

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

**Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade
do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação
de lodo de esgoto**

Paulo Henrique Müller da Silva

Dissertação apresentada, para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais. Área de concentração:
Silvicultura

PIRACICABA
2006

Paulo Henrique Müller da Silva
Engenheiro Florestal

**Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade
do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação
de lodo de esgoto**

Orientador:

Prof. Dr. **FÁBIO POGGIANI**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais. Área de concentração:
Silvicultura**

Piracicaba
2006

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

Silva, Paulo Henrique Müller da
Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo em plantios de
Eucalyptus grandis, após aplicação de lodo de esgoto / Paulo Henrique Müller da
Silva. - - Piracicaba, 2006.
117p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.
Bibliografia.

1. Biossólidos 2. Ciclos Biogeoquímicos 3. Eucalipto 4. Fertilidade do solo 5. Lodo de
esgoto 6. Madeira-Produção. I.Título

CDD 634.9734

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

AGRADECIMENTOS

- Ao Departamento de Ciências Florestais por possibilitar o desenvolvimento desta dissertação;
- À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), pelo financiamento do projeto de pesquisa;
- Ao Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) por possibilitar e apoiar o desenvolvimento deste estudo, com destaque ao diretor do Instituto o professor Luiz Ernesto G. Barrichelo;
- Ao professor Fábio Poggiani pela orientação;
- Aos professores Cassio H. Abreu Junior, José Leonardo M. Gonçalves, José Luiz Stape e José Otavio Brito, aos pesquisadores Jean Paul Laclau e Cristiano A. de Andrade e ao engenheiro Rildo Moreira Moreira pelas sugestões e apoio ao longo do curso de mestrado;
- Aos estudantes de iniciação científica que auxiliaram no projeto ao longo do tempo, com destaque ao acadêmico Felipe Rocha Defavari; e
- À minha família, principalmente, aos meus pais e à minha esposa.

O conhecimento científico e a filosofia têm belezas e valores incomparáveis, mas se não forem aplicados e incorporados são apenas enfeites.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1.1 Introdução.....	10
Geração e destinação do lodo de esgoto.....	10
Aplicabilidade do lodo de esgoto (biossólido) em plantações de eucaliptos	12
Movimentação dos nutrientes no ecossistema florestal.....	13
Efeitos de diferentes tipos de lodo.....	16
Referências	18
2 Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de <i>Eucalyptus grandis</i> fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco.....	22
Resumo	22
Abstract.....	22
2.1 Introdução.....	23
2.2 Material e métodos	25
Descrição da Área experimental.....	25
Delineamento experimental e tratamentos	25
Avaliação do incremento volumétrico dos eucaliptos.....	28
Determinação da concentração de nutrientes nas folhas dos eucaliptos	28
Análise Estatística	28
2.3 Resultados e discussão	29
Efeito das doses crescentes de biossólidos no incremento volumétrico dos eucaliptos.....	29
Efeito das doses crescente de biossólidos na concentração de nutrientes nas folhas.....	30
2.4 Conclusões.....	36
Referências	36
3 Crescimento de <i>Eucalyptus grandis</i> tratado com doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco	40
Resumo	40
Abstract.....	41
3.1 Introdução.....	41
3.2 Material e métodos	45
Descrição da área experimental.....	45
Situação geográfica.....	45
Clima	45
Solo e vegetação natural.....	45
Plantio e tratamentos silviculturais no talhão experimental.....	46
Delineamento experimental e tratamentos	46

Crescimento das árvores	48
Análise dos dados	49
3.3 Resultados e discussão	49
3.4 Conclusões.....	55
Referências	55
4 Influências da aplicação de lodos de esgoto úmido e seco sobre a ciclagem dos nutrientes em povoamentos experimentais de <i>Eucalyptus grandis</i>	58
Resumo	58
Abstract.....	58
4.1 Introdução.....	59
4.2 Material e métodos	63
Descrição da área experimental.....	63
Solo e vegetação natural.....	64
Plantio e tratos silviculturais no talhão experimental.....	65
Delineamento experimental e tratamentos	65
Crescimento das árvores.....	67
Concentração dos nutrientes nas folhas dos eucaliptos	67
Produção e análise mineral do folheto.....	68
Composição química do folheto	68
Acúmulo e decomposição do folheto sobre o solo	68
Decomposição do folheto em condições de campo.....	69
Retranslocação dos macronutrientes nas folhas	69
Análise dos dados	70
4.3 Resultados e discussão	70
Volume sólido de madeira dos eucaliptos	70
Concentração dos nutrientes nas folhas.....	71
Folheto produzido.....	75
Devolução dos nutrientes via folheto	75
Decomposição do folheto	78
Folheto acumulado sobre o solo	79
Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo.....	80
Retranslocação dos macro-nutrientes	82
4.4 Conclusões.....	83
Referências	84
5 Alterações dos atributos químicos do solo em plantios de <i>Eucalyptus grandis</i> após a aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco.....	87
Resumo	87
Abstract.....	87
5.1 Introdução.....	88
5.2 Material e métodos	89

Descrição da área experimental.....	89
Descrição da área e dos tratos silviculturais no talhão experimental.....	91
Delineamento experimental e tratamentos.....	91
Estudos realizados.....	92
Crescimento das árvores.....	92
Análise estatística.....	93
5.3 Resultados.....	94
Produtividade.....	94
Fertilidade do solo.....	94
5.4 Conclusões.....	110
Referências.....	110
REFERÊNCIAS.....	112

RESUMO

Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação de lodo de esgoto.

Poucos municípios brasileiros têm estações de tratamento de esgoto (ETEs), sendo que uma grande parte do esgoto ainda não é tratada, causando forte impacto ambiental devido ao seu despejo “in natura” nos cursos de água. O processo de tratamento de esgoto gera grande quantidade de lodo cujo destino final deve ser bem planejado, pois acarreta além de conseqüências ambientais, conseqüências de caráter econômico, social e sanitário. Um destino ecologicamente desejável seria a utilização desse resíduo, depois de tratado (biossólido), em plantios florestais como fertilizante e condicionador de solo. Mas, ainda são poucos os conhecimentos disponíveis para que a sua utilização seja realizada em larga escala. Recentemente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através de resolução específica estabeleceu critérios e procedimentos para o uso de lodo de esgoto em áreas agrícolas, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente. Conseqüentemente, amplia-se agora a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o assunto. Esta pesquisa teve como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre a influência da utilização de lodo de esgoto nas plantações florestais. Em abril de 2003, foi implantado um experimento na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga com a finalidade de estudar o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* tratadas com doses crescentes dos lodos úmido (torta) e seco (granulado) e, principalmente, a ciclagem de nutrientes no ecossistema, através de observações relacionadas com os processos de produção, acúmulo e decomposição da serapilheira nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos. Supõe-se que a aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco nas linhas de plantio dos eucaliptos altere de maneira positiva a fertilidade do solo, incrementando significativamente o volume de madeira produzida pelos eucaliptos, servindo como fontes de nutrientes, portanto, o uso do lodo permitiria a substituição das adubações nitrogenada e fosfatada, usualmente aplicadas nos plantios florestais, e poderia suprir também a necessidade da aplicação de micronutrientes (exceto o boro). Também a aplicação dos lodos úmido e seco deve refletir de maneira positiva na ciclagem de nutrientes, alterando a quantidade e a velocidade da transferência dos diferentes elementos entre os compartimentos do sistema Árvores – Serapilheira - Solo.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, biossólido, plantação florestal, ciclagem de nutrientes e *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT

Wood production, nutrient cycling and soil fertility in *Eucalyptus grandis* stand after sewage sludge application.

Several Brazilian cities have sewer treatment stations, but a lot of cities do not treat the sewage yet, causing a strong environmental impact, mainly in water courses. The sewer treatment process generates a big amount of sewage sludge, so the final destination must be well studied, because it involves environmental, economic, social and sanitary consequences. A good destination of this residue would be its application, after treated (biosolids), in forest stands for fertilizing and conditioning of soil. Recently, CONAMA (National Advice of the Environment) established procedures and criteria for the use in agricultural areas of sewage sludge for benefits to agriculture and preventing risks to the health and the environment. Consequently, more scientific information will be necessary for sewage sludge application on a large scale. The aim of this study was to extend the knowledge about the influence of sewage sludge (humid and dry) on eucalypts plantations. So in April 2003, an experimental stand of *Eucalyptus grandis* was planted in the Experimental Station of Itatinga (ESALQ/USP). The purpose was to study the growth of the eucalypts, treated with increasing doses of humid and dry sewage sludge, and also the nutrients cycling in the forest plantation ecosystem through the production, accumulation and decomposition of the leaf-litter in the different treatments. It is expected that application of humid and dry sewage sludge in the rows of planting may modify positively soil fertility, wood volume produced by eucalypts, and nutrient cycling in the ecosystem.

Key-words: Sewage sludge, biosolids, forest plantation, nutrients cycling, and *Eucalyptus grandis*

1.1 Introdução

Geração e destinação do lodo de esgoto

O tratamento sanitário do esgoto nas estações de tratamento (ETEs) produz um resíduo sólido denominado lodo de esgoto ou biossólido. Este resíduo, devido ao contínuo aumento populacional, observado nas áreas urbanas, poderá transformar-se num problema crescente. A disposição final do lodo de esgoto representa um ponto crucial para a operação eficiente e contínua de uma estação de tratamento. De acordo com Tsutiya (2000), o processo de separação das impurezas presentes no esgoto (cerca de 1 a 2% do volume total) corresponde de 20 a 40 % do custo operacional de uma estação de tratamento de esgoto.

O lodo produzido no tratamento de esgoto (fração sólida) pode ter diferentes destinos, podendo ser depositado em aterros sanitários, utilizado como fertilizante em agroecossistemas ou incinerado. Entretanto, para as condições brasileiras, supõe-se que a melhor opção seria sua utilização nas áreas agrícolas. Especialmente, sua aplicabilidade em plantações florestais parece ser uma das alternativas mais indicadas, considerando os aspectos sanitários, ambientais, silviculturais, sociais e econômicos (POGGIANI e SILVA, 2005). Estados Unidos, Canadá e diversos países europeus, há mais de vinte anos, utilizam esse resíduo como fertilizante agrícola e florestal. Mas, no Brasil, o lodo de esgoto é despejado diretamente em aterros sanitários, gerando um impacto ambiental indesejável e caro para os municípios. De acordo com Ludovice (2000), o potencial agrônomo do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor. Os principais cuidados estão relacionados à saúde pública, devido ao risco do acúmulo de nitratos, metais pesados e à presença de agentes patogênicos geralmente existentes no lodo. O lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos sanitários deve ser processado de modo a permitir o seu manuseio de forma segura na utilização agrícola. Outro fator importante é a metodologia a ser utilizada para a correta aplicação do lodo nos sistemas agroflorestais com a finalidade de não causar danos ao ambiente e ao homem.

Li et al. (2002) citam que a utilização do lodo de esgoto, por conter matéria orgânica, nitrogênio e fósforo pode promover o aumento do crescimento das plantas devido à melhoria na fertilidade do solo. Mas, esses autores constataram um aumento de Pb (metal pesado) residual no

solo, conforme a dosagem de lodo aplicada. No entanto, para outros metais pesados não registraram aumento significativo.

Fjällborg et al. (2005) citam que o lodo é uma fonte orgânica de nutrientes, mas os metais presentes no lodo podem acumular-se no solo devido às repetidas aplicações e, dependendo das concentrações, podem tornar-se tóxicos aos microrganismos, às plantas e aos animais. Vieira e Silva (2003) estudaram o efeito, na atividade microbiana, de freqüentes aplicações de lodo ao solo e observaram que a utilização de doses excessivas de lodo pode prejudicar a microflora do solo.

De acordo com Gobatto (2003), a disposição agrícola ou florestal do biossólido, mesmo incluído os custos de transporte até 100 km, é mais vantajosa pelo aspecto econômico do que as outras alternativas de disposição (aterro sanitário e incineração).

A fração líquida do tratamento do esgoto (denominada de água de reuso), que corresponde à maior parte do volume do esgoto, não está sendo abordada neste estudo, mas de acordo com Jamal et al. (2002), pode ser utilizada para a irrigação de plantios florestais, parques, jardins e campos de golfe, entre outros, visto que apresenta vantagens (principalmente econômicas) em relação à água usualmente utilizada para esses fins.

Selivanovskaya et al. (2003) sugerem que um método para inverter a degradação e melhorar a qualidade do solo é a adição de matéria orgânica e concluem que o uso de lodo de esgoto em culturas pode ter efeito positivo, aumentando o crescimento das plantas, sendo uma excelente alternativa de disposição.

A utilização de lodo em plantios florestais difere positivamente em relação às culturas agrícolas, visto que a matéria prima gerada nestes ecossistemas não se destina ao suprimento de alimentos para a sociedade.

Por outro lado, os solos utilizados geralmente para as plantações florestais apresentam baixa fertilidade, o que leva a um melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e a menores perdas por lixiviação. Também, deve ser assinalado, que os ciclos das culturas florestais são mais longos (5 a 7 anos), permitindo, dessa forma, maiores intervalos entre as aplicações do lodo ao solo.

Henry e Cole (1997) relatam que, na década de 70, já existiam estudos da aplicação de resíduos orgânicos em florestas localizadas em diversas partes do mundo. Esses estudos investigavam o desenvolvimento de técnicas de aplicação, avaliação do crescimento e dos

impactos ambientais gerados pela aplicação desse resíduo. Harrison et al. (2003), em ampla revisão sobre o uso de biossólidos em sistema agroflorestais, assinalam que diversas pesquisas foram realizadas sobre o crescimento das plantas em resposta à aplicação de lodo de esgoto e o aumento na produtividade das espécies florestais tem sido relatado em trabalhos realizados tanto no Brasil como no exterior. Principalmente no estado de Washington (EUA) bons resultados foram obtidos em plantios de coníferas (HARRISON et al., 1994; HENRY et al., 1993)

Segundo Poggiani et al. (2000), o lodo de esgoto apresenta vantagens em relação à adubação mineral devido à forma lenta e contínua de liberação dos nutrientes para o solo e para o sistema radicular das árvores. Em culturas de ciclos longos, essa liberação lenta torna-se vantajosa. Souza Vaz e Gonçalves (2000) pesquisaram o efeito da aplicação do lodo de esgoto em plantações de eucaliptos sobre a fertilidade do solo, detectando significativas modificações onde o lodo de esgoto havia sido aplicado em diferentes doses, variando entre 5 e 40 toneladas por hectare. Em plantio de *Eucalyptus grandis*, Rocha (2002) concluiu que a fertilidade do solo elevou-se gradualmente depois da aplicação do lodo de esgoto e que as plantas tratadas também responderam positivamente, evidenciando maiores ganhos de produtividade em relação à adubação convencional. De acordo com Souza Vaz (2000), a resposta à aplicação do lodo de esgoto foi mais evidente com o passar do tempo, refletindo seus efeitos (elevada disponibilidade de nutrientes às árvores) no decorrer de sua decomposição. McNab e Bery (1985), estudando aplicação de lodo de esgoto em plantio florestal, observaram que o tratamento com aplicação de lodo propiciou maior incremento volumétrico, comparativamente ao tratamento com adubação mineral. Guedes (2005) observou que os efeitos da aplicação do lodo de esgoto produzido na ETE de Barueri da SABESP e tratado com cal hidratada e cloreto férrico foram detectados ao longo de todo o ciclo de crescimento dos eucaliptos.

Kimberley et al. (2004) observaram que a aplicação do lodo pode aumentar significativamente os retornos econômicos de uma plantação florestal devido à maior produtividade obtida que compensa, dessa forma, os custos de transporte e aplicação do resíduo.

Aplicabilidade do lodo de esgoto (biossólido) em plantações de eucaliptos

De acordo com Mora e Garcia (2000), o eucalipto devido à sua adaptação, produtividade e destinação para diversos usos, tem sido a essência florestal amplamente empregada no Brasil. Existem plantações desde o Rio Grande do Sul até a Região Amazônica, não havendo limitações para o seu cultivo.

O eucalipto no Brasil se destina principalmente à produção de celulose e papel e também de carvão vegetal que abastece as siderúrgicas. Entretanto, o eucalipto também é utilizado na produção de móveis, construção civil, obtenção de óleos essenciais, entre outros usos.

Poggiani (1985) evidenciou que em plantios de eucaliptos o lenho do tronco apresenta baixas concentrações de nutrientes em relação aos outros componentes das árvores (folhas, ramos e casca). Entretanto, o lenho corresponde a aproximadamente 85% da biomassa total acumulada no povoamento florestal e, desse modo, elevadas quantidades de nutrientes são exportados ao final do ciclo, por ocasião da colheita florestal. Esse autor constatou em plantios comerciais que a exploração apenas dos troncos das árvores de *Eucalyptus saligna*, aos 10 anos de idade, provocou a exportação de 137 kg de N, 42 kg de P, 163 kg de K, 714 kg de Ca e 46 kg de Mg por hectare.

O eucalipto, por apresentar alta taxa de crescimento e exportar grandes quantidades de elementos químicos por ocasião da colheita, poderia se tornar uma das espécies mais indicadas a serem utilizadas nos processos de fitorremediação.

Pelo fato da descontaminação do solo através de plantas (Fitorremediação) ser uma técnica recente, no Brasil ainda são poucos os trabalhos publicados sobre as espécies com as características mais apropriadas para esta finalidade e não existem referências na legislação vigente. Em estudo realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga, os eucaliptos aos sete anos de idade, adubados com 10 toneladas de biossólido por hectare, haviam incorporado em sua biomassa lenhosa praticamente todo o nitrogênio adicionado pela adição do resíduo (POGGIANI, 2006).

Movimentação dos nutrientes no ecossistema florestal

A ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais (Figura 1.1) pode ser estudada através de três diferentes ciclos. Pritchett (1979) e Neves et al. (2001) consideram que:

1- *Ciclo geoquímico* diz respeito às entradas e saídas de nutrientes que ocorrem num ecossistema. As principais entradas se dão através do intemperismo da rocha matriz, da precipitação e deposição atmosférica, da fixação simbiótica e não simbiótica de nitrogênio e da aplicação de fertilizantes. As saídas podem ocorrer através dos processos de erosão, lixiviação, volatilização e exploração florestal;

2- *Ciclo biogeoquímico* compreende os processos de transferência dos nutrientes dentro do sistema solo-planta-serapilheira. O processo inicia-se com a absorção dos elementos pelas

raízes e sua incorporação na biomassa arbórea, arbustiva e herbácea. O retorno de nutrientes contidos na biomassa para o solo ocorre principalmente através da produção da serapilheira e principalmente do folhedo (fração de folhas da serapilheira). A movimentação dos nutrientes através do ciclo biogeoquímico é especialmente importante em solos altamente intemperizados onde a biomassa vegetal é o principal reservatório de nutrientes, como é o caso das florestas tropicais;

3- *Ciclo bioquímico* engloba as transferências internas dos nutrientes entre os diferentes componentes das árvores (raízes, folhas, ramos, lenho e casca), incluindo a reciclagem dos nutrientes dos órgãos senescentes para os tecidos em formação, especialmente das folhas. Este ciclo é mais importante para os nutrientes com alta mobilidade como, por exemplo, os elementos: nitrogênio, fósforo, potássio e magnésio, sendo de menor significado para os nutrientes que apresentam movimentação limitada, como o cálcio e o boro.

Independentemente do tipo de floresta, seja natural ou implantada, nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas, a maior parte dos nutrientes está contida nas folhas. Entretanto, à medida que as folhas se tornam senescentes, os teores dos nutrientes se modificam, ocorrendo sua redistribuição entre os diferentes tecidos das plantas em fase ativa de crescimento.

A produção de folhedo em florestas (queda das folhas caducas) é considerada uma das mais importantes formas de transferência dos nutrientes do compartimento constituído pela biomassa arbórea para o compartimento da manta florestal (serapilheira acumulada sobre o solo). Cerca de 60 a 80% da transferência de nutrientes da biomassa florestal para o solo ocorre através da deposição do folhedo. O folhedo, portanto, constitui-se num componente fundamental na regulação do estoque de matéria orgânica que integra a camada superficial do solo, principalmente em sítios de baixa fertilidade onde, de acordo com Caldeira et al. (1999), o papel do ciclo biogeoquímico torna-se ainda mais importante.

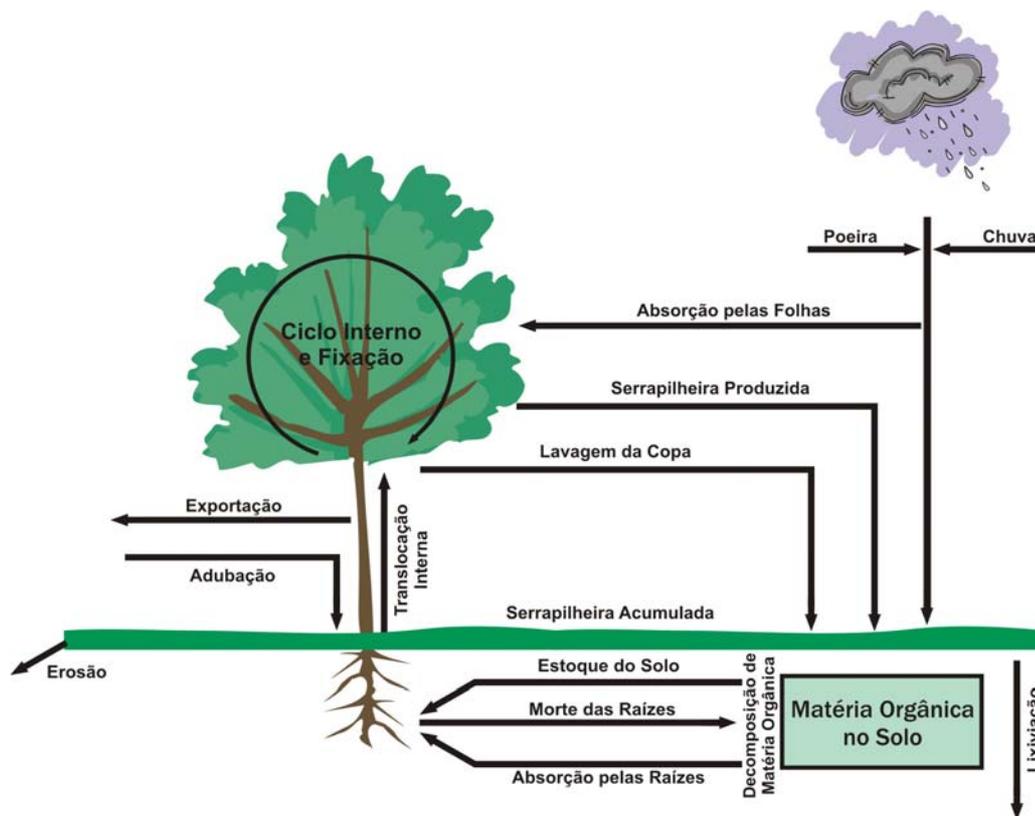


Figura 1.1 – Ciclagem de nutrientes no ecossistema florestal

Nos solos florestais, a produção de folheto, dependendo de sua qualidade, pode ter efeito significativo na composição, disponibilidade e retenção dos nutrientes nos ecossistemas. Por outro lado, as concentrações de determinados nutrientes nas folhas podem ser modificadas com a aplicação de fertilizantes minerais ao solo dos plantios, ou mesmo com a adição de adubos orgânicos, como foi observado na pesquisa realizada com a aplicação de lodo de esgoto (GUEDES, 2005).

