnothing < 5$ mm), produzida no tratamento com lodo de esgoto da ETE Parque N. Mundo, foi significativamente superior à fitomassa de raízes finas produzida no tratamento com fertilização mineral em aproximadamente 1 g dm^{-3} .

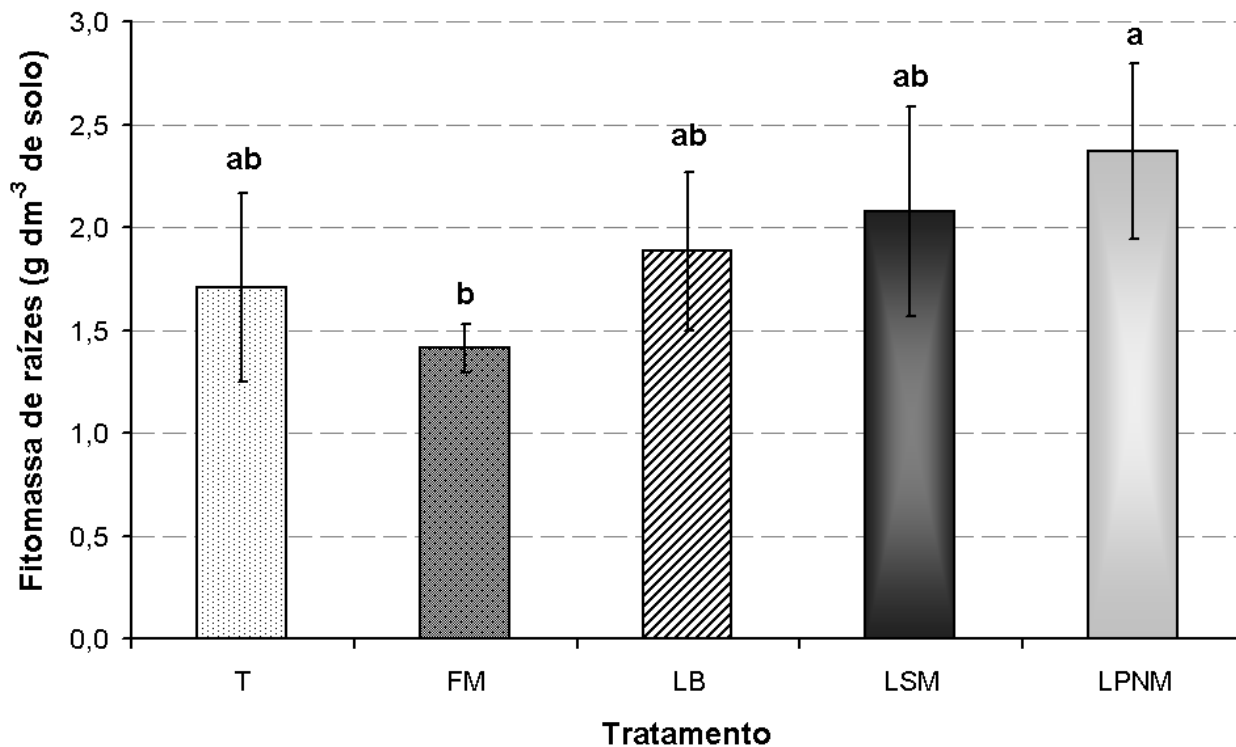


Figura 12 - Fitomassa seca de raízes finas presentes na camada de 0-20 cm do solo nos tratamentos: Testemunha (T), Fertilização Mineral (FM), Lodo ETE Barueri (LB), Lodo ETE São Miguel (LSM) e Lodo ETE Parque Novo Mundo (LPNM)

Nota: Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

No caso do tratamento com o lodo da ETE de Parque N. Mundo, três atributos do solo podem ter favorecido a maior produção de fitomassa de raízes finas: a maior concentração de

fósforo e cálcio no solo, a menor concentração de alumínio no solo e, possivelmente, a melhor estruturação do solo pela matéria orgânica adicionada através do lodo de esgoto (Tabela 23).

Vega et al. (2005), ao estudarem o sistema radicular da pupunheira adubada com lodo de esgoto, verificaram que a densidade radicular na linha de plantio aumentou significativamente de acordo com as doses de lodo de esgoto, chegando à densidade máxima de $3,22 \text{ g dm}^{-3}$, na dose 152 Mg ha^{-1} de lodo. Os autores atribuíram este resultado à melhora da porosidade do solo e da capacidade de armazenamento de água, que ocorreu devido à aplicação do lodo de esgoto. Segundo Zonta et al., (2006), o alumínio (Al^{3+}), quando em contato com as raízes, promove rapidamente a paralisação do seu crescimento, tornando-as atrofiadas em função da morte ou injúria do meristema radicular. Por outro lado, o fósforo promove o crescimento de raízes de segunda ordem e o cálcio aumenta o vigor e a sobrevivência das raízes (KOLESNIKOV, 1971 apud FREITAS; BARROSO; CARNEIRO, 2008).