Moffat et al. (1991) relatam que os teores de P nas folhas de *Pinus* foram modificados devido à aplicação do lodo de esgoto ao solo das parcelas experimentais. Guedes e Poggiani (2003), em povoamentos de *Eucalyptus grandis* tratados com biofóssido, obtiveram mudanças na concentração dos nutrientes nas folhas, constatando o aumento das concentrações dos elementos: N, P, Ca e S e a diminuição das concentrações de Mn e Mg.

Guedes (2005) demonstrou a influência da aplicação do lodo de esgoto na ciclagem de nutrientes em plantações de eucaliptos no interior do estado de São Paulo e constatou alterações positivas nos teores de nutrientes do folheto das árvores que receberam o lodo (biofóssido).

Efeitos de diferentes tipos de lodo

A formulação da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução CONAMA N^o 375-06), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário (ETEs) e seus produtos derivados, foi resultado, em parte, de diversas pesquisas realizadas com espécies de interesse agrônomo e florestal. Entretanto, mais estudos se fazem necessários para o uso ambientalmente adequado dos lodos de esgoto em diferentes cultivos, visando minimizar os eventuais impactos ambientais ao longo do tempo.

A aplicabilidade do lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais está diretamente relacionada às suas características físico-químicas e biológicas, que dependem da origem e das características do tratamento utilizado na estação de tratamento de esgoto.

A quantidade de água existente na maioria dos lodos de esgoto está a cima de 95% (SEWELL, 1978) o que encarece o transporte e dificulta a aplicação do material.

De maneira geral, nas estações de tratamento de esgoto, o esgoto chega por meio dos coletores urbanos, sendo submetido a um tratamento primário, com telas coletoras e tanques de sedimentação, removendo cerca de 60% dos sólidos maiores, mas apenas um terço dos componentes orgânicos. O tratamento secundário constitui-se na purificação das águas, sendo que as bactérias aeróbicas decompõem os sólidos remanescentes com a presença de oxigênio que é assoprado no efluente. No processo de lodo ativado, os sólidos em suspensão, a DBO e os coliformes podem sofrer uma redução entre 80 e 95%. Entretanto, os tratamentos primários e secundários deixam ainda entre 10 e 15% da DBO, 10% de sólidos suspensos, 50% do nitrogênio (principalmente na forma de nitratos), 70% do fósforo na forma de fosfatos e 95% de sais dissolvidos, podendo incluir os metais pesados, além de substâncias orgânicas persistentes e potencialmente perniciosas ao ambiente. O tratamento terciário constitui-se no tratamento da água do esgoto residual, podendo incluir filtragem, tratamento químico ou bioquímico, visando devolver novamente a água purificada para o seu reuso em diversas finalidades.

Na região metropolitana de São Paulo, devido às próprias características qualitativas e quantitativas, a disposição final do lodo de esgoto é um dos principais problemas que envolvem as estações de tratamento de esgoto. De forma geral, no Brasil, os resíduos do processo de tratamento do esgoto doméstico têm tido uma disposição final baseada no conceito de resíduo a

ser descartado, e não como subprodutos de interesse comercial. Dessa forma, o efluente final tratado é lançado nos rios, ao passo que o lodo remanescente é disposto em aterros sanitários. Segundo Tsutiya (2000), há muito tempo se sabe que a adição de produtos químicos alcalinos tem efeito estabilizante sobre o lodo de esgoto e geralmente a cal virgem tem sido utilizada para esta finalidade. O lodo tratado com cal altera as características químicas e físicas com elevação do pH e formando torrões volumosos com uma crosta mais dura e esbranquiçada, quando exposto ao ar livre. Quimicamente, além da fixação dos metais pesados, pode ocorrer redução na solubilização do fósforo e perdas do nitrogênio por volatilização da amônia. Devido à sua simplicidade, o tratamento com cal tem sido escolhido pelas primeiras estações de tratamento de esgoto, visando à reciclagem na agricultura. Por outro lado, o condicionamento do lodo pode ser feito também com o uso de polímeros, que atuam como agregantes das partículas. Porém, esse processo não é comum no Brasil, sendo mais utilizado em países europeus como a Alemanha e Inglaterra. Em São Paulo, Miki (1998) elaborou um estudo detalhado sobre a utilização de polímeros para condicionamento do lodo de ETEs, que indicou uma redução de custos de produtos químicos consumidos em relação ao condicionamento com cal e cloreto férrico, além de outras vantagens tecnológicas, inclusive a melhoria na qualidade do produto final. Andreoli (2001) observou o efeito do uso de polieletrólitos na desidratação do lodo de esgoto aeróbio. Portanto, o lodo de esgoto tratado com polieletrólitos favorece também sua disposição nas culturas agrícolas ou florestais por ser também mais adequado, visto que o pH do solo é pouco alterado, sendo que a ausência da cal hidratada no lodo distribuído no campo reduz o efeito indesejável de possíveis desequilíbrios nutricionais nas plantas cultivadas, que podem ocorrer em longo prazo.

Guedes (2005) estudou a aplicação de biossólido, tratado com cal e cloreto férrico, aplicado nas entrelinhas de plantio em uma área experimental de *Eucalyptus grandis* em Itatinga – SP e observou efeitos positivos no crescimento devido à aplicação do lodo que serviu como fonte de nutrientes. Mas relata que o lodo aplicado nas entrelinhas de plantio, afetou favoravelmente o crescimento das árvores, apenas um ano após do plantio. Segundo Poggiani et. al. (2000), o lodo de esgoto apresenta a vantagem de liberar mais lentamente os nutrientes em relação à adubação mineral. Dessa forma, as culturas de ciclo longo, plantadas sobre solos arenosos e de baixa fertilidade, podem sincronizar melhor a absorção dos nutrientes liberados pela mineralização do lodo de esgoto ao longo do tempo.

Para aprimorar o tratamento do lodo de esgoto e viabilizar sua disposição na agricultura bem como em aterros sanitários, a SABESP, a partir de 2002 deu início ao procedimento de secagem térmica do lodo produzido na ETE Barueri, que vem sendo fornecido experimentalmente sob forma granulada. A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e do volume dos lodos, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerado também um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica presente no lodo, aspectos de importância fundamental quando o lodo seco vai ser aplicado em sistemas agroflorestais (DAVID, 2002). As vantagens da utilização do lodo de esgoto seco termicamente em relação ao lodo com maior teor de água (torta) estão relacionadas com os menores custos de transporte e também com a simplificação das atividades operacionais de aplicação do lodo no campo, fatores que se refletem no retorno econômico da atividade florestal (POGGIANI, 2006). Todavia, como não existem pesquisas a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente sobre o crescimento dos eucaliptos, foi objetivo deste trabalho avaliar comparativamente a influência da aplicação nas linhas de plantio de doses crescentes dos lodos úmido (torta) e seco (granulado) na produção de madeira em plantações puras de *Eucalyptus grandis* e também sobre a ciclagem dos nutrientes entre os componentes do sistema “Árvores – serapilheira – solo”. O lodo úmido (torta) foi produzido na ETE de Barueri da SABESP, que trata parte do esgoto coletado na região metropolitana de São Paulo. A partir do lodo úmido foi produzido por secagem térmica também o lodo seco, que apresenta uma granulação variando entre 2 e 4 mm. Para a secagem o lodo foi utilizado um secador existente na ETE São Miguel da SABESP-SP, construído pela SEGHERS- Better Technology, que seca o lodo pelo aquecimento de serpentinas com óleo térmico, elevando sua temperatura acima de 100 °C. Os dois lodos, nas formas de torta e grânulos, foram utilizados como tratamentos na experimentação apresentada nesta dissertação.

Referências

ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; MADER NETTO, O.S. Desidratação de lodo aeróbio e séptico através de uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem uso de polieletrólitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21. **Anais...** João Pessoa, 2001 1 CD-ROM

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.19-24, 1999.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto**: determinação da umidade de equilíbrio. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FJÄLLBORG, B.; HLBERG, G.; ILSSON, E. DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Carnforth, v.31, n.1, p.25-31, 2005.

GOBATO, G. **O biossólido como insumo agrícola**: subsídios para formação de preço - o estudo de caso da ETE Franca. 2003, 100p. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) - Centro Universitário de Franca – Administração, Franca, 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) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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

HARRISON, R.B.; GUERRINI, I.A.; HENRY, C.L.; COLE, D.W. Reciclagem de resíduos industriais e urbanos em áreas de reflorestamento. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n.198, p.1-21, 2003 .

HARRISON, R.B.; 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**, Madison, v.66, p.165-177, 1994.

HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HINCKLEY, T.M.; HARRISON, R.B. The use of municipal and pulp paper sludge to increase production in forestry. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v.1, n.3, p.41-45, 1993.

HENRY, C. L.; COLE, D. W. Use of biosolids in the forest: Technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, New York, v.13, n.4/5, p.269-277, 1997.

JAMAL, M.S.; SAMMIS, T.W.; MEXAL, J.G.; PICCHIONI, G.A.; ZACHRITZ, W.H. A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production. **Agricultural Water Management**, Fresno, v.56, n.1/2, p.57-79, jul.2002.

KIMBERLEY, M.O.A; WANG, H.A; WILKS, P.J.B; FISHER, C.R.B; 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.

LI, G.; YIN, C.; LIN, Y.; LI, Z. Artificial improvement of soil fertility in a regraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge. **The journal of applied ecology**, Liaoning, v.13, n.2, p.159-162, 2002.

LUDUVICE M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.

MCNAB, W.H.; BERY, C.R. Distribution of aboveground in three pine species planted on a devastated site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. **Forest Science**, Bethesda, v.31, n.2, p.373-382, 1985.

MIKI, K.M.; SAMPAIO, A.O.; ALEM SOBRINHO, P. Benefícios técnicos e econômicos referentes à substituição, por polímeros, do método tradicional de condicionamento químico para desaguamento de lodo ETE em filtro prensa de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21, 2001. João Pessoa, **Proceedings...**São Paulo, POLITECNICA, 2001 1 CD-ROM.

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

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

NEVES, E.J.M.; MARTINS, E.G.; REISSMANN, C.B. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.43, p.47-60, 2001.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* implicações silviculturais**. 1985. 211p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2006. 70p. (Relatório Técnico-Científico, 42).

POGGIANI, F.; SILVA, P.H.M. Biossólido aumenta produtividade de eucaliptos. **Revista Visão Agrícola**. Piracicaba, v1, n 4, p.105-107, dez. 2005.

PRITCHETT, W. **Properties and management of forest soils**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1979. 494 p.

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

SELIVANOVSKAYA, S.Y.; LATYPOVA, V.Z.; ARTAMONOVA, L.A Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v.38, n.8, p.1549-1556, 2003

SEWELL, G.H. **Administração e controle da qualidade ambiental**. São Paulo: Editora Pedagógica Universitária, 1978. 295p.

SOUZA VAZ, L.; GONÇALVES, J.L.M.: Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: II. Efeitos na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.9, p.179-198.

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

TSUTYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.

VIEIRA R.F.; SILVA C. M. M. S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v.34, p.340, 2003.

2 Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco.

Resumo

No Brasil diversos municípios estão construindo estações de tratamento de esgoto (ETEs) e futuramente serão produzidas anualmente milhares de toneladas de lodo para as quais deverá ser dada uma destinação adequada. O lodo de esgoto tratado (biossólido) é o resíduo resultante do tratamento do esgoto urbano e sua disposição final precisa ser bem planejada devido às implicações sanitárias, ambientais, econômicas e sociais. Apresenta elevado teor de matéria orgânica e de nutrientes e poderia ser utilizado como fertilizante em plantios florestais. Esta pesquisa foi realizada na Estação de Ciências Florestais de Itatinga (Universidade de São Paulo) com o objetivo de avaliar o efeito da adição de doses crescentes (10, 20 e 30 t ha⁻¹) dos lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado), complementados com K e B, e aplicados ao solo nas linhas de plantio em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*. Dezoito meses após a implantação das mudas no campo, o volume dos troncos demonstrou um aumento significativo (ao redor de 130%) dos eucaliptos tratados com os biossólidos úmido e seco em relação à testemunha e um resultado semelhante ao tratamento com adubo mineral. Entretanto, não houve diferença significativa entre os tratamentos com os biossólidos úmido e seco. Com relação à nutrição mineral, foi observada correlação positiva entre as doses crescentes dos biossólidos e a concentração dos elementos P, Ca e Zn nas folhas e correlação negativa para Mn. As concentrações foliares de todos os nutrientes nos eucaliptos tratados com os biossólidos mantiveram-se dentro dos limites observados usualmente nas plantações comerciais, não havendo sinais de desequilíbrio nutricional.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, biossólido, nutrição foliar, volume de madeira, e *Eucalyptus grandis*

Wood volume and foliar concentration of nutrients in *Eucalyptus grandis* after wet and dry sewage sludge application.

Abstract

In Brazil several municipalities are building waste treatment plants and in the future thousand tons of sewage sludge will be generated annually. Sewage sludge is the waste left over after wastewater treatment and its disposal need to be well planned, considering sanitary, environmental, economic and social implications. Sewage sludge (biosolids) is high in organic content and plant nutrient and could be applied like fertilizer in forest plantations. This research was conducted in the Experimental Station of Itatinga (University of São Paulo). The aim of this work was to evaluate the effects of increasing doses (10, 20 and 30 t ha⁻¹) of wet and dry (pellets) biosolids, completed with K and B, applied to the soil of planting row in experimental plots of *Eucalyptus grandis*, 1.5 years after seedlings plantation. The volumetric growth of the trunks

showed that there was a significant increment of trunk volumes of eucalypts that received wet and dry sewage sludge, compared to the control treatment, and a similar growth with eucalypts that received full mineral fertilization. Regarding mineral nutrition, it was observed a positive correlation between increasing doses of biosolids and P, Ca, and Zn concentrations in the leaves, but a negative correlation for Mn. Nutrients concentrations in the leaves of eucalypts treated with biosolids remained within the limits observed in commercial plantation.

Key-words: Growth, increment, mineral nutrition, sewage sludge, biosolids and *Eucalyptus grandis*

2.1 Introdução

O lodo é o resíduo do tratamento do esgoto levado às ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) através da rede coletora urbana. De acordo com Tsutiya (2000), o processo de retirada da fração sólida do esgoto, que varia entre 1 e 2% do volume total, pode corresponder até 40 % do custo operacional da estação de tratamento. O lodo produzido no tratamento de esgoto pode ter diferentes alternativas de disposição como, por exemplo, o aterro sanitário, a descarga oceânica, a incineração e sua aplicação em sistemas agro-florestais. Sua utilização em plantios florestais, visando melhorar a fertilidade do solo e manter o estoque de nutrientes no ecossistema, poderia ser uma nova opção ecológica e economicamente interessante (FORSTER et al., 1977)

De acordo com Ludovice (2000), o potencial agrônômico do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor. Selivanovskaya et al. (2003) assinalam que um dos métodos para melhorar a qualidade de solos pobres seria a adição de matéria orgânica e sugerem o uso de lodo de esgoto para favorecer o crescimento das plantas, além de ser uma excelente alternativa para a disposição deste resíduo urbano. Fjällborg et al. (2005) consideram que o lodo é uma fonte orgânica de nutrientes, entretanto os metais pesados, eventualmente presentes, podem acumular-se no solo depois de repetidas aplicações e, dependendo das concentrações, podem gerar impactos indesejáveis sobre os microrganismos, as plantas e os animais. Para a utilização do lodo proveniente das estações de tratamento sanitário do esgoto em plantações florestais, deve-se realizar o processamento correto, de modo a permitir seu manuseio de forma segura. Rocha (2002) observou que a fertilidade do solo elevou-se gradualmente, em plantio de *Eucalyptus grandis*, depois da aplicação do lodo de esgoto e que as árvores responderam positivamente com maiores ganhos de produtividade em

relação à adubação convencional. De acordo com Souza Vaz (2000), a resposta positiva à aplicação do lodo de esgoto em plantios de eucaliptos aumentou ao longo do tempo, refletindo os efeitos da disponibilização dos nutrientes para as árvores, através da decomposição do lodo aplicado. McNab e Bery (1985), estudando a aplicação de lodo de esgoto em plantio de diferentes espécies de *Pinus* em solos degradados dos EUA, observaram que o tratamento com a aplicação de lodo obteve maior incremento em relação ao tratamento com adubação química. Kimberley et al (2004) observaram que a aplicação do lodo pode aumentar significativamente os retornos econômicos de uma plantação florestal devido à maior produtividade obtida, compensando os custos de transporte e aplicação do resíduo. Guedes (2005) estudou a aplicação de biossólido, tratado com cal e cloreto férrico, nas entrelinhas de plantio em uma área experimental de *Eucalyptus grandis*. Em seu estudo, observou efeitos positivos no crescimento devido à aplicação do lodo que serviu como fonte de nutrientes. Mas, por ter sido o lodo aplicado nas entrelinhas dos eucaliptos, a resposta sobre o crescimento das plantas ocorreu quase um ano após o plantio. Segundo Poggiani et. al. (2000), o lodo de esgoto, em relação à adubação mineral, apresenta a vantagem de liberar lentamente os nutrientes para o sistema radicular das árvores. Desta forma, para as culturas de ciclo longo, plantadas sobre solos arenosos e de baixa fertilidade, a lenta liberação dos nutrientes pode otimizar sua absorção através do sistema radicular e reduzir a lixiviação.

Para aprimorar o tratamento do lodo de esgoto e viabilizar sua disposição em aterros sanitários, bem como na agricultura, a SABESP, a partir de 2002 deu início ao procedimento do uso de polímeros para condicionamento do lodo, seguido de secagem térmica, produzindo um biossólido seco (granulado). O lodo seco e granulado oferece diversas vantagens em relação ao lodo úmido, visto que além de ser completamente isento de patógenos, torna-se mais econômico seu transporte e tecnicamente mais operacional sua distribuição no campo. Não existindo pesquisas a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente em plantações florestais, foi objetivo deste ensaio avaliar comparativamente a influência da aplicação nas linhas de plantio de doses crescentes dos lodos úmido (torta) e seco (granulado) sobre o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*, bem como o seu reflexo na variação dos teores de macro e micronutrientes nas folhas, aos 18 meses de idade.

2.2 Material e métodos

Descrição da Área experimental

O experimento foi implantado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, localizada no município de Itatinga – SP, a 230 02' de latitude Sul e 480 37' de longitude Oeste de Greenwich e com altitude média de 830 m.

O clima do município de Itatinga é do tipo mesotérmico úmido, segundo classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1500 mm, a temperatura média anual de 19,4 °C e a umidade relativa gira ao redor de 80%. A precipitação média mensal do mês mais seco varia entre 30 e 60 mm.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-amarelo com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 1). Apresenta pH ácido, ao redor de 4, e baixos teores de macro e micronutrientes. A vegetação natural primitiva era constituída principalmente por plantas de cerrado. Essa região é uma das mais representativas áreas onde se pratica a silvicultura intensiva do eucalipto no estado de São Paulo.

Tabela 2. 1 - Análise do solo antes da implantação da área experimental

Prof.	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	Sat.	S ⁻ SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³						%	Al 3+	mg dm ⁻³						
0-5	9	26	4	0,7	5	4	71	27	10	82	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5-10	6	17	4	0,6	3	2	57	24	5	63	8	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10-20	7	13	4	0,6	2	2	44	20	4	51	9	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi implantado em abril de 2003, com 8 tratamentos distribuídos de forma casualizada em 3 blocos, definidos em função da declividade, que é de aproximadamente 5%. Cada parcela, constituída por 8 linhas, possui uma superfície de 384 m² (24x16 m). Nas linhas de plantio as mudas de *Eucalyptus grandis* foram espaçadas em 2 m e nas entrelinhas em 3 m, totalizando 64 plantas por parcela. Como área útil da parcela, foram consideradas apenas as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, totalizando uma área efetiva de

amostragem de 216 m² por parcela. O preparo de solo foi realizado no sistema de cultivo mínimo, com subsolagem na linha de plantio até 45 cm de profundidade. Esta é a metodologia mais utilizada nas empresas florestais e foi utilizada no experimento, pois o preparo de solo tem grande importância no desenvolvimento das espécies florestais (GATTO et al., 2003).

Os tratamentos foram constituídos pela adição ao solo de doses crescentes de lodo de esgoto, calculadas em base seca a partir das concentrações observadas nos respectivos lodos úmido (torta) e seco (granulado), conforme expresso na Tabela 2.2. A aplicação do lodo de esgoto foi efetuada nas linhas de plantio uma semana após a implantação das mudas.

- i) Test - Testemunha absoluta, sem adubação e sem aplicação de lodo de esgoto;
- ii) 10 úmido - 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto úmido com complementação de Potássio e Boro;
- iii) 10 seco - 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto seco com complementação de Potássio e Boro;
- iv) 20 úmido - 20 t ha⁻¹ de lodo de esgoto úmido com complementação de Potássio e Boro;
- v) 20 seco - 20 t ha⁻¹ de lodo de esgoto seco com complementação de Potássio e Boro;
- vi) 30 úmido - 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto úmido com complementação de Potássio e Boro;
- vii) 30 seco - 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto seco com complementação de Potássio e Boro; e
- viii) Ad. mineral – Foi aplicada a adubação mineral utilizada normalmente pelas empresas florestais da região, constituída por 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total), 110 kg ha⁻¹ de 0-45-0 (no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de 10-20-10 (no sulco de plantio), 80 kg ha⁻¹ de 20-0-20 (45 dias pós-plantio, aplicado em meia lua ao redor da muda), 180 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (6 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio) e 240 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (12 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio);

A complementação de Potássio (KCl) e Boro (Bórax) para os tratamentos com os biossólidos foi necessária devido aos baixos teores destes elementos encontrados no lodo de esgoto (Tabela 2. 2), bem como no solo. Estes nutrientes foram adicionados, portanto, até atingirem valores iguais aos do tratamento com adubação mineral. A aplicação dos diferentes lodos (seco e úmido) e da adubação mineral propiciou uma adição considerável de nutrientes ao solo (Tabela 2. 3).