Observa-se na tabela 24 que a concentração de fósforo (P) nas raízes finas produzidas no tratamento com lodo da ETE de Barueri foi cerca de 100% superior a concentração de P nas raízes finas produzidas nos tratamentos testemunha ou com fertilização mineral.

Tabela 24 - Concentração de macro e micronutrientes nas raízes finas de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	g Kg ⁻¹					
Testemunha	8,4 a	0,4 b	0,8 a	0,7 d	0,4 c	0,8 a
Fertilização mineral	10,3 a	0,5 b	0,5 b	1,3 c	1,1 a	1,1 a
Lodo Barueri	8,5 a	0,8 a	0,5 b	2,1 c	0,6 b	0,8 ab
Lodo São Miguel	9,1 a	0,6 b	0,5 b	4,2 b	0,3 c	1,0 a
Lodo Parque N. Mundo	7,4 a	0,6 ab	0,7 a	9,0 a	0,4 c	0,6 b

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg Kg ⁻¹				
Testemunha	9 c	30 ab	2699 ab	45 a	17 d
Fertilização mineral	14 b	39 a	6078 a	46 a	25 c
Lodo Barueri	22 a	29 ab	2631 ab	29 b	256 a
Lodo São Miguel	15 b	15 b	3697 ab	23 b	90 b
Lodo Parque N. Mundo	18 ab	16 b	1653 b	12 c	32 c

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

A concentração de cálcio (Tabela 24) nas raízes finas produzidas pelos eucaliptos, adubados com o lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo, foi de duas a dozes vezes maior do que a concentração de Ca nas raízes finas produzidas nos demais tratamentos. Fica evidente que a adição de cálcio ao solo, através da cal hidratada utilizada no condicionamento deste lodo, afetou consideravelmente a concentração de Ca nas raízes finas dos eucaliptos.

A concentração de magnésio (Mg) nas raízes finas produzidas no tratamento com fertilização mineral foi cerca de 2 a 3 vezes superior à concentração de Mg nos demais tratamentos. As maiores concentrações de magnésio observadas nos componentes dos eucaliptos sob efeito do tratamento com fertilização mineral podem ser atribuídas à adição de $MgCO_3$ ao solo, através da calagem com calcário agrícola.

A concentração de cobre (Cu) e manganês (Mn) nas raízes finas produzidas pelos eucaliptos adubados com lodo de esgoto da ETE de Parque N. Mundo ou com lodo de esgoto da ETE de São Miguel foi significativamente inferior às concentrações de Cu e Mn nas raízes finas produzidas no tratamento com fertilização mineral. O cobre e o manganês apresentam alta afinidade pela matéria orgânica do solo e, normalmente, tornam-se indisponíveis para as plantas, quando complexados pelo húmus (DECHEN; NACHTIGALL, 2006).

Por fim, a maior concentração de zinco (Zn) nas raízes finas foi observada nos tratamentos com lodo de esgoto. A concentração de zinco nas raízes finas produzidas no tratamento com lodo da ETE de Barueri foi 100 vezes superior à concentração de Zn observada nas raízes finas coletadas nos tratamentos com FM e testemunha. Foi também de 3 a 8 vezes maior que as concentrações de zinco nas raízes finas produzidas nos demais tratamentos com lodo de esgoto. Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001), freqüentemente o zinco se apresenta em maior concentração nas raízes finas em comparação aos órgãos vegetais acima do solo, como por exemplo, as folhas. Estes autores salientam ainda, que a concentração de zinco na planta é diretamente proporcional à quantidade de zinco disponível na solução do solo.

Na tabela 25 são apresentadas às concentrações dos metais pesados cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd), nas raízes finas dos eucaliptos adubados com lodo de esgoto e com fertilização mineral. Observa-se que a concentração de Ni nas raízes dos eucaliptos cultivados nos tratamentos com lodo de esgoto variou de 7,7 a 19,6 $mg\ Kg^{-1}$, ao passo que a testemunha e o tratamento com fertilização mineral não apresentaram vestígios deste metal.