Tabela 2. 2 - Análise dos lodos úmido (torta) e seco (granulado) produzidos pela SABESP

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl ₂ 0,01 M	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Mat. Orgânica resistente a compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	3,27 %	3,47 %
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,27 %	3,84 %
Potássio (K ₂ O) total	0,27 %	0,27 %
Cálcio (Ca) Total	2,52 %	2,46 %
Magnésio (Mg) Total	0,49 %	0,39 %
Enxofre (S) Total	0,66 %	0,68 %
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	0,057 %	0,07%
Manganês (Mn) Total	0,0194 %	0,030%
Zinco (Zn) Total	0,238 %	0,32%
Ferro (Fe) Total	3,90 %	4,52%
Boro (B) Total	0,0009 %	0,0002%
Sódio (Na) Total	0,0583 %	0,09%

Tabela 2. 3 - Nutrientes adicionados ao solo em cada tratamento através de aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco

Tratamentos	N	P ₂ O ₅	K ₂ O*	Ca	Mg	S	B*	Zn	Fe	Cu	Mn	Na
	kg ha ⁻¹											
Testemunha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 úmido	327	327	160	252	49	66	1,26	23,8	390	5,7	1,94	5,8
10 seco	347	384	160	246	39	68	1,26	32,2	452	7	3	9
20 úmido	654	654	160	504	97	133	1,26	47,6	780	11,4	3,92	11,6
20 seco	695	768	160	492	78	136	1,26	64,4	904	14	6	18
30 úmido	981	981	160	755	146	199	1,26	71,4	1170	17,1	5,88	17,4
30 seco	1042	1152	160	738	117	204	1,26	96,6	1356	21	9	27
Ad. mineral	100	80	160	440	160	5	1,26	2,1	-	-	-	-

* Nutrientes que foram complementados devido à sua baixa concentração nos lodos de esgoto

Avaliação do incremento volumétrico dos eucaliptos

Aos 18 meses de idade foram realizadas as medições de altura e DAP das árvores nas áreas úteis de todas as parcelas dos três blocos do experimento, totalizando 36 árvores por parcela. Para a medição de altura utilizou-se o hipsômetro “Blume-liees” e para a medição da circunferência a altura do peito utilizou-se um fita métrica.

Na determinação do volume individual das árvores foi utilizada a equação $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times DAP^{1,9117} \times HT^{1,3065}$ obtida por Guedes (2005) em trabalho realizado na Estação Experimental de Itatinga, onde também foi avaliado o crescimento do *Eucalyptus grandis*, após aplicação de biossólido nas entrelinhas de plantio.

Determinação da concentração de nutrientes nas folhas dos eucaliptos

Aos 18 meses de idade, foram coletadas amostras de folhas do terço superior das copas de oito árvores médias existentes dentro da área útil das parcelas (repetições) de cada tratamento, constituindo três amostras compostas destinadas à análise dos macro e micronutrientes, totalizando 24 amostras. Depois de coletadas, as amostras de folhas foram secas em estufa a 65oC, até atingirem peso constante e moídas em moinho tipo Willey (peneira de 20 mesh). Para os elementos N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn e B, as análises químicas foram realizadas no laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ, após digestão sulfúrica para o nitrogênio, digestão seca para o boro e digestão perclórica para os demais elementos. O N foi determinado pelo método micro-Kjedhal, os elementos P e o B foram determinados por colorimetria, o K por fotometria de chama, o S por turbidimetria. Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, conforme procedimento indicado por Malavolta et al. (1997).

Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. Nos casos que apresentaram diferenças a 5% de probabilidade, em um ou mais tratamentos, os dados foram submetidos ao teste de Duncan.

2.3 Resultados e discussão

Efeito das doses crescentes de biossólidos no incremento volumétrico dos eucaliptos

Os resultados obtidos para o volume de madeira no 18^o mês pós-plantio (Figura 2. 1) evidenciaram que os tratamentos com aplicação dos lodos foram significativamente superiores ao tratamento testemunha e estatisticamente iguais ao tratamento com adubação mineral. Não foi observada diferença estatística entre os tratamentos com as doses crescentes aplicadas e também entre os dois tipos de lodo (úmido e seco). Contudo, estes resultados devem ser considerados ainda iniciais, visto que o ciclo de corte previsto para o talhão experimental é de aproximadamente 6 anos.

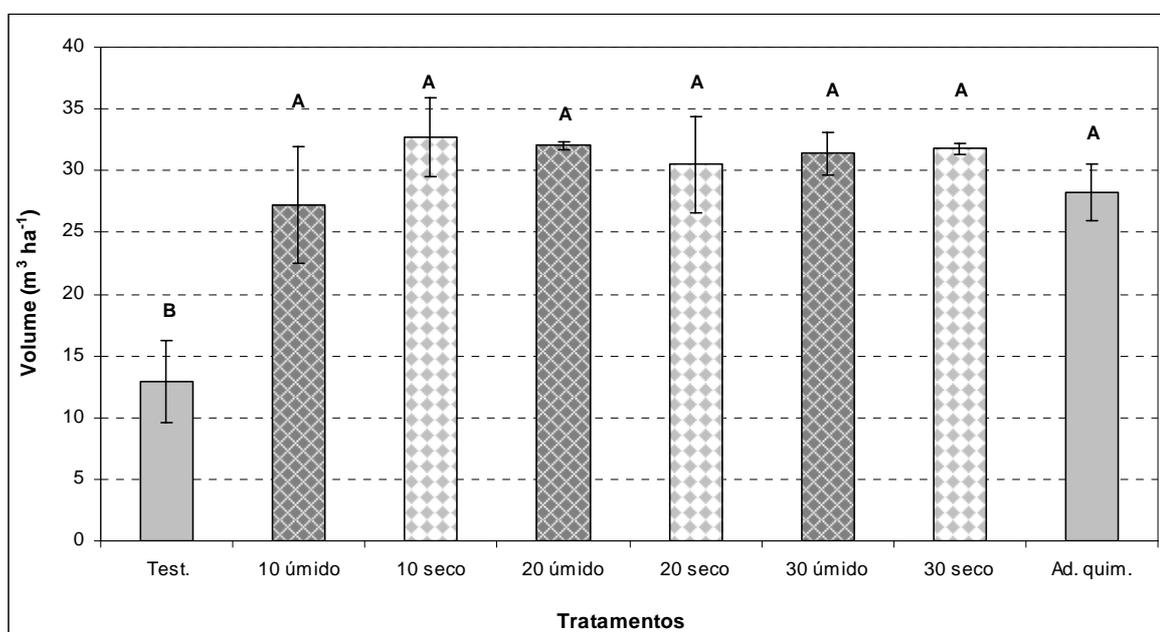


Figura 2. 1 - Madeira produzida pelos eucaliptos aos 18 meses de idade nos diferentes tratamentos e respectivo desvio padrão. (Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan)

Segundo Gonçalves et. al. (2000), na fase inicial de desenvolvimento, os eucaliptos dependem em grande parte dos nutrientes disponíveis no solo. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a menor dose de lodo de esgoto aplicada ao solo (10 t ha⁻¹), complementada com K e B, foi capaz de suprir à demanda nutricional. Este fato havia sido preliminarmente observado neste experimento também por Poggiani (2003), três meses após o plantio das mudas. O resultado comprova, portanto, que a aplicação do lodo diretamente nas

linhas de plantio disponibiliza rapidamente os nutrientes necessários para o desenvolvimento das mudas, podendo substituir a adubação mineral convencional, geralmente praticada pelas empresas florestais. Este aspecto torna-se relevante, quando se compara o resultado obtido por Guedes (2000), que também constatou o efeito positivo do lodo de esgoto produzido na ETE de Barueri (tratado com cal e cloreto férrico) sobre o crescimento dos eucaliptos, mas apenas 10 meses após sua aplicação nas entrelinhas de plantio. A partir desta constatação, Guedes (2000) sugeriu, então, que deveria ser mantida a adubação mineral de base, visando estimular o crescimento inicial das árvores tratadas com lodo de esgoto aplicado nas entrelinhas.

Nesta pesquisa, entretanto, foi comprovada a melhor opção de se aplicar o lodo nas linhas de plantio, levando em conta o volume de madeira produzido aos 18 meses de idade (figura 1), que foi superior a 30 m³ por hectare em quase todos os tratamentos. Comparativamente, Guedes e Poggiani (2003) obtiveram, também aos 18 meses de idade, nos tratamentos com doses crescentes de biossólido úmido tratado com cal, mas aplicado nas entrelinhas de plantio, um volume de madeira, variando entre 15 a 20 m³ por hectare.

Polglose e Myers (1995) na Austrália, em plantio experimental de eucaliptos irrigado com efluente proveniente de estação de tratamento de esgoto, observaram uma produção de 64 m³ por hectare, aos 34 meses de idade. Entretanto, deve ser considerado que neste caso, além da adição de nutrientes, houve também um aporte adicional de água, fator importante no crescimento dos eucaliptos, principalmente em regiões de baixa precipitação. De maneira geral, os resultados observados neste experimento, aos 18 meses de idade, evidenciam que tanto o biossólido seco como o úmido, complementados com K e B, poderiam substituir satisfatoriamente a adubação mineral, usualmente aplicada nas áreas das empresas florestais do interior de estado de São Paulo. Visualmente, observou-se também que as parcelas experimentais dos eucaliptos, tratadas com lodo de esgoto, apresentaram o fechamento mais rápido das copas em relação aos tratamentos testemunha e com adubo mineral, o que poderá gerar uma redução de custos no controle das plantas invasoras.

Efeito das doses crescente de biossólidos na concentração de nutrientes nas folhas

A aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto, complementado com Potássio e Boro, refletiu-se nos teores de macro e micronutrientes das folhas de eucalipto aos 18 meses de idade (Tabela 2. 4). O aproveitamento dos nutrientes adicionados via adubo químico ou orgânico

depende das condições climáticas sazonais e do momento em que ocorre o fechamento das copas do povoamento, quando nas árvores passa a prevalecer a transferência interna dos nutrientes através do ciclo bioquímico. Nas Tabelas 2.4 e 2.5 são apresentados os resultados das concentrações de macro e micronutrientes nas folhas dos eucaliptos submetidos aos diferentes tratamentos. As concentrações de diversos elementos foram afetadas principalmente nos tratamentos com as doses mais elevadas de lodo de esgoto.

Observou-se o aumento das concentrações de P, Ca, e Zn nas folhas e, inversamente, uma diminuição de Mn com o aumento das doses dos bio sólidos (Figura 2.2, 2.3 e 2.4). Guedes e Poggiani (2003) observaram resultados semelhantes na nutrição foliar de eucaliptos tratados com lodo de esgoto (bio sólido) aplicado nas entrelinhas de plantio entre 2 e 18 meses de idade. Estes autores verificaram que os eucaliptos tratados com a adição de bio sólido ao solo apresentaram teores foliares de N, P, Ca e S mais elevados e teores mais baixos de Mg e Mn em relação ao tratamento com adubação química. Observa-se na Tabela 2.4 que para o N ocorre apenas uma tendência de aumento na concentração foliar nos tratamentos com as doses mais elevadas de bio sólido. Entretanto, em função da variação dos resultados analíticos entre os diferentes blocos, as diferenças não foram significativas. Nesta pesquisa as análises foliares foram realizadas aos 18 meses de idade, ou seja, seis meses após a fase de fechamento das copas. Nesta fase, segundo Miller (1981), tende a diminuir a demanda por nutrientes do solo em virtude da otimização do ciclo bioquímico. Gonçalves et al. (2000) também consideram ser cada vez menor a resposta das árvores à fertilização mineral após o fechamento das copas. Poggiani (2004) relata que análises também realizadas preliminarmente em eucaliptos desta área experimental aos 10 meses de idade, apresentaram concentrações foliares de N, variando entre 29 a 35 g Kg⁻¹, conforme as doses de bio sólidos aplicadas. Foram, portanto, superiores às observadas aos 18 meses de idade. Na Espanha, Egiarte et al. (2005) também observaram maior incremento volumétrico em experimentos com pinheiros tratados com doses crescentes de lodo de esgoto. Entretanto, a concentração de N observada nas acículas foi maior nas árvores do tratamento testemunha do que nos tratamentos com adição de lodo. Os autores atribuíram este resultado ao efeito de diluição do N na biomassa produzida em maior quantidade nos talhões de pinheiros adubados com lodo de esgoto.

Tabela 2. 4 - Concentração foliar de macronutrientes nos tratamentos: testemunha, adubação mineral convencional e nas doses crescentes de lodo de esgoto (úmido e seco).

Tratamentos	g kg ⁻¹											
	N		P		K		Ca		Mg		S	
Testemunha	26,4	a	1,45	b	3,4	b	3,6	b	2,0	b	1,2	a
10 úmido	26,5	a	1,50	b	5,2	a	3,6	b	1,8	b	1,0	a
10 seco	25,4	a	1,47	b	4,6	a	4,1	ab	2,0	b	1,1	a
20 úmido	28,5	a	1,70	a	4,9	a	4,3	ab	2,0	b	1,2	a
20 seco	27,5	a	1,77	a	4,7	a	4,2	ab	2,0	b	1,2	a
30 úmido	29,3	a	1,75	a	4,4	a	5,2	a	2,1	b	1,3	a
30 seco	28,5	a	1,93	a	4,4	a	4,5	ab	2,0	b	1,3	a
Adubação mineral	24,0	a	1,30	b	4,9	a	4,8	a	2,5	a	1,2	a

* Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan.

O fósforo também foi suprido ao solo dos diferentes tratamentos com a adição do lodo, em doses variando de 327 a 1.152 Kg ha⁻¹ de P₂O₅. Esse elemento é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento dos eucaliptos, principalmente em solos arenosos de baixa fertilidade, visto que sua carência gera limitações severas no desenvolvimento das mudas. Observa-se na Tabela 2. 4 e na Figura 2. 2 uma correlação positiva entre as doses de lodo de esgoto supridas e as concentrações de fósforo encontradas nas folhas, variando de 1,45 a 1,93 g Kg⁻¹. Resultados semelhantes foram observados por Guedes e Poggiani (2003) e por Guedes (2005) em parcelas experimentais de eucaliptos tratados com biossólido úmido, respectivamente aos vinte meses e cinquenta e seis meses de idade. A menor concentração foliar de P, observada no tratamento com adubação química (Tabela 2. 4), pode ser atribuída á rápida fixação do P mineral adicionado ao solo via adubo, associada também ao efeito da diluição do P na maior quantidade de biomassa produzida neste tratamento. Foi verificado ainda que as concentrações de P nas folhas dos eucaliptos avaliados neste experimento foram em média 30% superiores ás observadas por Guedes e Poggiani (2002) para as mesmas doses de lodo aplicadas. Esse resultado pode ser atribuído á colocação do lodo diretamente nas linhas de plantio, que possibilitou a quase imediata disponibilização do P para o sistema radicular das mudas. Do ponto de vista operacional, a adição do lodo de esgoto nas linhas de plantio representa um ganho em relação á

disposição nas entrelinhas, visto que as raízes das mudas demoram alguns meses para alcançar o local de aplicação dos nutrientes.

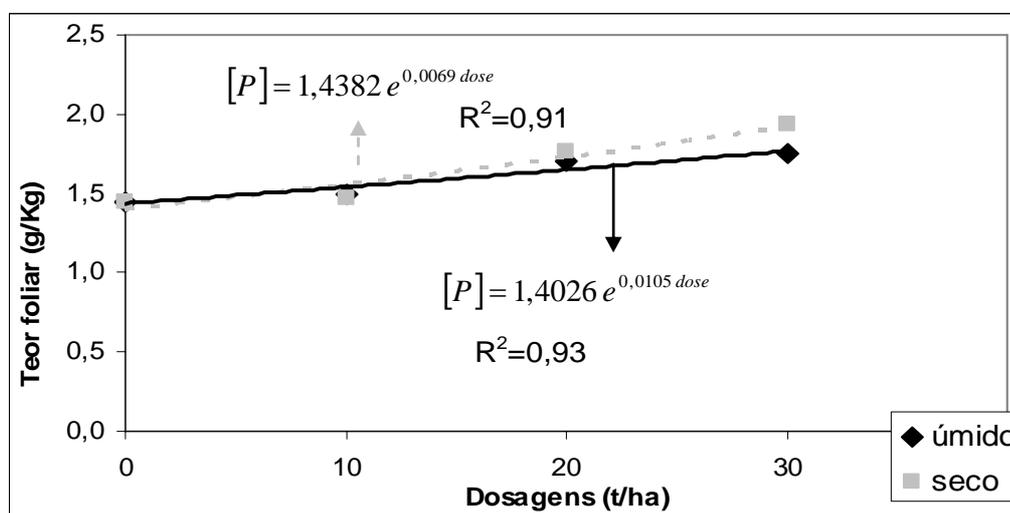


Figura 2.2 – Teor foliar de P em eucaliptos tratados com doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco

Observou-se ainda uma resposta significativa na concentração foliar do cálcio (Tabela 2. 4), principalmente nos tratamentos com as maiores doses de lodo e também no tratamento com adubo químico, onde foi feita a calagem. Por outro lado, as concentrações de cálcio nas folhas dos eucaliptos deste experimento, onde foi utilizado lodo esgoto tratado com polieletrólito, foram sempre inferiores às concentrações encontradas por Guedes e Poggiani (2003), que aplicaram biossólido úmido tratado com cal (carbonato de cálcio) na concentração de 95 g kg⁻¹ de cálcio.

As concentrações de Mg foram estatisticamente iguais para os tratamentos com aplicação de lodo e o tratamento testemunha (Tabela 2. 4), mas foram inferiores aos valores obtidos no tratamento com adubação química (2,5 g Kg⁻¹), devido à calagem aplicada antes da adubação, que disponibilizou grande quantidade desse nutriente.

Para os teores foliares de S, Cu e Fe (Tabela 2.s 4 e 5) não foram observados diferenças significativas entre os tratamentos. Esses resultados podem ser atribuídos à maior diluição dos elementos na biomassa dos eucaliptos tratados com lodo e adubo químico e pela capacidade das árvores em manter certo equilíbrio entre os teores desses nutrientes nas folhas, mesmo havendo maior disponibilidade dos elementos no solo.

A complementação com K e B para os tratamentos com lodo de esgoto apresentou-se eficaz, pois os valores das concentrações foliares obtidos para esses nutrientes foram significativamente superiores à testemunha e foram similares à adubação química. Segundo Tsutiya (2001), na ETE de Barueri, onde foram produzidos os lodos utilizados nesta experimentação, a concentração de potássio no lodo de esgoto é baixa, visto que este elemento é altamente solúvel em água, sendo perdido no efluente líquido durante o tratamento. O mesmo efeito deve acontecer em relação ao boro, que é solubilizado. A preocupação com a complementação de B ocorre por ser um nutriente importante para o desenvolvimento da planta, mas que em dosagem elevada pode ser tornar tóxico, principalmente, para o *E. grandis* (NOVELINO et al. 1982).

Tabela 2.5 - Concentração foliar de micronutrientes nos tratamentos: testemunha, adubação mineral convencional e nas doses crescentes de lodo de esgoto (úmido e seco)

Tratamentos	mg Kg ⁻¹									
	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
Testemunha	13,5	b	10,3	a	135,0	b	820,0	a	8,3	b c
10 úmido	37,3	a	9,3	a	137,0	b	519,0	b	8,3	b c
10 seco	44,0	a	9,7	a	163,0	ab	570,0	b	8,0	b c
20 úmido	35,0	a	10,3	a	152,0	ab	417,7	b	11,7	a b
20 seco	35,5	a	8,7	a	137,7	b	445,7	b	8,0	b c
30 úmido	39,7	a	9,0	a	173,7	a	537,7	b	14,3	a
30 seco	41,0	a	10,3	a	139,7	b	381,0	b	11,3	a b
Adubação mineral	34,0	a	9,5	a	159,0	ab	488,3	b	6,0	c

* Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan.

Com relação ao zinco, observa-se na Tabela 2. 5 e na Figura 2. 3 o aumento da concentração nas folhas com as doses crescentes de lodo aplicadas ao solo. Nos lodos produzidos na ETE de Barueri observa-se que os teores deste elemento variam entre 0,32 e 0,24% e sua presença é atribuída á atividade de indústrias que despejam seus efluentes no sistema de esgoto doméstico. O zinco sendo um metal pesado necessita de um monitoramento adequado quando aplicado em ecossistema agrofloretais. Verifica-se, entretanto, que sua concentração nas folhas dos eucaliptos não ultrapassou o valor de 15 mg kg⁻¹, mesmo nas doses mais elevadas de

lodos aplicadas. Segundo Bellote e Silva (2000), essa concentração pode ser considerada como normal em plantios comerciais de eucaliptos. É possível que o excesso de zinco contido no lodo de esgoto seja imobilizado na matéria orgânica do solo e também estocado no sistema radicular das árvores.

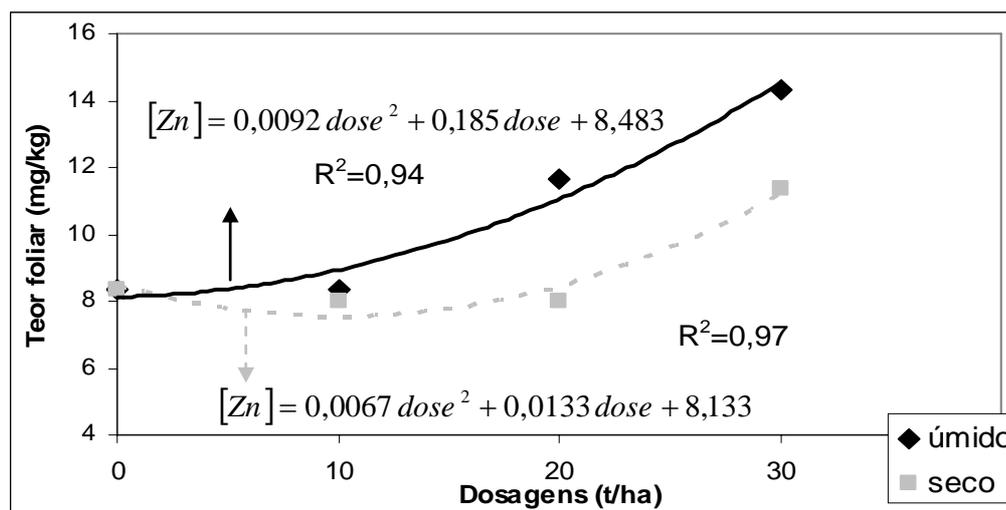


Figura 2.3 - Teor foliar de Zn em eucaliptos tratados com doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco

Observou-se a tendência de diminuição dos teores de Mn nas folhas dos eucaliptos em relação às doses crescentes de lodo de esgoto aplicadas (Figura 2.4). Entretanto, os resultados obtidos não foram estatisticamente diferentes (Tabela 2.5), devido à grande variabilidade, geralmente observada nesse tipo de estudo. A diminuição dos teores de Mn nas folhas em relação às doses crescentes de lodo de esgoto, pode ser atribuída ao aumento do pH do solo (TSADILAS et al., 1995; CHRISTIE et al., 2001; GUEDES e POGGIANI, 2003) devido ao efeito do lodo, que promove a precipitação do Mn tornando-o menos disponível às plantas. Segundo Guedes e Poggiani (2003), que também constataram o efeito negativo do bio-sólido sobre os teores de Mn nas folhas dos eucaliptos, este resultado pode ser considerado benéfico para os eucaliptos. Geralmente, no Brasil, não são observados problemas de deficiência de Mn nas culturas de eucaliptos. Mas, contrariamente, pode haver excesso deste elemento, gerando toxicidade às plantas, conforme constatado por Sgarby (2002). Esse autor estudou a variação da produtividade de plantios florestais em várias regiões do Estado de São Paulo, relacionando-a com o estado

nutricional e a fertilidade do solo e observou uma diminuição da produtividade em sítios com excesso de Mn.

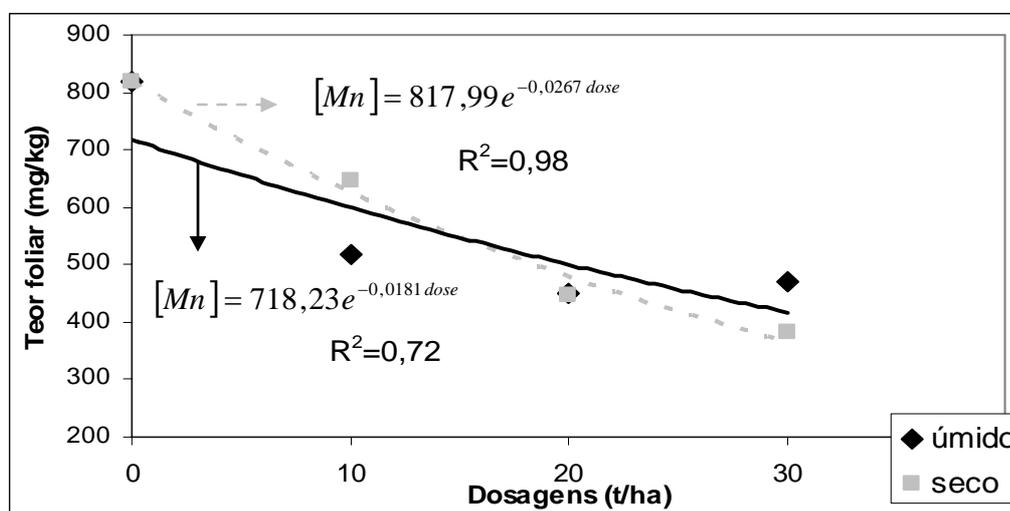


Figura 2.4 – Teor foliar de Mn em eucaliptos tratados com doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco

2.4 Conclusões

1. A aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco nas linhas de plantio, complementados com K e B, incrementou significativamente o volume de madeira produzida pelos eucaliptos, servindo como fonte de nutrientes.
2. O uso do lodo esgoto, permitiria a substituição das adubações nitrogenada e fosfatada, além da adição dos micronutrientes (exceto B).
3. O lodo de esgoto seco (granulado) aplicado ao solo das parcelas experimentais não afetou o volume de madeira produzido, aos 18 meses de idade, em relação ao lodo úmido (torta).
4. A aplicação dos lodos de esgoto, complementados com K e B, afetou positivamente a concentração dos elementos P, K, Ca, B e Zn nas folhas e negativamente a concentração de Mn.

Referências

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Técnicas e amostragens e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus spp.* In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.106-136.

CHRISTIE, P.; EASSON, D.L.; PICTON, J.R.; LOVE, S.C.P. Agronomic value of alkaline-stabilized sewage biosolids for spring barley. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, n.1, p.144-151, 2001.

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

FJÄLLBORG, B.; HLBERG, G.; ILSSON, E. DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Carnforth, v.31, n.1, p.25-31, 2005.

FORSTER, L.J. LOGAN, R.H. MILLER WHITE, R.K., State of the art in municipal sewage sludge landspreading. In: R.C. Loehr, Editor, **Land as a Waste Management Alternative**, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI (1977), pp. 603–618.

GATTO,A.; BARROS,N.F.; NOVAIS,R.F.; COSTA,L.M.; NEVES,J.C.L. Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.5, p.635-646, 2003.

GONÇALVES, J. L. M; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M e BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.

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

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

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

KIMBERLEY, M.O.A; WANG, H.A; WILKS, P.J.B; FISHER, C.R.B; 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.

LUDUVICE M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MCNAB, W.H.; BERY, C. R. Distribution of aboveground in three pine species planted on a devastated site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. **Forest Science**, Bethesda, v.31, n.2, p.373-382, 1985.

NOVELINO, J.O.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; MUNIZ, A.S. Efeito de níveis de boro em solução nutritiva no crescimento de *Eucalyptus spp.* **Revista Árvore**, Viçosa v.6, n.1, p.45-51, 1982.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. (Ed). Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species. In: JOINT AUSTRALIAN/JAPANESE WORKSHOP HELD IN AUSTRALIA, 1995. Melbourne, **Proceedings ...**, JONT, 1995. p.100-109.

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2003. 93p. (Relatório Técnico-Científico, 12).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2004. 69 p. (Relatório Técnico-Científico, 18).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2005. 68p. (Relatório Técnico-Científico, 36).

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

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

SELIVANOVSKAYA, S.Y.; LATYPOVA, V.Z.; ARTAMONOVA, L.A Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v.38, n.8, p.1549-1556, 2003

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

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

TSADILAS, C.D.; MATSI, T.; BARBAYANNIS, N.; DIOMOYANNIS, D. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. **Communication Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n.15/16, p.2603-2619, 1995.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.

3 Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco

Resumo

O lodo de esgoto é o resultado do tratamento dos resíduos líquidos urbanos encaminhados às estações de tratamento (ETEs) através das redes de esgoto. A disposição final desse resíduo representa um ponto crítico para a operação eficiente e contínua das estações de tratamento. A disposição final do lodo de esgoto tratado (biossólido) em plantações florestais poderia ser de grande interesse, pois o potencial do lodo como fertilizante orgânico e condicionador do solo é inquestionável, devido às concentrações de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e micronutrientes presentes neste resíduo. Mas, sua utilização em áreas florestais de produção deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos ao ambiente. No Brasil, o uso do lodo de esgoto em plantações florestais pode tornar-se viável, visto que o solo das regiões aonde são instalados estes empreendimentos, apresentam geralmente baixa fertilidade. Também, as aplicações do lodo nas plantações florestais podem ser efetuadas espaçadamente, observando-se intervalos entre 5 e 7 anos, em virtude dos ciclos de corte usualmente adotados para estas culturas arbóreas. Foi objetivo deste trabalho verificar comparativamente a influência dos lodos de esgoto, úmido (torta) e seco (granulado), produzidos na ETE de Barueri da SABESP-SP, aplicados em doses crescentes nas linhas de plantio (variando de 5 a 30 toneladas por hectare) sobre o crescimento de árvores de *Eucalyptus grandis* plantadas em parcelas experimentais no espaçamento de 3 x 2 m. A pesquisa foi realizada na Estação de Ciências Florestais de Itatinga-SP (Universidade de São Paulo), através da qual foram avaliados 11 tratamentos com 3 repetições. Foram realizadas, periodicamente, as mensurações de altura e DAP de todas as árvores nas parcelas do experimento, obtendo-se os valores da altura dominante aos 4, 10, 15, 18, 25 e 36 meses de idade. Para se estimar o incremento volumétrico da madeira produzida, utilizaram-se os dados de inventários realizados aos 18 e 36 meses de idade. Aos 36 meses de idade, observou-se que os tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco apresentaram um crescimento em altura significativamente maior do que o observado no tratamento testemunha, mas similar ao observado no tratamento com adubação mineral convencional. Para o incremento volumétrico foram registrados resultados semelhantes aos observados para o crescimento em altura. Constatou-se, também, que a dose de biossólido mais adequada para a produção de madeira foi de 10 t ha⁻¹. Entretanto, não foi observada diferença significativa quanto à resposta dos eucaliptos à aplicação dos lodos nas formas de torta (úmido) ou granulado (seco). Pode-se concluir, portanto, que a aplicação do lodo esgoto (complementado com K e B) nas linhas de plantio dos eucaliptos permitiria a substituição das adubações nitrogenada e fosfatada, bem como a adição dos micronutrientes.

Palavras - chave: Lodo de esgoto, biossólido, crescimento, volume de madeira, *Eucalyptus grandis*

Eucalyptus growth with wet and dry sewage sludge in different doses

Abstract

The sewage sludge is the result of the urban liquid residues treatment directed to the treatment stations. A basic point for an efficient and continuous operation of the treatment stations is a final disposal of this residue. The forest potential is unquestioned, because the amount of organic substances, nitrogen and phosphorus in the sludge, but its use in productive forest areas must be made carefully in order to not provoke environmental damages. The use of sewage sludge in forest plantations is attractive because forest products are not destined to feed humans or animals and, generally, the forest soils are very poor. Also, sludge applications are carried with great intervals, because the long cycle of these cultures (7 years). The objective of this work was to verify the influence of sewage sludge application (humid and dry), produced in the treatment station of Barueri-SP (SABESP), applied in different doses (5, 10, 20 and 30 tons/hectare, complemented with K and B) on the experimental plots of *Eucalyptus grandis*. This research was carried at the Itatinga Station of Forest Sciences (SP/Brazil), where 11 treatments with 3 repetitions were evaluated. Height of all the trees in the parcels of the experimental plots were measured at the ages of 4, 10, 15, 18, 25 and 36 months. Wood volume was also measured with 18 and 36 months of age. As results, sewage sludge application increased wood volume of eucalypts more than the control (90%) and similarly to mineral fertilization. So, sewage sludge may substitute nitrogen and phosphorus fertilizations. However, increasing doses of sewage sludge did not affect differently wood volume of eucalypts. The amounts of nutrients supplied by 10 t ha⁻¹ of sewage sludge were enough to stimulate the growth. Consequently, until the present, addition of higher doses would be superfluous. The dry sludge, compared with wet sludge, did not affect differently the increment of wood volume of eucalypts.

Key – words: Growth, wood volume, sewage sludge, biosolids and *Eucalyptus*

3.1 Introdução

O lodo de esgoto é o resultado do tratamento dos resíduos líquidos urbanos, encaminhados às estações de tratamento através das redes de esgoto que se constitui num problema crescente devido ao contínuo aumento populacional das cidades. A disposição final adequada desse resíduo representa um ponto fundamental para a operação eficiente e contínua de uma estação de tratamento. De acordo com Tsutiya (2000), o processo de separação das impurezas presentes no esgoto, que correspondem apenas a uma pequena proporção do volume total (1 a 2%), tem um custo correspondente aproximadamente a 30% do custo operacional de uma estação de tratamento de esgoto.

Para a disposição final do lodo de esgoto a melhor opção seria sua utilização na agricultura, pois de acordo com Ludovice (2000), o potencial agrônômico do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor. O lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos sanitários deve ser processado de modo a permitir o seu manuseio de forma segura na utilização agrícola, outro fator importante é a aplicação correta do lodo para não causar danos ao ecossistema ou ao homem. O lodo produzido no tratamento do esgoto pode ter como alternativas de disposição à descarga oceânica, os aterros sanitários, a reciclagem agrícola ou a incineração. Seu aproveitamento em plantações florestais parece ser uma das opções mais indicadas sob os aspectos sanitários, ambientais, silviculturais, sociais e econômicos (POGGIANI e SILVA, 2005). Estados Unidos, Canadá e diversos países europeus, há mais de vinte anos, utilizam esse resíduo como fertilizante agrícola e florestal, mas no Brasil, o lodo de esgoto é despejado geralmente em aterros sanitários, gerando um impacto ambiental indesejável e muito caro para os municípios.

O uso do lodo de esgoto, em plantações florestais, pode ser considerado bastante atrativo, se considerarmos que os produtos dessas culturas não se destinam à alimentação humana ou animal. Os solos florestais, geralmente, são de baixa fertilidade e necessitam de um elevado aporte de nutrientes, que são supridos geralmente por adubos minerais, os quais poderiam ser substituídos com vantagem por adubos orgânicos, como por exemplo o lodo de esgoto (biossólido). Em se tratando de culturas de ciclo longo, a aplicação do lodo de esgoto seria também vantajosa, por apresentar uma taxa de degradação relativamente baixa, permitindo uma melhor sincronia entre a liberação dos nutrientes do lodo e sua captura pelo extenso sistema radicular das árvores.

Li et al. (2002) assinalam que a utilização do lodo, por conter matéria orgânica, nitrogênio e fósforo pode promover o aumento no crescimento das plantas devido à melhoria na fertilidade do solo. De acordo com Gobatto (2003), a disposição agrícola ou florestal do lodo de esgoto, incluído os custos de transporte até 100 km, seria mais vantajosa pelo aspecto econômico do que as outras alternativas de disposição como o despejo em aterro sanitário ou sua incineração.

Selivanovskaya et al. (2003) sugerem que um método para inverter o processo de degradação e melhorar a qualidade do solo é a adição de matéria orgânica, para tal, citam que o

uso de lodo de esgoto em culturas pode ter efeito positivo, aumentando o crescimento das plantas, sendo uma excelente alternativa para disposição do lodo de esgoto.

Segundo Poggiani et al. (2000), o lodo de esgoto apresenta vantagens em relação à fertilização mineral, devido à forma lenta e contínua de liberação dos nutrientes para o solo e sistema radicular das plantas, ao longo dos anos. Souza Vaz e Gonçalves (2000) pesquisaram o efeito da aplicação do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo aplicado nas entrelinhas de plantio em um plantio de eucalipto, detectando significativas modificações onde o lodo de esgoto foi aplicado. Em plantio de *Eucalyptus grandis*, Rocha (2002) concluiu que a fertilidade elevou-se gradualmente depois da aplicação do lodo de esgoto e que as plantas, assim tratadas, responderam positivamente com maiores ganhos de produtividade em relação à adubação convencional. De acordo com Souza Vaz (2000), a resposta à aplicação do lodo de esgoto foi mais evidente com o passar do tempo, refletindo seus efeitos (elevada disponibilidade de nutrientes às árvores) no decorrer da decomposição do lodo de esgoto aplicado. McNab e Bery (1985) estudando aplicação de lodo de esgoto em plantio florestal, observaram que o tratamento com aplicação de lodo obteve maior incremento comparativamente ao tratamento com fertilização mineral. Guedes (2005) observou que os efeitos da aplicação do lodo em parcelas experimentais de eucaliptos foram obtidos ao longo de todo o ciclo de crescimento, afetando favoravelmente o incremento da biomassa lenhosa, bem como a ciclagem dos nutrientes.

Kimberley et al. (2004) assinalam que a aplicação do lodo pode aumentar significativamente os retornos econômicos de uma plantação florestal devido à maior produtividade obtida compensando, dessa forma, os custos de transporte e aplicação do resíduo.

Historicamente, devido à sua simplicidade, o tratamento do lodo de esgoto com cal hidratada e cloreto férrico tem sido escolhido pelas primeiras estações de tratamento, visando sua reciclagem na agricultura. Posteriormente, o condicionamento do lodo passou a ser feito também com o uso de polímeros, que atuam como agregantes das partículas. Porém, esta prática não é ainda usual no Brasil, sendo mais utilizada em países europeus como a Alemanha e Inglaterra. Em São Paulo, Miki (1998) elaborou um estudo detalhado sobre a utilização de polímeros para condicionamento do lodo de ETEs, que indicou uma redução de custos de produtos químicos consumidos em relação ao condicionamento com cal e cloreto férrico, além de outras vantagens tecnológicas, inclusive a melhoria na qualidade do produto final. Andreoli (2001) observou uma ação efetiva do uso de polieletrólitos na desidratação do lodo de esgoto aeróbio. Portanto, o lodo

de esgoto tratado com polieletrólitos favorece também sua disposição nas culturas agrícolas ou florestais por ser também mais adequado, visto que o pH do solo é pouco alterado e a não adição da cal ao lodo distribuído no campo evita possíveis desequilíbrios nutricionais nas plantas cultivadas, que podem ocorrer a longo prazo.

Para aprimorar o tratamento do lodo de esgoto e viabilizar sua disposição na agricultura bem como em aterros sanitários, a SABESP, a partir de 2002, deu início ao procedimento de secagem térmica do lodo produzido na ETE Barueri, que vem sendo fornecido experimentalmente sob forma granulada. A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e do volume dos lodos, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerado também um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica, aspectos de importância fundamental, quando o lodo seco vai ser aplicado em sistemas agroflorestais (DAVID, 2002). Todavia, pouco se conhece a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente sobre o crescimento dos eucaliptos. Para tanto, o lodo úmido (torta) foi produzido na ETE de Barueri da SABESP, que trata parte do esgoto coletado na região metropolitana de São Paulo. A partir do lodo úmido foi produzido por secagem térmica também o lodo seco, o qual apresenta uma granulação variando entre 2 e 4 mm. Para a secagem do lodo foi utilizado um secador existente na ETE São Miguel da SABESP -SP, construído pela SEGHERS-Better Technology e que, através do aquecimento de serpentinas com óleo térmico, seca o lodo, elevando sua temperatura acima de 100 °C.

As vantagens da utilização do lodo seco em relação ao úmido em plantações florestais estão relacionadas com os custos de transporte e com as operações relativas à aplicação do lodo nos plantios florestais, fatores estes que afetam grandemente o retorno econômico no momento da colheita da madeira.

As hipóteses deste trabalho foram:

- 1) A utilização do lodo de esgoto em plantios florestais de eucaliptos aumenta a fertilidade do solo e conseqüentemente a produção de madeira;
- 2) A aplicação de lodo de esgoto em diferentes doses provoca distintas taxas de crescimento das árvores; e

3) Os lodos úmido (torta) e seco (granulado), produzidos na Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri, por apresentarem características distintas, influenciam diferentemente o crescimento dos eucaliptos.

Foi objetivo deste trabalho verificar a influência de dois tipos diferentes de lodo de esgoto (úmido e seco), produzidos na ETE de Barueri da SABESP-SP e aplicados em doses crescentes nas linhas de plantio, sobre o crescimento do *Eucalyptus grandis* na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga.

3.2 Material e métodos

Descrição da área experimental

Situação geográfica

A Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, localiza-se no município de Itatinga – SP, na latitude 23^o 02' e longitude 48^o 37', com altitude média de 830 m.

Clima

O clima do município de Itatinga, segundo classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico úmido com precipitação média mensal de 1350 mm. A temperatura média anual é de 19,4 °C e a umidade relativa de 83,3%, podendo ocorrer geadas leves nos meses de inverno.

Solo e vegetação natural

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-amarelo com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 3.1). Esse tipo de solo é um dos mais representativos das áreas onde se pratica a silvicultura intensiva do eucalipto no estado de São Paulo.

A vegetação natural da região é o cerrado, sendo que a maior parte da Estação Experimental de Itatinga era ocupada previamente por cerrado *sensu stricto*. Atualmente, na Estação Experimental de Itatinga há predominância das culturas florestais de eucaliptos e pinheiros, mas existem algumas manchas remanescentes da vegetação original.

Tabela 3.1 - Análise do solo antes da implantação da área experimental

Prof.	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	Sat.	S ⁻ SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³						%	Al ³⁺	mg dm ⁻³						
0-5	9	26	4	0,7	5	4	71	27	10	82	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5-10	6	17	4	0,6	3	2	57	24	5	63	8	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10-20	7	13	4	0,6	2	2	44	20	4	51	9	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Plantio e tratos silviculturais no talhão experimental

A área do talhão experimental era previamente ocupada por um povoamento de *Eucalyptus grandis*, com idade aproximada de 6 anos, submetido a um único corte raso. Em março de 2003, a área foi reformada com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis*. As atividades operacionais para instalação do experimento foram: 1) Aplicação de herbicida (mato-competição), subsolagem (preparo do solo) e combate às formigas cortadeiras na área experimental (24/03 a 28/03); 2) Marcação das parcelas experimentais e plantio das mudas (07/04 a 11/04); 3) Distribuição do lodo de esgoto e replantio das mudas mortas (14/04 a 18/04); e 4) Redistribuição do lodo de esgoto e novo replantio das mudas mortas (21/04 a 25/04).

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi implantado em blocos casualizados, definidos em função da declividade da área. Foram aplicados 11 tratamentos com 3 repetições, totalizando 33 parcelas. Cada parcela possui 384 m² (24x16 m) e é constituída por 8 linhas. Na linha, as plantas foram espaçadas em 2 m e nas entrelinhas em 3m, totalizando 64 plantas por parcela. A área útil da parcela considerou as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m².

Os tratamentos aplicados foram:

- 1) Testemunha absoluta (sem adubação e sem aplicação de lodo de esgoto);
- 2) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido;
- 3) Fertilização mineral *;
- 4) 5 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 5) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido incorporado + complementação;
- 6) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 7) 20 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 8) 30 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 9) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação;
- 10) 20 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação;
- 11) 30 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação.

* Adubação mineral utilizada por empresas florestais na região - 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total), 110 kg ha⁻¹ de 0-45-0 (no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de 10-20-10 (no sulco de plantio), 80 kg ha⁻¹ de 20-0-20 (45 dias pós-plantio, aplicado em meia lua ao redor da muda), 180 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (6 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio) e 240 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (12 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio).

A dose do lodo foi calculada em base seca e para a aplicação utilizaram-se recipientes calibrados. A complementação foi realizada com adição de Potássio e Boro, que é necessária devido aos baixos teores encontrados nos dois lodos (análise dos lodos na Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Análise química dos lodos úmido e seco

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl ₂ 0,01 M	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Mat. Orgânica resistente a compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	3,27 %	3,47 %
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,27 %	3,84 %
Potássio (K ₂ O) total	0,27 %	0,27 %
Cálcio (Ca) Total	2,52 %	2,46 %
Magnésio (Mg) Total	0,49 %	0,39 %
Enxofre (S) Total	0,66 %	0,68 %
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	0,057 %	0,07%
Manganês (Mn) Total	0,0194 %	0,030%
Zinco (Zn) Total	0,238 %	0,32%
Ferro (Fe) Total	3,90 %	4,52%
Boro (B) Total	0,0009 %	0,0002%
Sódio (Na) Total	0,0583 %	0,09%

Obs.: Valores obtidos em base seca

A complementação foi realizada, nos tratamentos com aplicação de lodo, de modo a igualar a quantidade total de Potássio e Boro adicionada no tratamento com a adubação convencional (Tabela 3.3). A complementação de cloreto de potássio foi realizada simultaneamente com as adubações de base e de cobertura do tratamento com a adubação convencional.

Tabela 3.3 – Nutrientes adicionados em cada tratamento através do lodo e da adubação mineral

Tratamentos	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Zn
 kg ha ⁻¹							
Testemunha	-	-	-	-	-	-	-	-
10 úmido sem complementação.	327	327	26	252	49	66	0,1	24
Ferti. mineral	115	80	126	440	160	5	3	1,5
5 úmido	163,5	163,5	126	126	24,5	33	3	12
10 úmido	327	327	126	252	49	66	3	24
20 úmido	654	654	126	504	97	133	3	48
30 úmido	981	981	126	755	146	199	3	71
10 seco	347	384	126	246	39	68	3	32
20 seco	695	768	126	492	78	136	3	64
30 seco	1042	1152	126	738	117	204	3	96

Crescimento das árvores

Foram realizadas, periodicamente, as medições de altura e DAP de todas as árvores nas parcelas do experimento (Figura 3.1), sendo mensuradas as 36 árvores úteis (desconsiderando uma bordadura simples) em cada uma das parcelas. Foram obtidos os valores da altura dominante nas idades de 4, 10, 15, 18, 25 e 36 meses de idade, esses valores foram obtidos da altura das 3 maiores árvores de cada uma das parcelas o que corresponde 100 árvores por hectare. Para o volume de madeira produzido, utilizaram-se os dados aos 18 e 36 meses de idade. Na determinação do volume individual das árvores foi utilizada a equação $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times DAP^{1,9117} \times HT^{1,3065}$ obtida por GUEDES (2005) em trabalho realizado na Estação Experimental de Itatinga, onde também foi avaliado o crescimento do *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólido nas entrelinhas de plantio.