Tabela 25 – Concentração de cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) nas raízes finas de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, nos tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETES da região metropolitana de São Paulo

TRATAMENTO	Cr	Ni	Pb	Cd
	----- mg Kg ⁻¹ -----			
Testemunha	1,35 a	0,00 c	0,96 a	0,00 a
Fertilização mineral	1,47 a	0,00 c	0,47 a	0,00 a
Lodo Barueri	2,67 a	19,65 a	1,61 a	0,10 a
Lodo São Miguel	2,67 a	18,72 a	0,77 a	0,05 a
Lodo Parque N. Mundo	2,45 a	7,76 b	0,23 a	0,01 a

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

Fuentes et al. (2007) estudaram o efeito do uso de lodo de esgoto na produção de mudas de *Pinus halepensis* e verificaram nas raízes das mudas adubadas com lodo de esgoto concentrações de Ni na ordem de 6,9 mg Kg⁻¹, ao passo que o controle apresentou apenas 2,8 mg Kg⁻¹. Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001), as concentrações de cromo, cádmio e chumbo nas plantas são diretamente proporcionais às concentrações desses elementos disponíveis na solução do solo. Estes elementos, ao serem absorvidos pelas plantas, acabam sendo acumulados em maior quantidade nas raízes, pois tendem a se ligar aos sítios de troca dos compostos ativos presentes na parede celular do tecido radicular.

Neste sentido, o estudo da dinâmica dos metais pesados no sistema solo-planta-serapilheira assume importância cada vez maior, principalmente quando se deseja avaliar as possíveis conseqüências da incorporação desses elementos nos diversos componentes dos vegetais (folhas, caules, raízes, frutos e sementes), considerando principalmente os eventuais perigos decorrentes de sua integração na cadeia alimentar.

4.10 Balanço de nutrientes e implicações silviculturais

O balanço de nutrientes apresentado na tabela 26 é o resultado da relação expressa em porcentagem entre a quantidade dos nutrientes adicionados ao solo nos diferentes tratamentos (Tabela 4) e a quantidade dos nutrientes estocados na madeira (Lenho+Casca) pelos eucaliptos, aos 42 meses de idade (Tabela 7). Corresponde, portanto, à porcentagem dos nutrientes que seriam exportados para fora do ecossistema florestal, caso fosse realizada a colheita da madeira aos 42 meses de idade dos eucaliptos.

Observa-se na tabela 26, que a quantidade de N, que seria exportada com a colheita da madeira dos eucaliptos adubados com fertilizante mineral, é quase igual à quantidade de N adicionada ao solo nas parcelas experimentais desse tratamento. Por outro lado, nos tratamentos com lodo de esgoto, a quantidade de nitrogênio exportada com a colheita da madeira corresponderia a aproximadamente 1/3 da quantidade de N adicionada ao solo. Logo, uma grande parte do nitrogênio adicionado ao solo com a aplicação dos lodos de esgoto permanece estocada, principalmente na camada superficial do solo ao longo da linha de plantio (Tabela 23), contribuindo provavelmente para a nutrição dos eucaliptos, inclusive para o subsequente ciclo de cultivo. Parte do nitrogênio poderá ser também lixiviado, ao longo do tempo, para as camadas mais profundas do perfil do solo.

No caso do fósforo e do cálcio, o balanço nutricional nos tratamentos com lodo de esgoto evidencia que mais de 80% da quantidade desses nutrientes adicionados podem ainda continuar estocados no solo do ecossistema florestal, mesmo após a colheita da madeira. Normalmente, o fósforo é rapidamente adsorvido pelos óxidos de ferro e alumínio do solo, até o momento em que ocorra a sua solubilização e posterior absorção pelas plantas. Por sua vez, o cálcio pode ser imobilizado na biomassa vegetal remanescente após a colheita (serapilheira, raízes, etc.).

Tabela 26 – Balanço de macro e micronutrientes (%), aos 42 meses de idade dos eucaliptos, para os tratamentos: Testemunha, Fertilização mineral e Adubação com lodo de esgoto produzido nas diferentes ETEs da região metropolitana de São Paulo.

TRATAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- % -----					
Fertilização mineral	88	12	27	12	10	-140
Lodo Barueri	16	3	24	15	17	7
Lodo São Miguel	34	4	21	6	36	6
Lodo Parque N. Mundo	31	3	26	7	20	10

TRATAMENTO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- % -----				
Fertilização mineral	17	22	...	...	2,7
Lodo Barueri	25	1	0,1	64	0,9
Lodo São Miguel	29	10	0,2	49	2
Lodo Parque N. Mundo	28	2	0,07	55	0,7

Segundo Merino et al. (2005), a produtividade de um plantio florestal só pode ser mantida a longo prazo, caso o capital de nutrientes do solo seja preservado, o que depende da existência de um certo equilíbrio entre as entradas e saídas dos nutrientes no ecossistema. Tendo por base esta premissa, os resultados do presente estudo indicam que o lodo de esgoto forneceria quantidade suficiente de nutrientes para o solo, a ponto de garantir o cultivo atual dos eucaliptos e até mesmo de alguns cultivos futuros, exceto em relação ao potássio, cuja concentração já é baixa no lodo de esgoto e que tende a ser em grande parte lixiviado quando aplicado ao solo (ROSOLEM et al., 2006).

O balanço nutricional dos micronutrientes nos tratamentos com lodo de esgoto ou com fertilizante mineral demonstra que apenas uma pequena quantidade desses elementos adicionados ao solo seria removida com a colheita dos troncos dos eucaliptos. Entretanto, deve ser lembrado que diversos metais pesados são incluídos na categoria de micronutrientes e que uma grande parte é fixada pela matéria orgânica do solo (PAGANINI; SOUZA; BOCCHIGLIER, 2004).

Apesar dos benefícios do uso florestal do lodo de esgoto, os resultados indicam também que a aplicação continuada do lodo em plantios de eucaliptos, sem que sejam devidamente contabilizados os estoques, bem como as novas entradas de nutrientes, pode acarretar o acúmulo de determinados nutrientes e metais pesados no ecossistema. Como resultado, poderá ocorrer queda da produção florestal pelo desbalanço nutricional nas árvores; além de injúrias ambientais, como por exemplo, a alteração da comunidade microbiana do solo.

Visando prevenir o efeito indesejável do uso do lodo de esgoto torna-se necessário, portanto, o monitoramento da relação entre as concentrações de nutrientes nas folhas dos eucaliptos (Tabela 10). Além disso, observa-se nesta pesquisa que a dose de lodo aplicada (15 Mg ha^{-1}) poderia ter sido menor (variando entre 5 a 10 Mg ha^{-1}), reduzindo assim o aporte de N, P e Ca nas parcelas experimentais; por outro lado, deveria ter sido aplicada uma dose maior de K e Mg com fertilização mineral complementar, considerando as baixas concentrações destes elementos nos lodos de esgotos das três ETEs.

Formas alternativas de manejo florestal também poderiam ser implementadas, visando exportar mais rapidamente, via colheita florestal, os nutrientes em excesso adicionados com o lodo de esgoto, principalmente N, P e Ca. Por exemplo, poderia ser sugerido o plantio dos eucaliptos em espaçamento mais reduzido (1m x 1m) e submetidos a regime de corte intensivo (minirotação), visando à produção de madeira principalmente para fins energéticos (POGGIANI;

COUTO; SIMÕES, 1979.), bem como a produção de óleo essencial a partir da colheita semestral das folhas dos eucaliptos também plantados em espaçamento adensado, conforme pesquisa realizada por Silva et al. (2009), que utilizou árvores de *Corymbia citriodora*, adubadas com lodo de esgoto.

Finalizando, é importante esclarecer que as pesquisas em curso, que visam estudar a aplicabilidade do lodo de esgoto em plantios agrícolas ou florestais, podem parecer sem uso imediato, entretanto geram novos conhecimentos e abrem caminhos para os próximos anos, quando a reciclagem dos resíduos e, principalmente do lodo de esgoto, se tornará uma questão ambiental primordial para a sustentabilidade do planeta.

5 CONCLUSÕES

1) Os lodos de esgoto produzidos nas estações de tratamento (ETEs) de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo, utilizados como adubos em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*, estimularam o incremento volumétrico das árvores em relação à testemunha (sem qualquer adubação), respectivamente em 84, 66 e 50%. Os dois primeiros resultados não diferiram significativamente do incremento volumétrico propiciado pela fertilização mineral convencional de 78%.

2) Os eucaliptos adubados com lodo de esgoto, independentemente da estação de tratamento (ETE) geradora, devido ao maior crescimento, acumularam maiores quantidades de nutrientes nos componentes do tronco (lenho + casca), principalmente cálcio e zinco na casca. Os estoques de nitrogênio no tronco dos eucaliptos adubados com os lodos de esgoto foram similares ao estoque de N nos troncos dos eucaliptos tratados com fertilização mineral. Em relação ao nitrogênio: os eucaliptos tratados com os lodos das ETEs Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo conseguiram fixar na fitomassa do tronco, no período de 4 anos, respectivamente 16, 34 e 31% do nitrogênio adicionado ao solo, através da aplicação do lodo.