Figura 3.1 – Mensuração da altura das árvores aos 6 meses de idade nos tratamentos I – testemunha e XI – 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto seco

Análise dos dados

As comparações entre as médias foram realizadas através da análise de variância e optou-se por aceitar todas as variações em nível de 5 e 1%. Para as análises nas quais se observou diferença significativa utilizou-se o teste complementar de Duncan que é mais sensível as possíveis diferenças que o teste de Tukey utilizado comumente nesse tipo de pesquisa (Pimentel - Gomes e Garcia, 2002). Para representar o nível de significância obtido pela análise da variância foram utilizadas as seguintes legendas: (ns) – não significativo, (*) – significativo a 5 %, e (**) – significativo a 1 %, sendo esses símbolos padrões utilizados comumente.

3.3 Resultados e discussão

O crescimento foi avaliado através da altura das árvores dominantes e do crescimento volumétrico observados em cada tratamento. Na Tabela 3.4 encontram-se os valores da altura dominante de todos os tratamentos estudados, com idade variando de 4 a 36 meses. A altura dominante é uma característica importante em silvicultura, como indicador da qualidade do sítio, pois permite avaliar o desempenho dos eucaliptos nos diferentes tratamentos, considerando de forma comparativa apenas a altura das três árvores dominantes em cada parcela experimental dentro dos blocos. Desta forma, levam-se em consideração apenas aquelas árvores que sofreram menores interferências prejudiciais ao longo do crescimento, tais como ataques de pragas, doenças ou efeitos de ações antrópicas, como, por exemplo, eventuais impactos de máquinas ou incêndios.

Observa-se que o tratamento testemunha sempre foi inferior aos demais desde a primeira medição aos 4 meses de idade. Aos 36 meses de idade, os tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco, de modo geral, não diferiram estatisticamente entre si sendo os resultados semelhantes aos obtidos no tratamento com adubo mineral, mas nitidamente superiores à testemunha. Por outro lado, o lodo úmido sem a complementação com K e B teve crescimento inferior aos tratamentos complementados, indicando que esses nutrientes são necessários para viabilizar o uso do lodo de esgoto como fertilizante. O tratamento com fertilização mineral apresentou na primeira mensuração valores superiores aos demais tratamentos, provavelmente devido à imediata liberação de nutrientes. O crescimento em altura na fase inicial demonstra que tratamento testemunha foi inferior a todos os demais. Isto indica que a adição do lodo de esgoto ao solo, mesmo sem complementação com K e B, aumentou a produtividade florestal.

Tabela 3.4 – Altura dominante (m) dos eucaliptos em todos os tratamentos do experimento dos 4 aos 36 meses de idade

Tratamentos	Idade (meses)					
	4	10	15	18	25	36
Testemunha	0,65 e	4,59 d	8,31 c	10,3 c	13,4 c	17,8 b
10 t (úmido)	0,83 b c	5,73 a b	9,53 a b	11,3 a b	14,3 b c	18,0 b
Fertilização mineral	0,96 a	5,40 b c	9,24 b	10,9 b	15,6 a b	19,4 a
5 t (úmido)+K+B	0,71 e d	5,07 c	9,37 a b	11,0 b	15,3 a b	19,7 a
10 t (úmido)+K+B-sulco	0,84 b c	5,96 a	10,02 a b	11,3 a b	15,9 a	20,6 a
10 t (úmido)+K+B	0,76 c d	5,50 a b	9,49 a b	11,0 b	15,6 a b	19,7 a
20 t (úmido)+K+B	0,88 a b	5,78 a b	10,19 a	11,3 a b	16,1 a	19,7 a
30 t (úmido)+K+B	0,84 b c	5,89 a	9,78 a b	11,5 a b	15,7 a	19,5 a
10 t (seco)+K+B	0,89 a b	5,77 a b	10,08 a b	11,7 a	16,2 a	20,6 a
20 t (seco)+K+B	0,88 a b	5,85 a b	10,08 a b	11,4 a b	16,2 a	19,6 a
30 t (seco)+K+B	0,83 b c	5,88 a	9,92 a b	11,5 a b	15,5 a b	19,9 a
Valor F	6,32 (**)	8,89 (**)	4,58 (**)	3,99 (**)	3,85 (**)	3,78 (**)

O crescimento em volume sólido de madeira é apresentado na Figura 3.2 e na Tabela 3.5, onde se observa que tratamento testemunha foi inferior a todos os demais, mesmo ao tratamento sem complementação que foi similar, estatisticamente, mas que apresentou volume 26% superior ao tratamento testemunha. Observa-se ainda que a dose de 10 t ha⁻¹ de lodo com complementação foi quase duas vezes superior ao tratamento testemunha.

De acordo com observações preliminares de Poggiani (2003), o crescimento mais acentuado das árvores neste experimento já havia sido constatado nos tratamentos com a

aplicação do lodo complementado com K e B, três meses após a implantação das mudas. Esse fato sugere que a aplicação dos lodos úmido e seco nas linhas de plantio disponibilizou rapidamente os nutrientes necessários para o crescimento inicial dos eucaliptos de maneira semelhante ao tratamento com adubo mineral. A dose de apenas 5 t ha⁻¹ de lodo, complementado com K e B, foi capaz de suprir de maneira adequada a necessidade nutricional dos eucaliptos na fase inicial. Esse resultado indica que a dose do lodo pode ser inferior ao comumente estudado, para plantações de eucalipto, que está à cima de 10 t/ha (GUEDES, 2005).

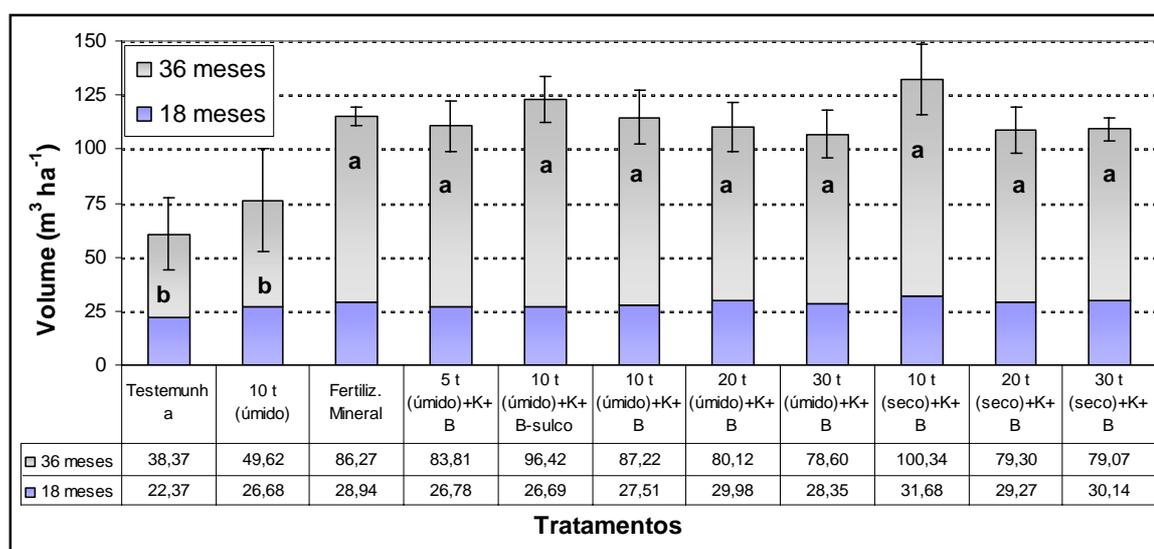


Figura 3.8 - Efeito da aplicação de biossólidos úmido e seco no crescimento volumétrico dos eucaliptos aos 18 e 36 meses

Segundo Gonçalves et al. (2000), sabe-se que na fase inicial de desenvolvimento dos eucaliptos ocorre uma grande dependência dos nutrientes disponíveis do solo.

Observou-se, desde o as primeiras medições, que os biossólidos aplicados afetaram favoravelmente o crescimento dos eucaliptos em relação à testemunha e se igualam em relação ao adubo mineral convencional. Entretanto não se observaram diferenças significativas entre os efeitos das diferentes doses aplicadas dos lodos úmido e seco. Também, comparativamente, não se detectou diferença entre o efeito da aplicação dos lodos úmido e seco sobre o crescimento dos eucaliptos. Observa-se que a doses de lodo de esgoto ao redor de 10 toneladas por hectare parece ser a mais adequada, visto que resulta num crescimento equivalente ao proporcionado pelas maiores doses de 20 e 30 toneladas (Figura 3.9 e Tabela 3.5). Resultado semelhante foi obtido por Guedes (2005) em plantio experimental de eucaliptos plantado em 1998 no qual o biossólido

úmido (torta), produzido na ETE de Barueri e tratado com cal e cloreto férrico, foi aplicado nas entrelinhas de plantio dos eucaliptos.

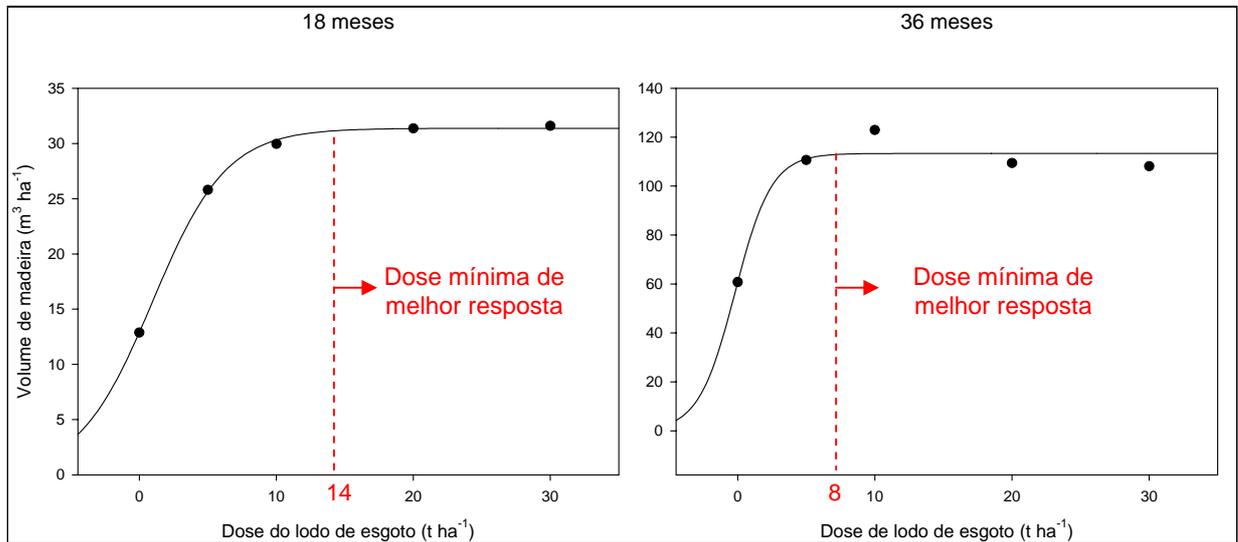


Figura 3.9 - Volume médio de madeira produzido nas parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*, aos 18 e 36 meses de idade, em função das doses crescentes dos lodos aplicados

A quantidade de nutrientes supridos com a adição de 10 toneladas por hectare de lodo complementado é suficiente para estimular o crescimento. Portanto, a adição de doses mais elevadas seria supérflua, visto que outros fatores interagem para o crescimento das árvores em plantios florestais, como por exemplo, a disponibilidade de água no solo ou a disponibilidade de energia luminosa. Em plantações de eucaliptos, a competição por luz começa a afetar o crescimento a partir do fechamento das copas, que neste experimento ocorreu aproximadamente aos 12 meses de idade. A resposta satisfatória dos eucaliptos à dose de 10 toneladas por hectare em relação à aplicação de doses mais elevadas de lodos de esgoto é vantajosa também do ponto de vista econômico, visto que implica no transporte de uma menor quantidade de lodo da ETE para o local de aplicação, reduzindo os custos. Por outro lado, quanto menor a quantidade de lodo aplicada, menor será o impacto sobre o solo, principalmente em relação à possível lixiviação dos nitratos e ao eventual acúmulo dos metais pesados.

Tabela 3.5 - Incremento médio anual com 3 anos de idade para o *Eucalyptus grandis* em parcelas experimentais com aplicação de lodo de esgoto

Tratamentos	IMA	
Testemunha	20,2	b
10 t (úmido)	25,4	b
Fertilização mineral	38,4	a
5 t (úmido)+K+B	36,9	a
10 t (úmido)+K+B-sulco	41,0	a
10 t (úmido)+K+B	38,2	a
20 t (úmido)+K+B	36,7	a
30 t (úmido)+K+B	35,7	a
10 t (seco)+K+B	44,0	a
20 t (seco)+K+B	36,2	a
30 t (seco)+K+B	36,4	a
Valor F	7,34 (**)	

Comparando os valores obtidos nos tratamentos com aplicação de lodo com os tratamentos testemunha e fertilização mineral, observa-se que as diferenças obtidas no crescimento entre os tratamentos com aplicação de lodo e o tratamento testemunha são maiores proporcionalmente aos 36 meses do que aos 18 meses, o que apresenta o continuado efeito da fertilização (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Comparação do volume de madeira (%) obtido nos tratamentos com a aplicação de lodo de esgoto em relação aos tratamentos testemunha e com fertilização mineral

Tratamentos	Tratamentos comparativos (%)			
	Testemunha		Fertilização mineral	
	Idade (meses)			
	18	36	18	36
Testemunha	-----	-----	-22,7	-47,3
10 t (úmido)	+19,3	+25,6	-7,8	-33,8
Fertilização Mineral	+29,4	+89,7	-----	-----
5 t (úmido)+K+B	+19,7	+82,1	-7,5	-4,0
10 t (úmido)+K+B-sulco	+19,3	+102,7	-7,8	+6,9
10 t (úmido)+K+B	+23,0	+88,9	-4,9	-0,4
20 t (úmido)+K+B	+34,0	+81,3	+3,6	-4,4
30 t (úmido)+K+B	+26,7	+76,1	-2,0	-7,2
10 t (seco)+K+B	+41,6	+117,4	+9,5	+14,6
20 t (seco)+K+B	+30,8	+78,7	+1,1	-5,8
30 t (seco)+K+B	+34,7+	+79,8	+4,1	-5,2

Na comparação entre os tratamentos com aplicação de lodo e o tratamento com fertilização mineral não se observa grandes variações, devido ao semelhante desenvolvimento do eucalipto, mas cabe ressaltar que no tratamento com fertilização mineral foram realizadas duas aplicações de adubo nitrogenado após o plantio (4 e 9 meses) e nos tratamentos com lodo todo o nitrogênio foi aplicado logo após o plantio (via lodo). Comparando o crescimento volumétrico devido à adição dos diferentes tipos de lodo (úmido e seco) não se verificou influência significativa no crescimento, indicando que a secagem térmica do lodo não afeta sua capacidade de suprir nutrientes para o sistema radicular dos eucaliptos. Este é um resultado promissor, visto que o lodo seco apresenta diversas vantagens sanitárias e operacionais em relação ao lodo úmido, tornando mais fácil e segura sua disposição nos agroecossistemas. Do ponto de vista operacional, a adição do lodo de esgoto nas linhas de plantio representa uma vantagem em relação à sua disposição nas entrelinhas, visto que, neste caso, o sistema radicular das mudas demora vários meses para alcançar a faixa onde foi aplicado o lodo de esgoto (entrelinha) e absorver os nutrientes disponibilizados através de sua degradação (GUEDES, 2005; POGGIANI, 2006).

A partir das observações de campo pode-se sugerir também que o lodo de esgoto úmido (aplicado na forma de torta) deveria ser aplicado nas linhas de plantio alguns dias da implantação das mudas, otimizando a liberação dos nutrientes para o solo e, por outro lado, reduzindo a mortalidade das mudas que podem ser afetadas negativamente pela intensa liberação de amônio, conforme observado por Milaré et al. (2005), que estudaram comparativamente a volatilização do N, após a aplicação dos lodos úmido e seco em plantações de eucaliptos na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ em Itatinga - SP.

Polglose e Myers (1995) na Austrália, em plantio experimental de eucaliptos irrigados com efluente proveniente de estação de tratamento de esgoto, observaram uma produção de 64 m³ por hectare, aos 34 meses de idade. Entretanto, deve-se considerar neste caso que, além da adição de nutrientes, houve também um aporte adicional de água, fator importante no crescimento dos eucaliptos, principalmente em regiões de baixa pluviosidade. De maneira geral, os resultados observados neste experimento evidenciam que o lodo de esgoto, complementado com K e B, poderia substituir satisfatoriamente a fertilização mineral, usualmente aplicada na área florestal.

3.4 Conclusões

1. A aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco nas linhas de plantio (complementados com K e B) incrementou significativamente o volume de madeira produzida pelos eucaliptos em relação à testemunha e apresentou resultado semelhante ao tratamento com adubo mineral. Portanto, o uso do lodo de esgoto poderia substituir as adubações nitrogenada e fosfatada, bem como o suprindo de micronutrientes (exceto B).
2. Entretanto, aos 18 e 36 meses de idade, as doses crescentes de lodos de esgoto úmido e seco (variando de 5 a 30 toneladas por hectare) não afetaram de forma diferenciada o volume de madeira produzido pelos eucaliptos.
3. A quantidade de nutrientes supridos com a adição de 10 toneladas por hectare de lodo foi suficiente para estimular o crescimento. Portanto, até esta idade, a adição de doses mais elevadas seria supérflua.
4. O lodo de esgoto seco não afetou de forma diferenciada o crescimento dos eucaliptos em relação ao lodo úmido. Portanto, a secagem do lodo representa uma grande vantagem, visto que facilita e barateia o transporte deste resíduo para locais mais afastados da ETE geradora.

Referências

ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; MADER NETTO, O.S. Desidratação de lodo aeróbio e séptico através de uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem uso de polieletrólitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21. **Anais...** João Pessoa, 2001 1 CD-ROM

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto:** determinação da umidade de equilíbrio. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GOBATTO, G. **O biossólido como insumo agrícola:** subsídios para formação de preço - o estudo de caso da ETE Franca. 2003, 100p. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) - Centro Universitário de Franca – Administração, Franca, 2003.

GONÇALVES, J. L. M; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.

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

KIMBERLEY, M.O.A; WANG, H.A; WILKS, P.J.B; FISHER, C.R.B; 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.

LI, G.; YIN, C.; LIN, Y.; LI, Z. Artificial improvement of soil fertility in a regraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge. **The journal of applied ecology**, Liaoning, v.13, n.2, p.159-162, 2002.

LUDUVICE M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.

MCNAB, W.H.; BERY, C. R. Distribution of aboveground in three pine species planted on a devastated site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. **Forest Science**, Bethesda, v.31, n.2, p.373-382, 1985.

MIKI, K.M.; SAMPAIO, A.O.; ALEM SOBRINHO, P. Benefícios técnicos e econômicos referentes à substituição, por polímeros, do método tradicional de condicionamento químico para desaguamento de lodo ETE em filtro prensa de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21, 2001. João Pessoa, **Proceedings...**São Paulo, POLITECNICA, 2001. 1 CD-ROM.

MILARE, G.; TRIVELIN, P. C. O.; LACLAU, J. P. Volatilização do nitrogênio de biossólidos aplicados em plantios de *Eucalyptus grandis*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 13., 2005, Piracicaba. **Resumos...** São Paulo: USP, 2005. 1 CD-ROM.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2003. 93p. (Relatório Técnico-Científico, 2).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2006. 70p. (Relatório Técnico-Científico, 42).

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. . In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed).

Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M. Biossólido aumenta produtividade de eucaliptos. **Revista Visão Agrícola**. Piracicaba: ESALQ/USP, p.105-107, dez. 2005.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. (Ed). Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species. In: JOINT AUSTRALIAN/JAPANESE WORKSHOP HELD IN AUSTRALIA, 1995. Melbourne, **Proceedings ...**, JONT, 1995. p.100-109.

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

SELIVANOVSKAYA, S.Y.; LATYPOVA, V.Z.; ARTAMONOVA, L.A Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v.38, n.8, p.1549-1556, 2003

SOUZA VAZ, L.; GONÇALVES, J.L.M.: Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: II. Efeitos na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. . In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.9, p.179-198.

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

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto . In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.

4 Influências da aplicação de lodos de esgoto úmido e seco sobre a ciclagem dos nutrientes em povoamentos experimentais de *Eucalyptus grandis*

Resumo

O lodo de esgoto é o resíduo sólido resultante do tratamento do esgoto nas estações de tratamento (ETEs). O lodo de esgoto depois de tratado e higienizado é denominado também de bio sólido, sendo, geralmente, enviado para o aterro sanitário. Entretanto, sua disposição em ecossistemas agroflorestais poderia ser uma das opções mais adequadas do ponto de vista ambiental, econômico e social. Porém, sua disposição em áreas destinadas à agricultura ou à silvicultura deve ser feita de maneira cuidadosa. Este estudo teve como objetivo ampliar os conhecimentos sobre a aplicação do lodo de esgoto em plantios florestais e verificar sua influência sobre crescimento das árvores e também na ciclagem dos nutrientes no ecossistema. Foi utilizado experimentalmente o lodo de esgoto produzido na ETE de Barueri da SABESP – SP, que foi aplicado na forma úmida (torta) e seca termicamente (granulada) nas linhas de plantio dos eucaliptos. O experimento foi instalado em abril de 2003 na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga-SP, sendo que os tratamentos aplicados foram: 1) – Testemunha; 2) - Adubação mineral; 3) -10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido; e 4) - 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco. Observou-se que, 36 meses após o início do experimento, a aplicação do lodo incrementou significativamente o volume de madeira produzido em relação ao tratamento controle e de maneira semelhante em relação ao tratamento com adubo mineral. Refletiu-se de maneira positiva ainda sobre ciclagem dos nutrientes, aumentando as transferências dos diversos elementos entre os componentes do sistema “árvores – serapilheira – solo”. Foi observado o aumento da taxa de decomposição do folheto nos tratamentos com a adição dos lodos de esgoto úmido e seco em relação à testemunha, mas não houve diferença entre os tratamentos com os lodos úmido (torta) e seco (granulado)

Palavras – chave: Lodo de esgoto, bio sólido, ciclagem de nutrientes, crescimento, e *Eucalyptus grandis*

The influence of sewage sludge on nutrients cycling in *Eucalyptus grandis* plantation

Abstract

Sewage sludge is the solid residue of the sludge treatment. It is also known as biosolids and, in Brazil, its main alternative is the disposal in sanitary facility. However, forest and agricultural recycling would be one of the better options for final disposal of sludge, considering the environmental, economic and social factors. The objectives of this experiment were to verify the influence of wet and dry sewage sludge when applied to the soil of eucalypt experimental plots on the increment of woody biomass and nutrients transferences between the ecosystem compartments “trees–litter–soil”. The experiment started in April 2003, in the Experimental Station of Forest Sciences at Itatinga-SP/Brazil. The applied treatments were: 1) - Control; 2) –

Mineral fertilization; 3) -10 t ha⁻¹ wet sewage sludge; e 4) - 10 t ha⁻¹ dry sewage sludge. The biosolids, complemented with K and B, was carried on the rows of planting in the experimental plots of eucalypts. It was observed, 36 months after planting, that sewage sludge increased woody biomass produced by the eucalypts, serving as a source of nutrients, and increased also nutrient transferences between the different compartments in the forest ecosystem. It was also observed the faster litter decomposition in the experimental plots treated with wet and dry sewage.