3) A concentração dos nutrientes nas folhas apresentou diferenças mais acentuadas aos 6 meses de idade dos eucaliptos, quando os teores de N, P e Ca evidenciaram aumento significativo em relação à testemunha. Os tratamentos com lodo de esgoto também propiciaram o aumento da concentração dos micronutrientes Cu, Fe e Zn. Ao longo do tempo, até os 42 meses de idade, observou-se a tendência geral de redução da concentração de todos os nutrientes nas folhas dos eucaliptos em todos os tratamentos, fato que pode ser atribuído ao “efeito de diluição” dos elementos com o aumento da biomassa das árvores.

4) O solo corrigido pela calagem e adubado com fertilizante mineral proporcionou uma maior concentração foliar de magnésio e, conseqüentemente, estabeleceu uma melhor relação Ca/Mg, quando comparado principalmente com os eucaliptos adubados com lodo de esgoto da ETE de Parque Novo Mundo.

5) A aplicação dos lodos de esgoto das ETEs de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo e do fertilizante mineral nas parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* estimulou a produção de folheto pelas árvores, principalmente no período de maior precipitação de novembro a abril. Conseqüentemente, houve uma maior transferência de nutrientes das copas dos eucaliptos para a camada de serapilheira nos tratamentos acima mencionados. Observou-se, portanto, um o maior acúmulo de folheto sobre o piso florestal em relação ao tratamento testemunha. Foi observada também uma maior transferência de nutrientes do folheto acumulado para o solo, através do processo de decomposição das folhas mortas.

6) A aplicação da fertilização mineral e dos lodos de esgoto melhorou de maneira geral a fertilidade do solo na linha de plantio (ponto de aplicação), principalmente na camada entre 0 e 5 cm de profundidade. Foram observadas variações positivas, tais como: aumento do pH, da matéria orgânica, do nitrogênio total, do Ca^{2+} , do fósforo resina e dos micronutrientes. Em todos os tratamentos, onde foram aplicados os adubos, observou-se uma diminuição da concentração dos nutrientes com a profundidade, até se tornar semelhante à concentração observada no tratamento testemunha, entre 20 e 40 cm. Porém, nas entrelinhas de plantio, observou-se apenas um aumento significativo da matéria orgânica e do cálcio, na camada do solo de 0 a 5 cm de profundidade.

7) A adição dos lodos de esgoto das ETEs de Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo ao solo provocou poucas mudanças na produção de raízes finas pelos eucaliptos, inclusive quando comparadas ao tratamento testemunha. Contudo, a concentração de zinco e de níquel nas raízes finas dos eucaliptos variou de acordo com o tipo de lodo de esgoto utilizado.

8) A utilização do lodo de esgoto, quando tratado com cal virgem (Ex.: ETE Parque Novo Mundo), em função da dose aplicada, tende a elevar de forma excessiva o estoque de cálcio em todos os componentes do sistema solo-planta-serapilheira, podendo causar impactos prejudiciais ao ecossistema.

9) Quanto aos metais pesados, foi observada uma maior concentração destes elementos em comparação com o tratamento testemunha nas folhas: Cu, Zn e Ni; no folheto: Cu e Zn; no

solo: Cu e Zn na linha de plantio) e (Zn na entrelinha, apenas na camada de 0-5 cm); nas raízes finas: Zn e Ni.

10) O conhecimento prévio da concentração dos diferentes elementos no lodo de esgoto, antes de sua aplicação em plantios florestais, bem como o monitoramento nutricional das árvores e da ciclagem dos nutrientes no ecossistema como um todo, são práticas de fundamental importância para o bom manejo deste resíduo e do empreendimento florestal.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Avaliação química de corretivos de acidez para fins agrícolas: uma nova proposição. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, n. 2-3, p. 211-216, 1996.
- ALLOWAY, B.J. Soil processes and the behaviour of metals. In: ALLOWAY, B. J.(Ed.). **Heavy Metals in Soils**. New York, EUA: John Wiley, 1993. p. 7-28.
- ANDRADE, C.A. de; MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 59-72, dez. 2000.
- ANDRADE, C.A. de; OLIVEIRA, C. de; CERRI, C.C. Cinética de degradação da matéria orgânica de biossólidos após a aplicação no solo e relação com a composição química inicial. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 659-668, 2006.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S. Gestão de biossólidos: situação e perspectiva. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIODISSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1., 1998, Curitiba, **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p. 11-18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico 2009**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 23 out.2009.
- ASSUNÇÃO, J.C.B. de; SÍGOLO, J.B. Influência do ambiente tropical em lodos gerados na estação de tratamento de esgotos de Barueri-SP: comportamento dos metais pesados. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 355-364, dez. 1997.
- BAKER, T.G.; DYCK, W.J.; BARTON, P.G.; OLIVER, G.R.; NICHOLSON, G. Effect of irrigation with sewage effluent on decomposition of litter in *Pinus radiata* forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 31, n. 4, p. 205-214, 1990.
- BALIEIRO, F. de C.; FRANCO, A.A.; PEREIRA, M.G.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M. de; ALVES, B.J.R. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo, em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 597-601, jun. 2004.
- BARREIROS, R.M. **Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado**. 2005. 111p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais/Silvicultura e Manejo Florestal)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- 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.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F. (Org.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.

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.

BERG, B.; LASKOWSKI, R. **Advances in ecological research** - Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover. São Diego: Elsevier Academic Press, 2006. 428 p.

BEZERRA, F.B.; OLIVEIRA, M.A.C.L.; PEREZ, D.V.; ANDRADE, A.G.; MENEGUELLI, N. do A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 469-476, mar. 2002.

BOARDMAN, R.; McGUIRE, D.O. The role of zinc in forestry: I. Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 37, n. 1-3, p. 167-205, 1990.

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

BOEIRA, R.C.; SOUZA, M.D. de. Estoques de carbono orgânico e nitrogênio, pH e densidade de um latossolo após três aplicações de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 581-590, 2007.

BORGES, M.R.; COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. I - Fracionamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 557-568, 2004a.

BORGES, M.R.; COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. II - Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 557-568, 2004b.

BRAMRYD, T. Effect of liquid and dewatered sewage sludge applied to Scots pine stand (*Pinus sylvestris* L.) in Central Sweden. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 147, n. 2/3, p. 197-216, 2001.

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.

CAMPOS, F. da S. de; ALVES, M.C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1389-1397, 2008.

- CANELLAS, L.P.; SANTOS, G. de A.; SOBRINHO, N.M.B. do A. Reações da Matéria Orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-89.
- CHIBA, M.K.; MATTIAZZO, M.E.; OLIVEIRA, F.C. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto: II – Fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 653-662, 2008.
- COSTA, G.S.; GAMA-RODRIGUES, A.C. da; CUNHA, G. de M. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *eucalyptus grandis* no norte fluminense. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 563-570, 2005.
- 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.
- FERREIRA, C.R.R.P.T.; VEGRO, C.L.R. Fertilizantes: reversão dos excessos. **Análise e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 4, n. 5, 2009. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=10493>>. Acesso em: 10 nov.2009.
- FIXEN, P.E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 126, p. 8-14, jun. 2009.
- FRANCO-HERNÁNDEZ, O.; GONZALEZ-MCKELLIGAN, A. N.; LOPEZ-OLGUIN, A. M.; ESPINOSA-CERON, F.; ESCAMILLA-SILVA, E.; DENDOOVEN, L. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil amended with irradiated, pasteurized and limed biosolids. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 93–102, 2003.
- FREITAS, R.; SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W.; SPATHELF, P. Biomassa e conteúdo de nutrientes em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden plantado em solo sujeito a arenização, no município de Alegrete-RS. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 93-104, 2004.
- FREITAS, T.A.S. de; BARROSO, D.G.; CARNEIRO, J.G. de A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 133-142, 2008.
- FUENTES, D.; DISANTE, K.B.; VALDECANTOS, A.; CORTINA, J.; VALLEJO, V. R. Response of *Pinus halepensis* Mill. seedlings to biosolids enriched with Cu, Ni and Zn in three Mediterranean forest soils. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 145, n. 1, p. 316-323, 2007.
- GAMA-RODRIGUES, A.C. da; BARROS, N.F. Cielagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 193-207, 2002.
- GAMA-RODRIGUES, A.C. da; GAMA-RODRIGUES, E.F. da; BARROS, N.F. de. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1165-1179, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E.F. da; BARROS, N.F. de; VIANA, A.P.; SANTOS, G. de A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1489-1499, 2008.

GOLLEY, F.B. Nutrient cycling and nutrient conservation. In: GOLLEY, F.B. (Org.). **Tropical Rain Forest Ecosystems**. Georgia: Institute of Ecology University of Georgia Athens, 1983. p. 137-156.

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

GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M.R.P.; RAMALDES, D.L. da C.; FERREIRA, A.C.; TELES, C.R.; ANDREOLI, C.V. Desidratação de Lodo de Esgotos. In: ANDREOLI, C.V. (Org.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro, RJ: Rima, 2001. p. 57-86.