Key-words: Sewage sludge, biosolids, nutrients cycling, growth, litter decomposition and *Eucalyptus grandis*

4.1 Introdução

O lodo de esgoto é o resultado do tratamento dos resíduos líquidos urbanos encaminhados às estações de tratamento através das redes de esgoto. De acordo com Tsutiya (2000), o processo de separação das impurezas presentes no esgoto, cerca de 1 a 2% do volume total, corresponde de 20 a 40 % do custo operacional de uma estação de tratamento de esgoto no Brasil.

O lodo produzido no tratamento de esgoto, fração sólida, pode ter diferentes alternativas de disposições como os aterros sanitários, a reciclagem agrícola ou a incineração. De acordo com Ludovice (2000), o potencial agrônômico do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor.

Os riscos da utilização de lodo em plantios florestais são menores do que a utilização em culturas agrícolas, pois os produtos não são comestíveis, os ciclos das culturas florestais são mais longos permitindo maiores intervalos entre as aplicações e geralmente os solos são pobres resultando em melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e menores perdas dos mesmos por lixiviação.

Poggiani et al. (2000) descrevem que o lodo de esgoto apresenta vantagens em relação à adubação mineral devido à forma lenta e contínua de liberação dos nutrientes para o solo e sistema radicular das árvores, ao longo dos anos. Em culturas de ciclo longo, essa liberação lenta pode ser vantajosa para alguns nutrientes. Rocha (2002) conclui que a fertilidade elevou-se gradualmente, em plantio de *Eucalyptus grandis*, depois da aplicação do lodo de esgoto e que as plantas que foram fertilizadas com o mesmo responderam positivamente com maiores ganhos de produtividade em relação à adubação convencional.

O tratamento do lodo de esgoto com cal hidratada e cloreto férrico, devido à sua simplicidade, tem sido escolhido por diversas estações de tratamento, visando sua reciclagem na

agricultura. Outro método para o tratamento do lodo é uso de polímeros, que atuam como agregantes das partículas, mas essa prática não é usual no Brasil, sendo mais utilizada em países europeus como a Alemanha e Inglaterra. Em São Paulo, Miki (1998) elaborou um estudo detalhado sobre a utilização de polímeros para condicionamento do lodo de ETEs, que indicou uma redução de custos de produtos químicos consumidos em relação ao condicionamento com cal e cloreto férrico, além de outras vantagens tecnológicas, inclusive a melhoria na qualidade do produto final. Andreoli (2001) observou uma ação efetiva do uso de polieletrólitos na desidratação do lodo de esgoto aeróbio. Portanto, o lodo de esgoto tratado com polieletrólitos favorece também sua disposição nas culturas agrícolas ou florestais por ser também mais adequado, visto que o pH do solo é pouco alterado e a não adição da cal ao lodo distribuído no campo evita possíveis desequilíbrios nutricionais nas plantas cultivadas, que podem ocorrer a longo prazo.

A partir de 2002, a SABESP deu início ao procedimento de secagem térmica de parte do lodo produzido na ETE Barueri. A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e do volume do lodo, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerado também um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica, aspectos de importância fundamental, quando o lodo seco vai ser aplicado em sistemas agroflorestais (DAVID, 2002). Todavia, pouco se conhece a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente sobre o desenvolvimento dos eucaliptos. As vantagens da utilização do lodo seco em relação ao úmido em plantações florestais estão relacionadas com os custos de transporte e com as operações relativas à aplicação do lodo nos plantios florestais, fatores que afetam o retorno econômico das plantações florestais.

Guedes (2000) demonstrou a influência da aplicação do lodo de esgoto na ciclagem de nutrientes, pois verificou alterações significativas nos teores de nutrientes no folheto das árvores de eucalipto que receberam o resíduo. Hobbie e Vitousek (2000) observaram a influência de diferentes teores de N e P na decomposição da serapilheira. Sabe-se que esses são os dois nutrientes com maiores concentrações no lodo de esgoto e podem, portanto, modificar a taxa de decomposição da serapilheira das plantações florestais.

A ciclagem de nutrientes em florestas (Figura 3. 1), visando o estudo do ecossistema, pode ser subdividida em três diferentes ciclos (PRITCHETT, 1979; NEVES et al., 2001).

1- O *ciclo geoquímico* diz respeito às entradas e saídas de nutrientes que ocorrem no ecossistema florestal. As principais entradas ocorrem através do intemperismo da rocha matriz, da precipitação e deposição atmosféricas, da fixação simbiótica e não simbiótica do nitrogênio e da eventual aplicação de fertilizantes. As saídas ocorrem através do processo de lixiviação, de volatilização, de erosão e eventualmente da extração da biomassa florestal;

2- O *ciclo biogeoquímico* compreende os processos de transferência dos nutrientes dentro do sistema solo-planta. O processo inicia-se com a absorção pelas raízes dos elementos biodisponíveis no solo, os quais são incorporados na biomassa arbustiva, arbórea e herbácea da floresta. O retorno de nutrientes ao solo ocorre através da produção da serapilheira constituída pelos diferentes componentes das árvores (folhas, ramos, casca etc.) e da morte e decomposição das raízes. O ciclo biogeoquímico é particularmente importante, em florestas sobre solos pobres, altamente intemperizados, mais característicos das florestas tropicais onde a biomassa vegetal é o principal reservatório de nutrientes (GOLLEY et al. ,1978)

3- O ciclo bioquímico refere-se ao processo de transferência interna dos nutrientes nas plantas, que possibilita a redistribuição de nutrientes dos tecidos velhos para os novos. Este ciclo é mais importante em se tratando dos nutrientes com alta mobilidade nos vegetais, como por exemplo o nitrogênio, o fósforo e o potássio; mas, de menor significado para os nutrientes que apresentam redistribuição limitada como por exemplo o cálcio.

O folheto (folhas decíduas) é considerada um dos principais componentes dentro do ciclo biogeoquímico, correspondendo a cerca de 60 a 80% da produção de serapilheira. Nos solos florestais, a deposição das folhas tem efeito significativo na composição, disponibilidade e retenção dos nutrientes no ecossistema (Caldeira et al., 1999). As concentrações de determinados nutrientes nas folhas e demais componentes das árvores podem ser modificadas com aplicação de fertilizantes minerais ou orgânicos ao solo, como observado por Guedes (2005), que estudou a aplicação de lodo de esgoto numa plantação de eucaliptos.

Moffat et al. (1991) relatam que os teores de P nas folhas de *Pinus* foram modificados devido à aplicação do lodo de esgoto. Guedes e Poggiani (2003), que estudaram a aplicação do lodo de esgoto em *Eucalyptus grandis* nas entrelinhas de plantio do povoamento florestal, obtiveram mudanças no estado nutricional dos eucaliptos e observaram o aumento das concentrações de N, P, Ca e S e a diminuição das concentrações de Mn e Mg.

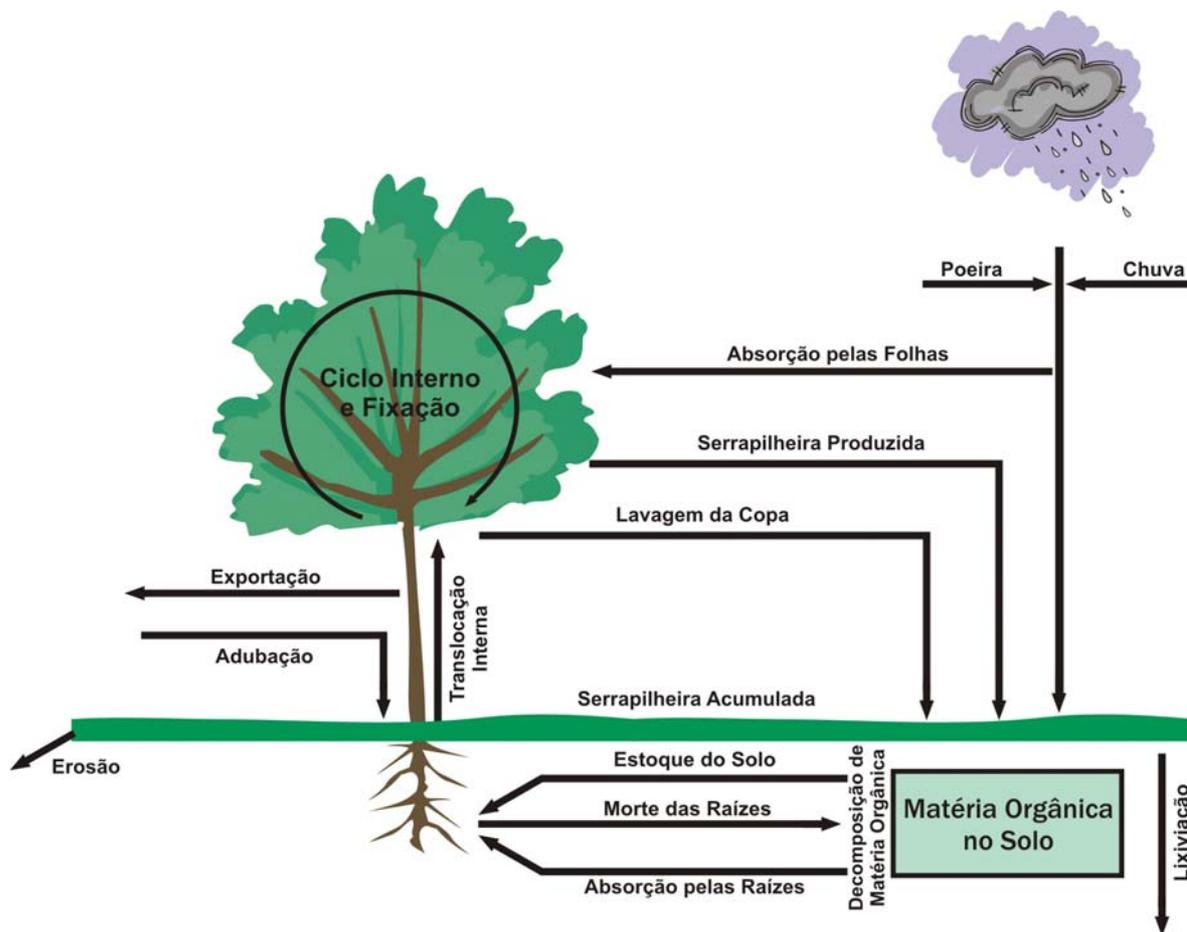


Figura 4. 1 – Ciclagem de nutrientes no ecossistema florestal

As hipóteses do trabalho foram:

- 1- A adição do lodo de esgoto ao solo em plantios de eucaliptos aumenta a quantidade de nutrientes disponíveis e, conseqüentemente, a produção de madeira.
- 2- A aplicação do lodo de esgoto em plantios de eucaliptos aumenta o teor de nutrientes nas folhas, bem como a produção de folheto e a taxa decomposição do folheto, acelerando transferência de nutrientes no ecossistema.
- 3- Os lodos úmido (torta) e seco (granulado), produzidos na Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri, por apresentarem características distintas, influenciam diferentemente no crescimento e na ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto.

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da adição dos lodos de esgoto úmido e seco, produzidos na ETE de Barueri da SABESP-SP, sobre o crescimento e a ciclagem dos nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*.

4.2 Material e métodos

Descrição da área experimental

A Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, localiza-se no município de Itatinga – SP, na latitude 23^o 02' e longitude 48^o 37', com altitude média de 830 m.

O clima do município de Itatinga, segundo classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico úmido com precipitação média mensal de 1350 mm. A temperatura média anual é de 19,4 °C e a umidade relativa de 83,3%, podendo ocorrer geadas leves nos meses de inverno.

Os dados das condições climáticas foram coletados na estação experimental de Itatinga, sendo observado déficit hídrico nos períodos de setembro de 2003; março, agosto, setembro e dezembro de 2004; fevereiro, agosto e dezembro de 2005; e abril de 2006 (Figuras 4.2 e 4.3).

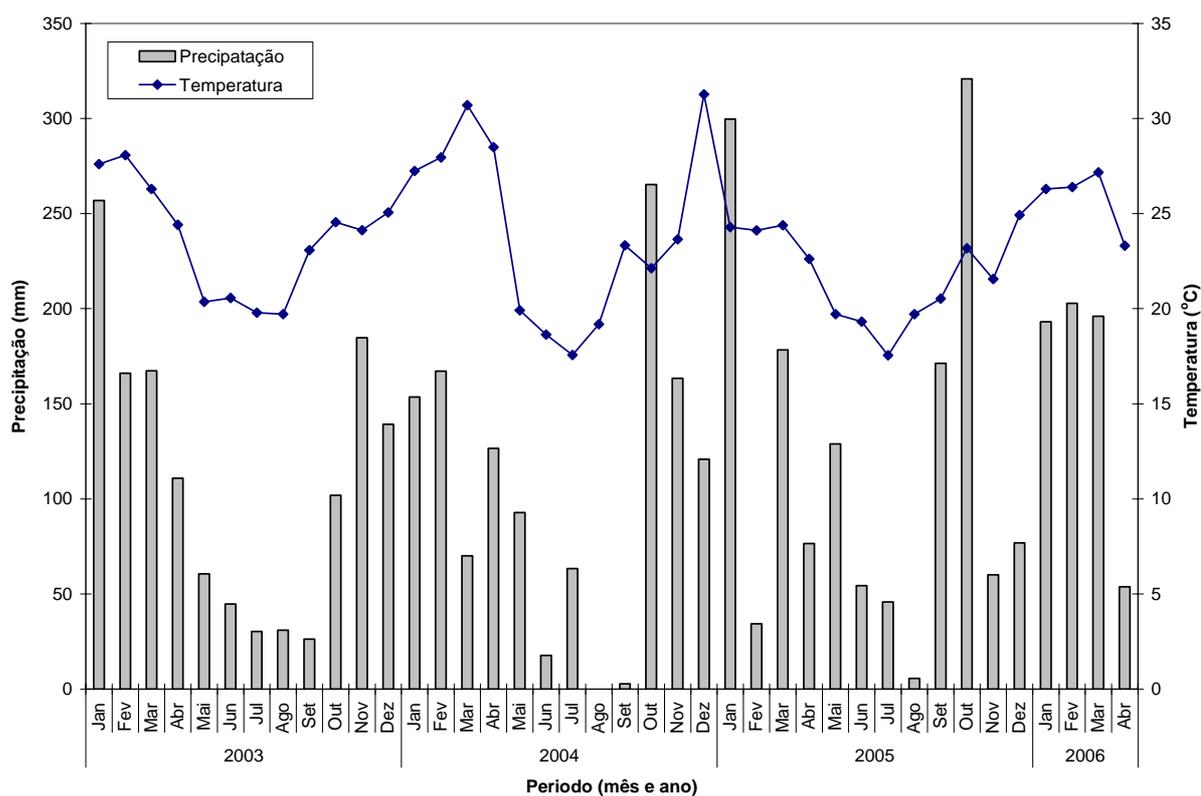


Figura 4. 2 – Variação da precipitação mensal e da temperatura média mensal na estação experimental de Itatinga durante o experimento

Os dados climáticos e o extrato do balanço hídrico apresentados (Figuras 4.2 e 4.3) foram inseridos no texto com a finalidade de interpretar as variações observadas na produção do folheto, bem como as flutuações dos teores nutricionais nas folhas dos eucaliptos e no folheto produzido ao longo do tempo.

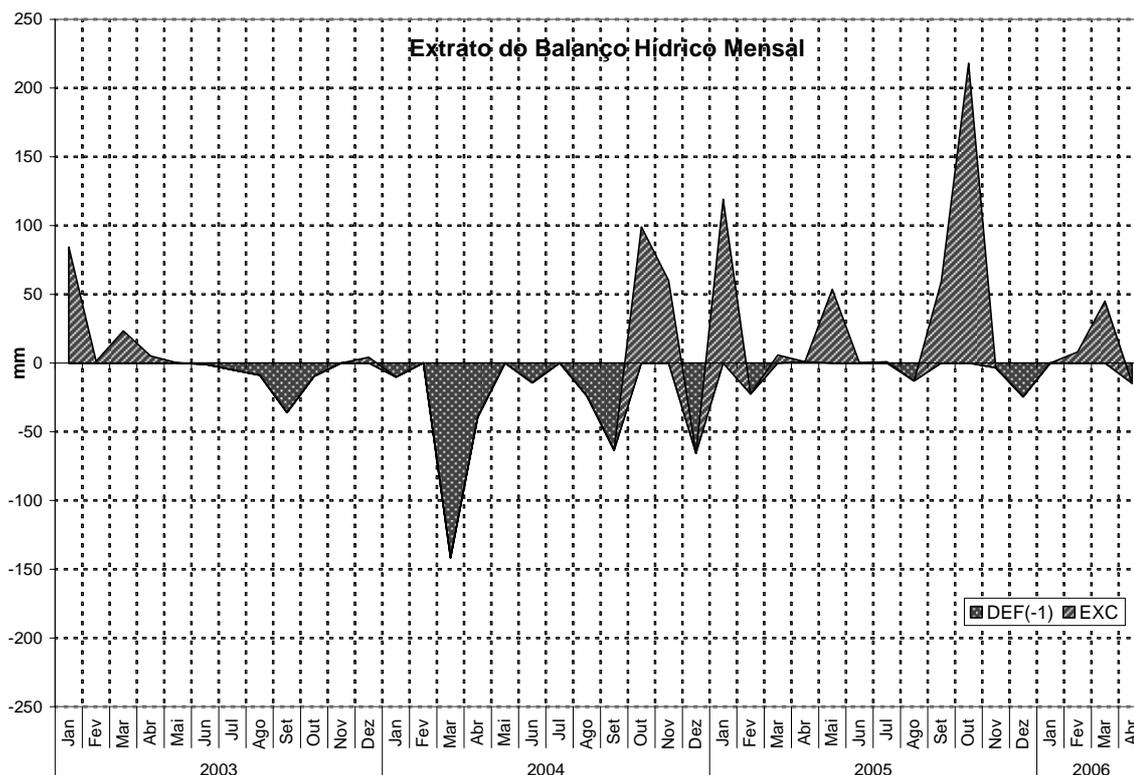


Figura 4.3 – Extrato do balanço hídrico mensal relacionando o déficit e o excedente hídrico durante o período de estudo

Solo e vegetação natural

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-amarelo com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 4.1). Esse tipo de solo é um dos mais representativos das áreas de silvicultura do eucalipto no estado de São Paulo.

A vegetação natural da região é o cerrado, sendo que a maior parte da Estação Experimental de Itatinga era ocupada primitivamente por cerrado *sensu stricto*. Atualmente, na Estação Experimental de Itatinga há predominância das culturas florestais de eucaliptos e pinheiros, mas existem algumas manchas remanescentes da vegetação nativa.

Tabela 4.1 - Análise do solo antes da implantação da área experimental

Prof.	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	Sat.	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³						%	Al 3+	mg dm ⁻³						
0-5	9	26	4	0,7	5	4	71	27	10	82	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5-10	6	17	4	0,6	3	2	57	24	5	63	8	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10-20	7	13	4	0,6	2	2	44	20	4	51	9	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Plantio e tratos silviculturais no talhão experimental

A área do talhão experimental N^o 37, utilizado nesta pesquisa, era previamente ocupada por um povoamento de *Eucalyptus grandis* com idade aproximada de 6 anos, submetido a um único corte raso (final). A área foi reformada em março de 2003 com mudas formadas a partir de sementes de *Eucalyptus grandis*. As atividades operacionais para instalação do experimento foram: aplicação de herbicida (mato-competição), subsolagem nas linhas de plantio (preparo do solo), combate às formigas cortadeiras no período de 24/03 a 28/03; marcação das parcelas e plantio das mudas no período de 07/04 a 11/04; e distribuição do lodo de esgoto e replantio das mudas mortas no período de 14/04 a 25/04.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi implantado em blocos casualizados, definidos em função da declividade da área. Foram estudados 4 tratamentos com 3 repetições, totalizando 12 parcelas de 384 m² (24x16 m). Na linha, as plantas foram espaçadas em 2 m e nas entrelinhas em 3m, totalizando 64 plantas por parcela. A área útil da parcela considerou as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m².

Os tratamentos aplicados foram:

- 1 - Testemunha absoluta (sem adubação mineral e sem aplicação de lodo de esgoto);
- 2 - Adubação mineral (utilizada por empresas florestais na região de Itatinga);
- 3 - 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação com K e B;
- 4 - 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação com K e B;

As doses dos lodos aplicadas nos tratamentos foram calculadas em base seca e para a aplicação nas linhas de plantio dos eucaliptos utilizaram-se recipientes calibrados. A complementação foi realizada com adição de Potássio e Boro, que é necessária devido aos baixos teores destes elementos encontrados nos lodos (análise dos lodos na Tabela 4.2).

A complementação foi realizada, nos tratamentos com aplicação de lodo, de modo a igualar a quantidade total de Potássio e Boro adicionada no tratamento com a adubação convencional (Tabela 4.3). A complementação de cloreto de potássio foi realizada simultaneamente com as adubações do tratamento com a adubação mineral.

Tabela 4.2 - Análise química dos lodos úmido e seco

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl ₂ 0,01 M	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Matéria Orgânica resistente a compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	3,27 %	3,47 %
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,27 %	3,84 %
Potássio (K ₂ O) total	0,27 %	0,27 %
Cálcio (Ca) Total	2,52 %	2,46 %
Magnésio (Mg) Total	0,49 %	0,39 %
Enxofre (S) Total	0,66 %	0,68 %
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	0,057 %	0,07%
Manganês (Mn) Total	0,0194 %	0,030%
Zinco (Zn) Total	0,238 %	0,32%
Ferro (Fe) Total	3,90 %	4,52%
Boro (B) Total	0,0009 %	0,0002%
Sódio (Na) Total	0,0583 %	0,09%

Obs.: Valores obtidos em base seca, relacionando a massa do elemento com a massa total.