GONÇALVES, T.D. **Mapeamento de solos e de produtividade em plantações de *Eucalyptus grandis* na estação experimental de Itatinga, ESALQ, com uso de geoprocessamento**. 2003. 47 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

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.

GONGALVES, J.L. de M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONGALVES, J.L. de M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 1-57.

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.

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.

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**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006.

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: I. External effects. **Soil Biology & Biochemistry**, London, v. 33, n. 10, p. 1381-1388, 2001.

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**, London, 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.

ILHENFELD, R.G.K.; ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I. IV – Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C.V. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro, RJ: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999. p. 34-45.

JORDÃO, C. B. **Especiação e grau de saturação do fósforo em latossolo tratado com lodo de esgoto**. 2006. 83p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

JOSHUA, W.D.; MICHALK, D.L.; CURTIS, I.H.; SALT, M.; OSBORNE, G.J. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge/biosolids in a sheep grazing study, Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 84, n. 1/3, p.135-156, 1998.

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

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.

- KLEINPAUL, I.S.; SCHUMACHER, M.V.; BRUN, E.J.; BRUN, F.G.K.; KLEINPAUL, J.J. Suficiência amostral para coletas de serapilheira acumulada sobre o solo em *Pinus elliottii* Engelm, *Eucalyptus* sp. e floresta estacional decidual. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 965-972, 2005.
- KOEHLER, C.W.; REISSMANN, C.B. Macronutrientes retornados com a serapilheira de *Araucaria angustifolia* em função do sítio. In: Congresso Nacional sobre Essências Nativas, 2., v. 4, pt 2, 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto Florestal, 1992, p. 645-648.
- KOLM, L.; POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* submetidos à prática de desbastes progressivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 79-93, jun. 2003.
- KÖNIG, F.G.; SCHUMACHER, M.V.; BRUN, E.J.; SELING, I. Avaliação da sazonalidade da produção de serapilheira numa floresta estacional decidual do município de Santa Maria-RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 429-435, jul./ago. 2002.
- 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.; 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, 2009. In press.
- LIRA, A.C.S. de. **Lodo de esgoto em plantações de eucalipto: carbono, nitrogênio e espectos da fotossíntese**. 2006. 126p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- 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, L.F. da S. **Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido**. 2002. 73p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais/Manejo de Florestas de Produção)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- MASON, C.F. **Decomposição**. Tradução Octavio Antonio de Camargo. São Paulo: EPU/EDUSP, 1980. 63 p.
- MATTIGOD, S.V.; PAGE, A.L. Assessment of metal pollution in soil. In: THORNTON, I. (ed.) **Applied environmental geochemistry**. London: Academic Press, 1983. p. 355-394.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. Balanço nutricional, eficiência de utilização e avaliação da fertilidade do solo em P, K, Ca e Mg em plantios de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista IPEF**, Piracicaba, n. 48/49, p. 8-17, 1995.

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.

MERINO, A.; BALBOA, M.A.; SOALLEIRO, R.R.; GONZÁLEZ, J.G.A. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 207, n. 3, p. 325-339, 2005.

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

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

NAVAS, A.; BERMÚDEZ, F.; MACHÍN, J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 87, n. 1/2, p. 123-135, 1998.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Tradução Christopher J. Tribe. Rio de Janeiro: UFRJ, 1983. 434 p.

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.

OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, New York, v. 44, n. 2, p. 322-331, 1963.

PAGANINI, W.S.; SOUZA, A.; BOCCHIGLIER, M.M. Avaliação do comportamento de metais pesados no tratamento de esgotos por disposição no solo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 225-239, 2004.

PIRES, A.M.M. **Ácidos orgânicos da rizosfera: aspectos qualitativos e quantitativos e fitodisponibilidade de metais pesados originários de biossólido**. 2003. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

POGGIANI, F.; COUTO, H.T.Z.; SIMÕES, J.W. Aspectos ecológicos das minirotações e do aproveitamento dos resíduos florestais. **Circular Técnica (IPEF)**, Piracicaba, n. 74, p. 1-7, 1979.

POGGIANI, F.; MONTEIRO JUNIOR, E.S. Deposição de folheto e retorno de nutrientes ao solo numa floresta estacional semidecídua, em Piracicaba (Estado de SP). In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão, **Anais...** Campos do Jordão: KMK, 1990. v. 3. p. 596-602.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de bio-sólido 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.

POGGIANI, F. As florestas plantadas e a ecologia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 5, 2006. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=364>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

PRESCOTT, C.E.; McDONALD, M.A.; GESSEL, S.P.; KIMMINS, J.P. Long-term effects of sewage sludge and inorganic fertilizers on nutrient turnover in litter in a coastal Douglas fir forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 149-164, 1993.

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

PULITO, A.P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. 2009. 58p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais/Silvicultura e Manejo Florestal)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

QUEIROZ, L.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. **O eucalipto - Um século no Brasil**. São Paulo: Antonio Bellini Editora & Cultura, 2007. 127 p.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do Solo e Adubação**. Piracicaba: Ceres e Potafos, 1991. p. 343.

REIS, M. das G.F.; BARROS, N.F. de. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucaliptos. In: BARROS, N.F. de; NOVAIS, R.F. de (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 265-301.

REZENDE, C.I. de O. **Influência da aplicação do lodo de esgoto (bio-sólido) 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.

RICKLEFS, R.E. **A Economia da Natureza**. Tradução Patrícia Mousinho. Rio de Janeiro: IBICT/UFRJ, 2001. 503 p.

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

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).

ROSOLEM, C.A.; GARCIA, R.A.A.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.C. Lixiviação de potássio no solo de acordo com suas doses aplicadas sobre palha de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 813-819, 2006.

ROSSIELLO, R.O.P.; NETTO, J.J. XV – Toxicidade 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.

SCHONAU, A.P.G.; HERBERT, M.A. Relationship between growth rate and foliar concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium for *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n. 120, p. 19-23, 1982.

SCHUMACHER, M.V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 21-34, 1993.

SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. G. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

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, jan./fev. 2004.

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

SHANKS, R.E.; OLSON, J.S. First-year breakdown of leaf litter in southern appalachian forests. **Science**, Washington, v. 134, n. 3473, p. 194-195, 1961.

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.; MOREIRA, R.M. Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodo de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 79-88, mar. 2008a.

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

SILVA, P.H.M. da; POGGIANI, F.; STAPE, J.L.; BRITO, J.O.; MOREIRA, R.M. Produção de óleo essencial e balanço nutricional em *Corymbia citriodora* adubado com lodo de esgoto em diferentes espaçamentos. **Cerne**, Lavras, v.15, n. 3, p. 346-354, 2009.

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

SILVEIRA, R.L.V. de A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: Diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L. de M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2005. p. 79-104.

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.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. **Fatos e números do Brasil Florestal 2007**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>>. Acesso em: 23 outubro 2009.

SOUZA, J.A.; DAVIDE, A.C. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. **Cerne**, Lavras, v.7, n. 1, p. 101-113, 2001.

SPANGENBERG, A.; GRIMM, U.; SILVA, J.R.S.; FÖLSTER, H. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, n. 1/3, p. 225-234, 1996.

STEIN, L.M.; DEFAVARI, F.R.; SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F. Decomposição de biossólido procedente de três estações de tratamento de esgoto num plantio de *Eucalyptus grandis*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – SICUSP, 16, 2008, Piracicaba-SP. **Resumos...** Piracicaba: USP, 2008. 1 CD-ROM

STREET, H.E.; ÖPIK, H. **Fisiologia das angiospermas: crescimento e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 1974. 332p.

TAMANINI, C.R.; ANDREOLI, C.V.; MOTTA, A.C.V.; DOETZER, B.H.; PEGORINI, E.S. Estudo da utilização de altas doses de biossólido na recuperação de área decapada em São José dos Pinhais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande-MS, **Anais...** Campo Grande: SANEPAR/ABES, 2005. p. 1-16.

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.

TSUTYA, 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.

TSUTYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTYA, 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.

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

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.

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

VELASCO-MOLINA, M.; MATTIAZZO, M.E.; ANDRADE, C.A. de; POGGIANI, F. Nitrogênio e metais pesados no solo e em árvores de eucalipto decorrentes da aplicação de biossólido em plantio florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 25-35, ago. 2006.

VIEIRA, R.F.; SILVA, C.M.M. de S. Soil amendment with sewage sludge and its impacto on soil microflora. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 56-58, 2003.

VITAL, A.R.T.; LIMA, W. de P.; POGGIANI, F.; CAMARGO, F.R.A. de. Biogeoquímica de uma microbacia após o corte raso de uma plantação de eucalipto de 7 anos de idade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 55, p. 17-28, jun. 1999.

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.

ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucaliptos na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 843-852, 2004.

ZOGBI, O.E. Para não temer o apagão florestal. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 1, 2005. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=467>>. Acesso em: 12 nov. 2009.

ZONTA, E.; BRASIL, F. da C.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. da. II – O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.