Tabela 4.3 – Nutrientes adicionados nos tratamentos através dos lodos e da adubação mineral

Tratamentos	Idade (dias)	Insumo (por árvore)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Zn
		 kg ha ⁻¹							
1 (Testemunha)		sem adubação	-	-	-	-	-	-	-	-
		TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	-
2 (Adubação mineral)	45	1,2 kg de calcário dolomítico	-	-	-	440	160	-	-	-
	7	160 g NPK 6:30:6 + 2% S + 0,5% Zn	16	80	16	-	-	5	-	1,5
	90	70 g de Nitrato de Amônio	39	-	-	-	-	-	-	-
	90	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	90	8 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	1,5	-
	180	180 g de NPK 20:0:20+0,5% B	60	-	60	-	-	-	1,5	-
		TOTAL	115	80	126	440	160	5	3	2
3 (10 t ha ⁻¹ lodo úmido)	7	26 kg de biossólido úmido	320	320	26	248	48	66	0,1	24
	7	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	90	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	180	34 g de Cloreto de Potássio	-	-	34	-	-	-	-	-
	90	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2,9	-
		TOTAL	320	320	126	248	48	66	3	24
4 (10 t ha ⁻¹ lodo seco)	7	6 kg de biossólido seco	322	356	25	228	36	63	0,1	32
	7	16 g de Cloreto de potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	90	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	180	35 g de Cloreto de Potássio	-	-	35	-	-	-	-	-
	90	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2,9	-
		TOTAL	322	356	126	228	36	63	3	24

Crescimento das árvores

Foram realizadas as medições de altura e DAP em todas as árvores nas parcelas do experimento, sendo mensuradas as 36 árvores úteis (desconsiderando uma bordadura simples) em cada uma das parcelas. Foram obtidos os valores na idade de 18 e 36 meses e na determinação do volume individual das árvores foi utilizada a equação $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times DAP^{1,9117} \times HT^{1,3065}$, obtida por GUEDES (2005) em trabalho realizado na Estação Experimental de Itatinga, onde também foi avaliado o crescimento do *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólido nas entrelinhas de plantio.

Concentração dos nutrientes nas folhas dos eucaliptos

Em cada parcela foram obtidas amostras compostas, sendo coletadas folhas adultas. As folhas foram secas em estufa (60°C) até atingirem peso constante. Logo após foram moídas e encaminhadas para análise química. Foram analisados os macro e micro-nutrientes. Essa etapa foi realizada semestralmente para as doze parcelas estudadas (4 tratamento x 3 blocos), sendo a primeira análise aos 6 meses de idade.

Produção e análise mineral do folheto.

Para a quantificação do folheto foram utilizados coletores (52x52 cm) com bordas de madeira (8 cm de altura) que prendem uma tela de nylon (malha de 2 mm) e estão fixados sobre quatro piquetes (aproximadamente 30 cm acima do solo). As coletas foram realizadas mensalmente a partir do fechamento das copas, que ocorreu aos 12 meses de idade. Foram utilizados seis coletores por parcela, nos três blocos dos quatro tratamentos estudados, totalizando 72 coletores. Os coletores têm disposição em função da distância da árvore (Figuras 4.4 e 4.5), de modo a melhor amostrar a produção do folheto dentro da parcela.

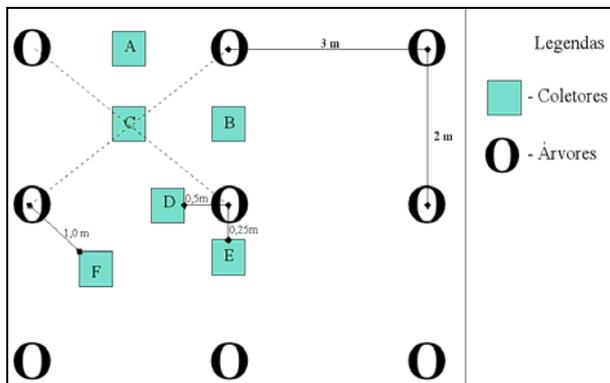


Figura 4.4 - Croqui de distribuição dos coletores em cada parcela

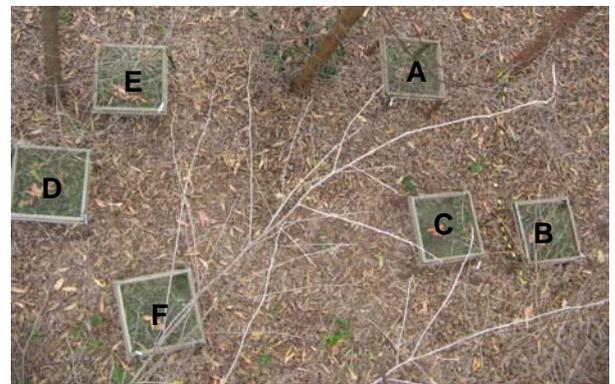


Figura 4.5 – Coletores de folheto implantados no experimento

Composição química do folheto

Mensalmente foram obtidas as amostras de folheto para a quantificação da biomassa produzida. O folheto produzido, após secagem, foi armazenado e, a cada 3 meses, obtinha-se uma amostra composta, representativa de uma estação do ano. Essas amostras foram analisadas quimicamente para estimar a transferência de nutrientes das árvores para o solo.

Acúmulo e decomposição do folheto sobre o solo

Para a quantificação do folheto acumulado sobre o solo foram utilizados coletores formados por molduras de madeira, com as dimensões de 50 x 50 cm (0,25m²), sendo coletadas 3 amostras por parcela estudada. Esses coletores foram colocados sobre o solo nas parcelas dos diferentes tratamentos e, com o auxílio de uma espátula, todo o folheto presente na área interna do coletor foi removido para pesagem e análise. As coletas foram trimestrais a partir do 27^o mês

após o plantio. Essas amostras foram analisadas para estimar o estoque de nutrientes nesse compartimento.

Decomposição do folheto em condições de campo

Para cada tratamento foram utilizadas bolsas construídas com tela de nylon vazado, com malha de 0,5 cm, contendo 10 g de folheto seco (Figura 4.6). Estas bolsas foram deixadas em contato com o solo e a serapilheira acumulada nas parcelas experimentais, na mesma condição de decomposição que ocorre no campo. Essas bolsas foram colocadas dentro da parcela experimental 18 meses após o plantio. As bolsas foram coletadas aos 45 e 90 dias após o início do estudo e posteriormente a cada 3 meses. Após a coleta das bolsas, o folheto contido foi retirado cuidadosamente, seco e limpo (com o auxílio de um pincel) para realização da pesagem e, posteriormente, da análise química.



Figura 4.6 – Bolsa de decomposição de folheto entre os componentes da serapilheira nas parcelas experimentais

Retranslocação dos macronutrientes nas folhas

Para o cálculo de retranslocação dos nutrientes utilizou-se a equação que considera que o elemento cálcio (Ca) não se transloca das folhas senescentes para as folhas novas (ciclo bioquímico) e compara a relação dos elementos com o cálcio no folheto depositado, correlacionando-o com o teor dos nutrientes nas folhas maduras coletadas no terço superior da copa dos eucaliptos.

$$\text{Retranslocação} = 1 - \frac{[\text{elemento}_{\text{folheto}}] / [\text{Ca}_{\text{folheto}}]}{[\text{elemento}_{\text{folha}}] / [\text{Ca}_{\text{folha}}]}$$

Análise dos dados

As comparações entre as médias foram realizadas através da análise de variância e optou-se por aceitar todas as variações em nível de 10%. Para as análises nas quais se observou diferença significativa, utilizou-se o teste complementar de Duncan que é mais sensível as possíveis diferenças do que o teste de Tukey, comumente utilizado nesse tipo de pesquisa (Pimentel- Gomes e Garcia, 2002). Para representar o nível de significância obtido pela análise da variância foram utilizadas as seguintes legendas: (ns) – não significativo, (10%) – significativo a 10 %, (*) – significativo a 5 %, e (**) – significativo a 1 %, sendo esses símbolos padrões utilizados comumente, com a exceção nível de 10 % que neste estudo está sendo considerado.

Foram ajustadas equações e calculadas as taxas de decomposição segundo o modelo exponencial negativo de perda de massa e nutrientes ao longo do tempo.

4.3 Resultados e discussão

Volume sólido de madeira dos eucaliptos

O volume sólido de madeira resultante dos inventários realizados aos 18 e aos 36 meses, após o plantio das mudas, incluindo todas as árvores das parcelas úteis, é apresentado na Figura 4.7. Observa-se que a adição do lodo de esgoto ao solo (complementado com K e B), aumentou a produtividade florestal, obtendo um valor superior ao tratamento sem adubação e semelhante ao tratamento com a aplicação da adubação mineral, que é utilizada geralmente nas empresas florestais. A resposta positiva no crescimento dos eucaliptos tratados com lodo foi observada já no primeiro inventário, aos 18 meses de idade. A diferença entre o volume de madeira produzida no tratamento que recebeu o lodo seco em relação ao adubo mineral passou de 9,5% aos 18 meses para 16,3% aos 36 meses de idade.

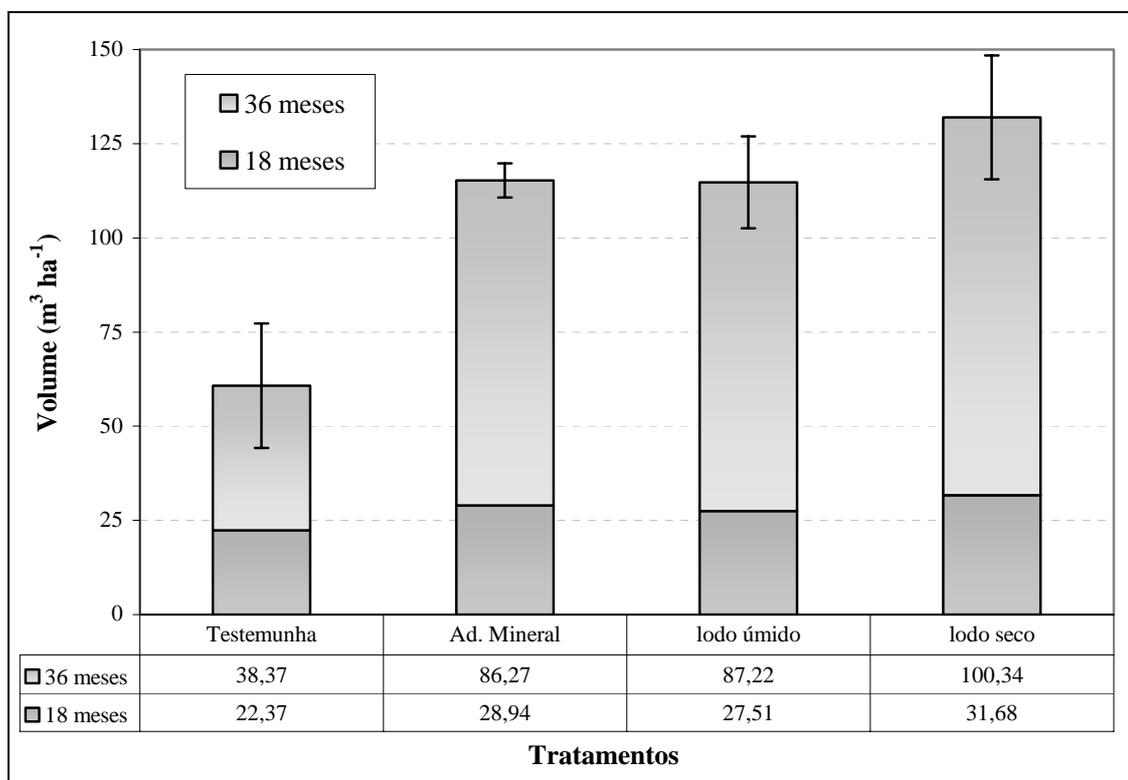


Figura 4.7 – Volume de madeira produzido aos 18 e aos 36 meses nos tratamentos estudados

Concentração dos nutrientes nas folhas

Observa-se na tabela 4.4, que os tratamentos com a adição de lodo apresentaram teores mais elevados de P em quase todas as amostras coletadas ao longo dos 36 meses, enquanto que os elementos N e S mantiveram-se mais elevados apenas até o 12^o. mês. O Ca não apresentou variações significativas e o K também não acusou diferenças entre os tratamentos. Este comportamento já era esperado para este elemento, considerando sua baixa concentração no lodo de esgoto. Contrariamente o Mg manteve-se mais elevado ao longo do tempo no tratamento com adubação mineral, devido á calagem efetuada neste tratamento ao início do experimento.

Tabela 4.4 – Concentração dos macronutrientes nas folhas dos eucaliptos ao longo de 36 meses

Tratamentos	Elementos (g kg ⁻¹)											
	N		P		K		Ca		Mg		S	
	6 meses											
Testemunha	25,1	b	0,90	c	6,03	a b	3,70	a	1,67	b	1,03	b
Ad. mineral	21,7	c	0,97	b c	6,50	a	2,83	b	1,83	a	0,93	b
Lodo úmido	28,7	a	1,10	a b	6,83	a	3,40	a	1,40	b c	1,63	a
Lodo seco	27,1	a b	1,13	a	5,33	b	3,80	a	1,43	c	1,53	a
Valor F	14,64 (**)		5,70 (*)		4,6 (10%)		18,85 (**)		7,66 (*)		37,00 (**)	
	12 meses											
Testemunha	22,7	b	1,43	b	7,30	a	6,27	a	3,00	a	1,53	a
Ad. mineral	23,6	b	1,17	c	7,80	a	5,43	a	3,10	a	1,17	b
Lodo úmido	27,8	a	1,70	a	8,33	a	6,10	a	2,57	b	1,50	a
Lodo seco	27,4	a	1,53	a b	7,73	a	6,27	a	2,43	b	1,70	a
Valor F	8,06 (*)		18,59 (**)		1,24 (ns)		1,98(ns)		13,72 (**)		3,89 (10%)	
	18 meses											
Testemunha	26,4	a	1,45	a	3,40	b	3,67	b	2,07	b	1,20	a
Ad. mineral	24,0	a	1,30	a	4,93	a	4,83	a	2,57	a	1,20	a
Lodo úmido	26,5	a	1,47	a	5,20	a	3,57	b	1,80	b	1,07	a
Lodo seco	25,4	a	1,47	a	4,60	a	4,05	a b	1,97	b	1,13	a
Valor F	1,03 (ns)		1,76 (ns)		6,2 (*)		4,41 (10%)		15,68 (**)		0,61 (ns)	
	24 meses											
Testemunha	20,6	a	1,05	b c	4,17	b	4,66	a b	2,07	b	1,37	a
Ad. mineral	19,3	a	1,00	c	6,97	a	4,81	a b	2,74	a	1,01	b
Lodo úmido	19,8	a	1,12	b	6,60	a	4,39	b	1,91	b	1,07	b
Lodo seco	19,3	a	1,21	a	6,40	a	5,37	a	1,99	b	1,18	b
Valor F	1,11 (ns)		21,40 (**)		15,59 (**)		3,88 (10)		17,10 (**)		27,00 (**)	
	30 meses											
Testemunha	17,8	a	0,77	b	3,30	b	4,88	a	2,03	b	0,77	a b
Ad. mineral	17,9	a	0,83	b	7,10	a	6,02	a	2,72	a	0,53	b
Lodo úmido	18,7	a	0,98	a	5,63	a	5,29	a	1,81	b	0,77	a b
Lodo seco	18,6	a	1,03	a	5,87	a	5,76	a	1,79	b	0,87	a
Valor F	0,51 (ns)		7,71 (*)		45,83 (**)		1,8 (ns)		11,1 (**)		3,75 (10%)	
	36 meses											
Testemunha	19,6	a	0,92	c	4,07	b	4,30	b	2,06	b	0,63	a
Ad. mineral	20,6	a	0,95	b c	5,17	a	5,00	a b	2,58	a	0,69	a
Lodo úmido	21,3	a	1,24	a b	5,23	a	4,41	b	1,96	b	0,79	a
Lodo seco	20,0	a	1,25	a	6,00	a	5,76	a	1,87	b	0,68	a
Valor F	0,23 (ns)		5,71 (*)		10,19 (**)		4,58 (10%)		6,53 (*)		0,85 (ns)	

Quanto aos micronutrientes (Tabela 4.5), para o elemento B foi observada uma concentração menor do nutriente nos tratamentos com lodo, mas apenas nas análises realizadas aos seis meses de idade. Nas amostras coletadas posteriormente, até os 36 meses de idade, os eucaliptos tratados com lodo (complementado com K e B) apresentaram concentrações foliares geralmente mais elevadas de boro.

Tabela 4.5 – Concentração dos micronutrientes nas folhas dos eucaliptos ao longo de 36 meses.

Tratamentos	Elementos (mg kg ⁻¹)									
	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	6 meses									
Testemunha	20,7	a	22,3	a	82,3	a	1150,0	a	21,7	a
Ad. mineral	21,7	a	14,7	b	80,0	a	620,0	b	18,0	b
Lodo úmido	15,3	b	23,7	a	89,0	a	630,0	b	22,3	a
Lodo seco	18,3	a b	22,3	a	88,7	a	743,3	b	22,7	a
Valor F	8,90 (*)		3,61 (10%)		18,26 (**)		9,13 (*)		13,4 (**)	
	12 meses									
Testemunha	18,7	b	14,7	a	67,3	b	992,0	a	20,7	a b
Ad. mineral	21,7	a b	10,7	b	62,0	b	403,3	b	14,3	c
Lodo úmido	23,0	a b	15,0	a	87,5	a	604,3	b	21,7	a b
Lodo seco	24,3	a	14,0	a	85,0	a	571,3	b	18,0	b
Valor F	20,86 (**)		45,48 (**)		4,69 (10%)		0,36 (ns)		7,84 (*)	
	18 meses									
Testemunha	13,5	c	10,3	a	135,0	a	820,0	a	8,3	a
Ad. mineral	34,0	b	9,5	a	159,0	a	488,3	b	6,0	a
Lodo úmido	37,3	a b	9,3	a	137,0	a	519,0	b	8,3	a
Lodo seco	47,3	a	9,7	a	163,0	a	570,5	b	8,0	a
Valor F	13,28 (**)		7,3 (*)		0,50 (ns)		19,50 (**)		3,18 (ns)	
	24 meses									
Testemunha	21,3	a	11,7	a	89,3	a	961,7	a	16,0	a b
Ad. mineral	36,7	a	8,3	b	86,0	a	365,0	c	12,7	b
Lodo úmido	43,5	a	8,7	b	89,7	a	638,3	b	18,0	a b
Lodo seco	42,8	a	9,0	b	88,3	a	576,7	b c	20,3	a
Valor F	0,10 (ns)		4,16 (10%)		2,14 (**)		19,75 (**)		10,17 (**)	
	30 meses									
Testemunha	23,4	b	14,7	a	149,0	b	653,3	a	9,7	b
Ad. mineral	48,6	a	10,3	b	175,3	a b	368,3	a	10,3	b
Lodo úmido	47,4	a	9,7	b	187,7	a	466,0	a	12,0	a
Lodo seco	50,5	a	10,3	b	190,3	a	403,3	a	12,7	a
Valor F	4,89 (10%)		13,31 (**)		7,79 (*)		1,97 (ns)		7,04 (*)	
	36 meses									
Testemunha	44,3	c	18,0	a	119,7	d	530,7	a	14,0	b
Ad. mineral	71,5	b	12,0	b	149,3	b	318,7	a	14,3	b
Lodo úmido	62,0	b	13,3	b	132,7	c	459,3	a	21,7	a
Lodo seco	84,7	a	12,0	b	173,7	a	451,0	a	15,3	a
Valor F	14,50 (**)		4,23 (10%)		7,07 (*)		2,65 (ns)		4,11 (10%)	

O Mn apresentou concentrações mais baixas nos tratamentos com as aplicações de lodo e de adubo mineral em relação à testemunha (Tabela 4.5). Esse resultado pode ser atribuído à precipitação do Mn, tornando-o menos disponível às plantas, devido ao aumento do pH do solo ou à influência de determinados componentes contidos no lodo de esgoto (TSADILAS et al., 1995; CHRISTIE et al., 2001; GUEDES e POGGIANI, 2003). Guedes e Poggiani (2003), também constataram o efeito negativo do lodo de esgoto sobre a concentração de Mn nas folhas

dos eucaliptos. Para Guedes (2005), a principal hipótese para explicar a diminuição na absorção de Mn pelos eucaliptos seria a competição entre os elementos Ca e Mn. Esta competição ocorre na absorção dos nutrientes pelas raízes, pois ambos são cátions bivalentes com raios iônicos de tamanhos aproximados, competindo diretamente pelos sítios de absorção.

Para se obter uma resposta, foram realizadas análises de solo coletado na linha de plantio, sob o lodo aplicado, na camada de 0-5 cm. A Figura 4.8 apresenta a correlação obtida entre os teores de cálcio no solo com os teores de manganês foliar e observa-se boa correlação entre esses elementos. O resultado condiz com a teoria levantada por Guedes (2005), que discute se a concentração foliar do Mn é influenciada pela quantidade de Ca no solo. A correlação entre o pH do solo e os teores de Mn foliares não obteve correlação significativa.

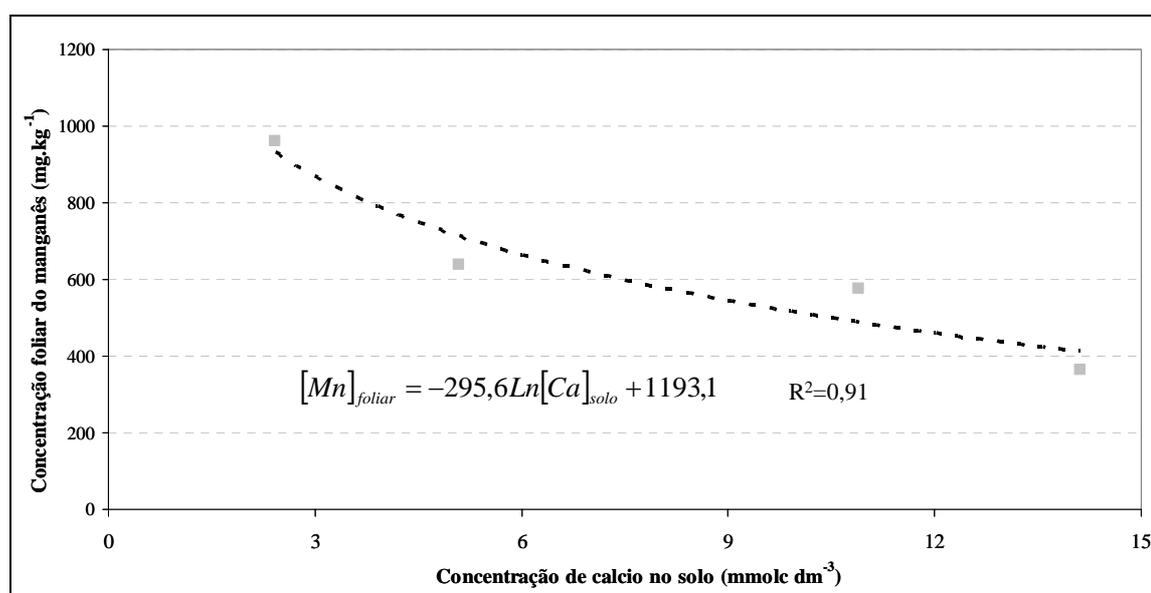


Figura 4.8 – Relação entre os teores de cálcio no solo e de manganês foliar

O cobre, apesar de estar presente em baixas concentrações no lodo de esgoto, não apresentou variações importantes ao longo do tempo em função dos tratamentos, evidenciando tendência de redução da concentração ao longo do tempo. Em relação ao zinco, que apresenta uma concentração de 0,32% no lodo de esgoto seco, observou-se a elevação significativa de sua concentração nas folhas, aos 30 e 36 meses de idade do povoamento experimental. Entretanto, estas concentrações mantiveram-se dentro dos níveis usualmente observados em eucaliptos plantados comercialmente no estado de São Paulo (BELLOTE e SILVA, 2000), não acarretando qualquer efeito fitotóxico nas árvores. Molina-Velasco et al. (2006), em experimento também

realizado na E. E. de Itatinga, não observaram aumento significativo do Cu e do Zn nas folhas dos eucaliptos, aos 55 meses de idade, adubados com lodo de esgoto da ETE de Barueri da SABESP-SP, condicionado com cal hidratada e aplicado na entrelinha de plantio na dose de até 40 t ha^{-1} .

Folhedo produzido

Considerando a quantidade total de folhedo produzido ao longo do experimento (Figura 4.9), observou-se que os eucaliptos dos tratamentos com aplicação de lodo depositaram uma quantidade de folhas ($4,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) 45% superior ao tratamento testemunha ($3,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e semelhantes ao tratamento com adubação mineral ($4,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Os valores obtidos neste estudo são condizentes com os apresentados no trabalho de Guedes (2000), também desenvolvido na E. E. de Itatinga. Foi observado relação entre as variações das condições climática e a produção de folhedo, pois nos períodos de déficit hídrico (agosto, setembro e dezembro de 2004 e fevereiro, agosto e dezembro de 2005), foram observadas as maiores taxas de produção de folhedo. Esse fato pode estar relacionado com a “estratégia” do eucalipto, que mesmo não sendo uma espécie caducifólia, procura diminuir o consumo de água nas épocas de seca. Esse efeito foi observado em todos os tratamentos, mas de forma atenuada e tardia no tratamento testemunha, talvez devido à menor competição por água entre as árvores que apresentaram copas reduzidas em relação aos outros tratamentos.

Devolução dos nutrientes via folhedo

Conhecendo-se a concentração de cada nutriente no folhedo depositado e a fitomassa de folhas produzida mensalmente, foi possível estimar a transferência de nutrientes das copas dos eucaliptos para o solo (Tabelas 4.7 e 4.8).

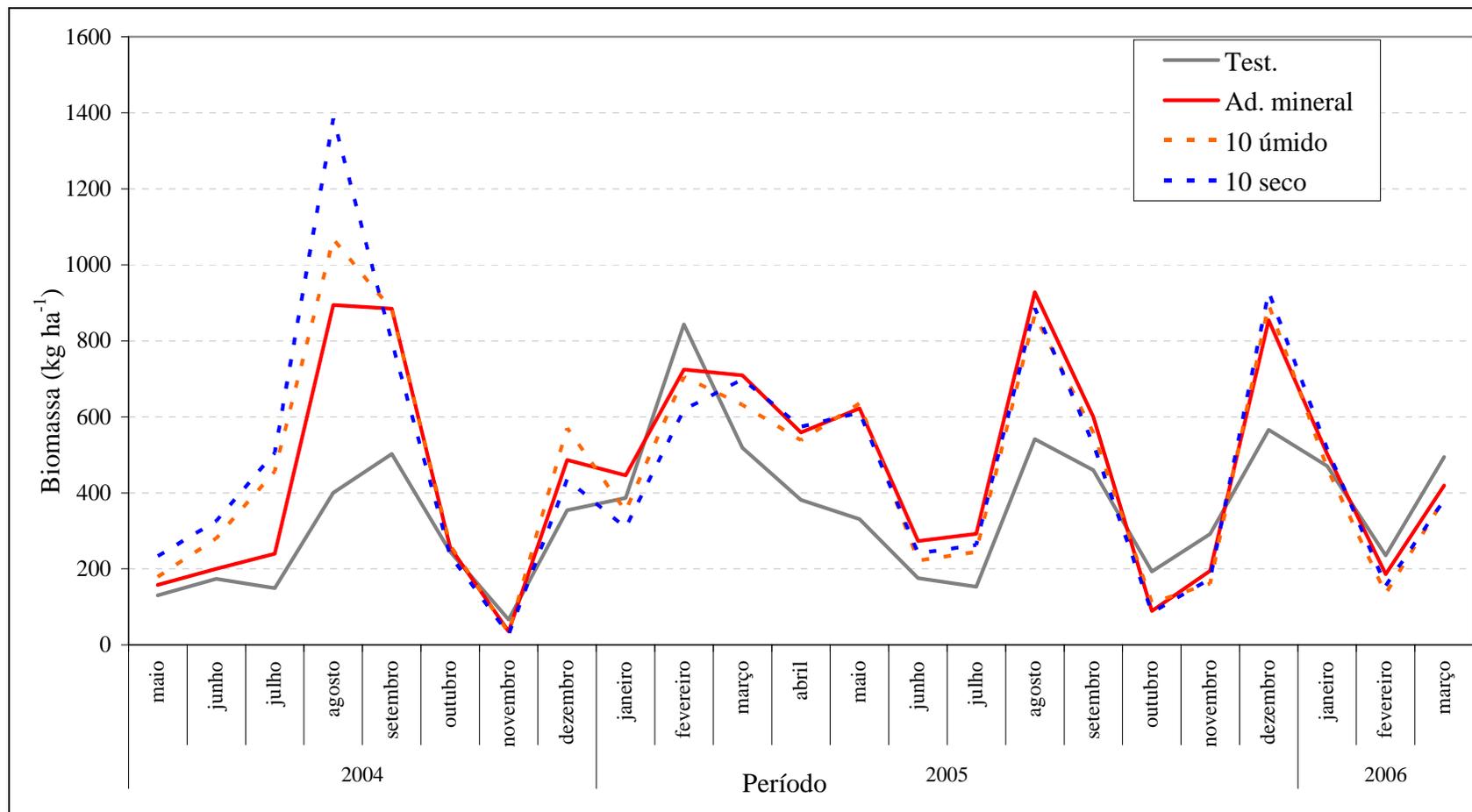


Figura 4.9 - Produção de folheto ao longo no período experimental de maio de 2004 a março de 2006

Observou-se que os tratamentos com aplicação de lodo e de adubo mineral e testemunha reciclaram quantidades estatisticamente semelhantes de N, S e Mn. Entretanto, a quantidade de nitrogênio devolvido ao solo via folhede foi 22% superior nos tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco, devido à maior quantidade de biomassa de folhas depositadas. Nota-se que nas parcelas dos tratamentos com os lodos úmido e seco foram depositados quase 100 kg de N por hectare no período de dois anos. Trata-se de uma quantia bastante expressiva deste elemento reciclado no ecossistema, que corresponde aproximadamente a 30 % do nitrogênio aplicado via lodo e evidencia a sua mobilidade no solo e nas plantas.

Os tratamentos com aplicação de lodo e de adubo mineral reciclaram quantidades superiores de K, Ca, Cu e Fe do que o tratamento testemunha. No caso do potássio a quantidade devolvida ao solo via folhede correspondeu a 16 % do potássio adicionado ao solo via fertilização. Para P, B e Zn os tratamentos com aplicação de lodo reciclaram maiores quantidades do que os tratamentos com aplicação de adubo mineral e testemunha, sendo o P 35% a mais. Mas para o fósforo a proporção de retorno, comparando a quantidade aplicada, foi pequena devido à baixa movimentação do elemento no solo O Mg foi devolvido ao solo em maior quantidade no tratamento com adubação mineral.

Com relação ao cálcio e magnésio, apesar destes elementos se apresentarem em concentrações relativamente baixas no lodo de esgoto, percebe-se nitidamente o efeito da calagem previamente efetuada no tratamento com adubo mineral, bem como o resultado da aplicação dos lodos de esgoto.

Tabela 4.7 – Macronutrientes devolvido ao solo via folhede (kg ha^{-1}), durante dois anos de coleta, nos tratamentos sem adubação (testemunha), adubação mineral (adub. mineral) e nos tratamentos com aplicação de 10 t ha^{-1} dos lodos de Barueri (úmido e seco)

Tratamentos	N		P		K		Ca		Mg		S	
Testemunha	79,5	a	3,1	b	5,9	b	47,8	b	13,4	c	13,6	a
Ad. mineral	92,6	a	3,1	b	21,6	a	81,7	a	28,4	a	14,5	a
Lodo úmido	97,9	a	4,2	a	20,5	a	69,6	a	18,0	b	14,1	a
Lodo seco	96,7	a	4,2	a	20,4	a	74,3	a	17,8	b	12,2	a
Valor F	2,07 (ns)		8,76 (*)		44,88 (*)		10,82 (**)		66,46 (**)		1,37 (ns)	

Tabela 4.8 – Micronutrientes devolvido ao solo via folhedeo (g ha^{-1}), durante dois anos de coleta, nos tratamentos sem adubação (testemunha), adubação mineral (Ad. mineral) e nos tratamentos com aplicação de 10 t ha^{-1} dos lodos de Barueri (úmido e seco)

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
Testemunha	229,0	c	171,9	b	1864,0	b	8768,1	a	98,7	c
Ad. mineral	514,4	b	191,7	a b	2555,8	a	7203,2	a	124,9	b c
Lodo úmido	554,3	a b	212,0	a b	2390,4	a	8638,8	a	177,0	a
Lodo seco	628,9	a	279,4	a	2550,6	a	8468,1	a	153,5	a b
Valor F	61,58 (**)		2,17 (ns)		4,86 (*)		1,5 (ns)		8,00 (*)	

Decomposição do folhedeo

Observou-se que decomposição do folhedeo dentro das bolsas pode ser modelada por uma regressão exponencial negativa para cada um dos tratamentos devido, provavelmente, à qualidade diferenciada do folhedeo produzido pelos eucaliptos nos tratamentos com os bio-sólidos úmido e seco, adubo mineral e testemunha. A regressão (Figura 4.10) evidencia que ao longo do tempo a decomposição se torna mais lenta visto que, inicialmente, ocorre a decomposição dos compostos mais solúveis e posteriormente dos mais recalcitrantes, por exemplo, a lignina. Em relação à velocidade de decomposição, são observados ainda comportamentos distintos para cada um dos tratamentos aplicados.

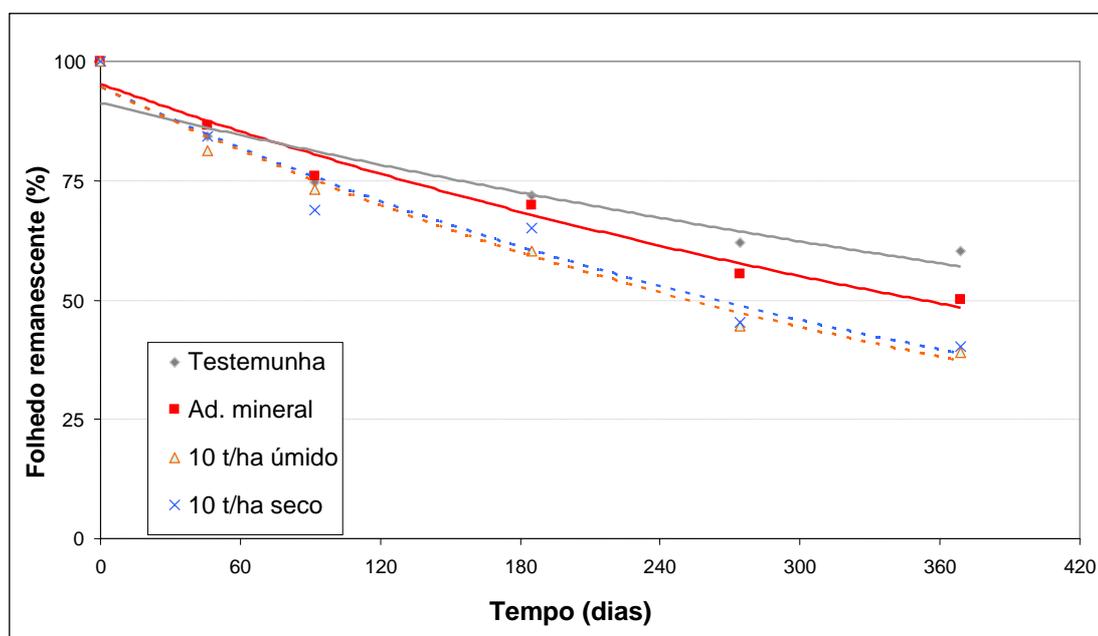


Figura 4.10 – Comparação entre o folhedeo remanescente nas bolsas deixadas sobre o solo junto à serapilheira acumulada nas parcelas experimentais

Os folhedos produzidos nos tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco apresentaram maiores percentuais de decomposição após um ano, sendo esses superiores, em relação aos valores do tratamento com adubação mineral e à testemunha, em 20 e 51%, respectivamente (Tabela 4.9). Provavelmente, a maior concentração de certos nutrientes no folheto produzido nos tratamentos com os biossólidos e adubação mineral facilitou a ação dos microrganismos decompositores, propiciando maior velocidade de decomposição em relação à testemunha. As taxas de decomposição encontradas neste estudo são inferiores às apresentadas no trabalho de Guedes (2000), mas a tendência de comportamento entre os tratamentos estudados é semelhante.

Tabela 4.9 – Taxa de decomposição do folheto com dados obtidos durante um ano de medição das bolsas de decomposição

Tratamentos	Decomposição em 1 ano (%)		Equação	Decomp 50 %
Testemunha	39,8	c	$91,259e^{-0,0013tempo}$	1,27
Ad. mineral	49,9	b	$95,246e^{-0,0018tempo}$	0,98
lodo úmido	61,0	a	$94,619e^{-0,0025tempo}$	0,70
lodo seco	59,6	a	$94,587e^{-0,0024tempo}$	0,70
Valor de F	31,21 (**)			

Folheto acumulado sobre o solo

O acúmulo de folheto sobre o solo depende do balanço entre a quantidade de folheto produzido e a taxa de decomposição nos respectivos tratamentos. As Figuras 4.09 e 4.10 indicam, respectivamente, haver uma maior deposição e também uma maior decomposição do folheto nos tratamentos com biossólidos e adubação mineral, sendo a decomposição ligeiramente inferior nesse último tratamento em relação aos primeiros. Isso pode resultar no maior estoque observado no tratamento com a aplicação da adubação mineral nas parcelas experimentais (Tabela 4.10). Os valores de folheto acumulado sobre o solo neste estudo são superiores aos apresentados no trabalho de Guedes (2000), devido a deposição de folheto semelhante em ambos os estudos e a taxa de decomposição menos acentuada deste estudo, mas a tendência entre os tratamentos estudados é a mesma para os dois estudos.

Tabela 4.10 - Folheto acumulado sobre o solo ($t\ ha^{-1}$) nos tratamentos testemunha, adubação mineral, $10\ t\ ha^{-1}$ do lodo úmido e seco

Tratamentos	Estação do ano (idade em meses)				Média	
	Outono (27)	Inverno (30)	Primavera (33)	Verão (36)		
Testemunha	3,44	3,31	2,79	2,14	2,92	b
Ad. mineral	4,94	4,49	3,91	2,33	3,92	a
Lodo úmido	3,79	3,66	3,38	2,48	3,33	a
Lodo seco	4,46	3,50	3,82	2,97	3,69	a
				Valor F	4,26	(10%)

Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo

Os macronutrientes estocados no folheto acumulado sobre o solo (Tabela 4.11) em cada tratamento, não apresentaram diferenças significativas para os elementos N e P, devido à grande variabilidade existente entre as amostras coletadas e também devido à pequena diferença na quantidade de folheto acumulado nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos (Tabela 4.10). Para o K, em alguns períodos de coleta, foi verificado o efeito indireto da aplicação do cloreto de potássio (complementação para o lodo de esgoto e adubo mineral), que foi absorvido pelos eucaliptos e posteriormente depositado via de folheto. Para o Ca e o Mg observou-se o efeito da calagem efetuada no tratamento com adubo mineral, que aumentou a quantidade desses nutrientes no folheto acumulado.

Os micronutrientes estocados no folheto acumulado sobre o solo (Tabela 4.12) dos tratamentos não apresentaram diferenças significativas. A única exceção foi para o B, onde foi observado o efeito indireto da aplicação do bórax, pois os tratamentos onde foi aplicado esse fertilizante (adubo químico e lodos) obtiveram valores superiores ao observado no tratamento testemunha.

Tabela 4.11 – Macronutrientes estocados no folheto acumulado sobre o solo, ao longo do tempo, após o início do experimento, nos tratamentos testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ dos lodos úmido e seco

Tratamentos	-----kg ha ⁻¹ -----											
	N		P		K		Ca		Mg		S	
outono 2005												
Testemunha	39,1	a	1,3	a	1,9	a	20,2	c b	5,4	a	2,7	b
Ad. mineral	56,0	a	2,0	a	2,4	a	28,3	a b	8,0	a	4,3	a
Lodo úmido	39,2	a	1,5	a	1,6	a	18,8	c	4,8	a	2,7	b
Lodo seco	48,9	a	1,8	a	2,8	a	29,5	a	7,3	a	3,4	a b
Valor F	2,6	(ns)	1,0	(ns)	1,8	(ns)	4,9	(*)	2,0	(ns)	5,4	(*)
inverno 2005												
Testemunha	44,3	a	1,6	a	2,31	a	18,0	a	4,9	b	2,4	a
Ad. mineral	54,8	a	1,8	a	4,37	a	30,4	a	10,9	a	3,1	a
Lodo úmido	42,7	a	1,8	a	3,59	a	22,9	a	5,7	b	2,6	a
Lodo seco	42,7	a	2,0	a	3,52	a	25,1	a	5,8	b	2,4	a
Valor F	1,06	(ns)	0,34	(ns)	1,92	(ns)	1,60	(ns)	6,32	(*)	0,74	(ns)
primavera 2005												
Testemunha	34,9	a	1,2	a	1,7	b	15,3	b	3,5	b	2,4	a
Ad. mineral	45,2	a	1,4	a	2,1	a	29,8	a	8,2	a	2,8	a
Lodo úmido	42,3	a	1,6	a	2,7	a	21,3	a b	4,9	b	1,8	a
Lodo seco	45,6	a	2,0	a	3,5	a	26,4	a b	5,5	b	2,4	a
Valor F	1,25	(ns)	2,05	(ns)	8,47	(*)	3,78	(10%)	8,43	(*)	1,24	(ns)
verão 2006												
Testemunha	30,9	a	0,9	a	1,1	a	12,3	a	3,4	a	1,3	b
Ad. mineral	30,5	a	1,0	a	1,2	a	16,2	a	4,3	a	1,3	b
Lodo úmido	33,1	a	1,4	a	1,2	a	15,4	a	3,1	a	1,8	a b
Lodo seco	38,6	a	1,6	a	1,4	a	17,5	a	3,2	a	2,4	a
Valor F	0,54	(ns)	2,57	(ns)	0,21	(ns)	1,55	(ns)	1,59	(ns)	6,0	(*)
média												
Testemunha	37,4	a	1,3	a	1,7	b	18,9	b	5,7	b	2,5	b
Ad. mineral	46,7	a	1,6	a	2,5	a	26,2	a	7,9	a	2,9	a b
Lodo úmido	39,3	a	1,6	a	2,3	a b	19,6	b	4,6	b	2,2	b
Lodo seco	44,0	a	1,9	a	2,8	a	24,7	a	5,5	b	2,7	a b
Valor F	1,81	(ns)	2,54	(ns)	5,99	(*)	10,19	(**)	8,45	(*)	3,52	(10%)

Tabela 4.12 – Micronutrientes estocados no folheto acumulado sobre o solo, ao longo do tempo, após o início do experimento, nos tratamentos testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ dos lodos úmido e seco

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	-----g ha ⁻¹ -----									
outono 2005										
Testemunha	99,9	a	42,6	a	5807,2	a	2507,6	a	68,4	a
Ad. mineral	121,2	a	87,6	a	7620,9	a	3541,9	a	92,8	a
Lodo úmido	107,0	a	51,4	a	4940,6	a	2734,4	a	84,5	a
Lodo seco	147,4	a	64,9	a	7586,7	a	2843,6	a	109,9	a
Valor F	1,80	(ns)	1,8	(ns)	0,7	(ns)	1,2	(ns)	0,8	(ns)
inverno 2005										
Testemunha	86,4	b	78,52	a	7187,0	a b	2438,4	a	64,6	a
Ad. mineral	200,0	a	83,00	a	7708,7	a b	2351,4	a	68,9	a
Lodo úmido	147,2	a b	70,35	a	8522,5	a	2176,1	a	90,9	a
Lodo seco	157,3	a	62,41	a	5179,3	b	1846,3	a	92,8	a
Valor F	5,97	(*)	2,43	(ns)	3,45	(10%)	0,48	(ns)	1,53	(ns)
primavera 2005										
Testemunha	43,1	b	74,58	a	12889,9	a	1676,1	a	76,0	b
Ad. mineral	97,6	a	83,41	a	9510,8	a	1764,4	a	129,4	a b
Lodo úmido	106,4	a	92,20	a	8243,0	a	1619,0	a	188,5	a
Lodo seco	92,6	a	102,46	a	9889,3	a	1681,0	a	177,6	a
Valor F	7,81	(*)	0,53	(ns)	0,66	(ns)	0,06	(ns)	10,75	(*)
verão 2006										
Testemunha	68,9	a	64,99	a	5294,4	b	1598,5	a	42,9	a
Ad. mineral	86,3	a	62,47	a	5596,3	b	1282,5	a	43,4	a
Lodo úmido	79,9	a	65,41	a	7214,7	b	1230,7	a	72,3	a
Lodo seco	91,8	a	94,63	a	13253,2	a	1357,8	a	74,3	a
Valor F	0,99	(ns)	2,49	(ns)	6,28	(*)	0,84	(ns)	2,49	(ns)
média										
Testemunha	74,6	b	60,6	a	6288,7	a	1738,6	a	78,7	a
Ad. mineral	126,3	a	79,1	a	7609,2	a	2235,1	a	83,7	a
Lodo úmido	110,2	a	69,9	a	7230,2	a	1940,1	a	109,1	a
Lodo seco	122,3	a	81,1	a	8977,2	a	1932,2	a	113,7	a
Valor F	7,38	(*)	1,41	(ns)	0,86	(ns)	0,44	(ns)	2,4	(ns)

Retranslocação dos macro-nutrientes

Quanto à retranslocação dos macronutrientes entre as folhas maduras e as folhas caducas (folheto depositado), foram observadas apenas algumas diferenças estatísticas para os diferentes tratamentos (Tabela 4.13). Em relação ao N, sua retranslocação foi superior nas folhas dos tratamentos com a aplicação de lodo em relação à testemunha e foi semelhante ao adubo mineral, no período final do verão (aos 12 e 24 meses), época de maior crescimento, conseqüentemente, de maior “consumo” de N pelas plantas. Outra diferença foi observada em relação ao K, que apresentou valores superiores de retranslocação no tratamento testemunha, a partir do 30º mês

após o plantio. Este resultado poderia ser atribuído à carência desse nutriente no solo, originando maior retranslocação do elemento das folhas senescentes para as folhas em desenvolvimento.

Tabela 4.13 - de retranslocação internas dos macronutrientes ao longo do tempo nos tratamentos: testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ dos lodos úmido e seco

Tratamentos	Elementos (%)									
	N		P		K		Mg		S	
12 meses – final do verão										
Testemunha	59,5	b	79,7	b	79,8	a	56,0	a	43,6	a
Ad. mineral	79,0	a	88,6	a	79,0	a	41,4	b	54,4	a
Lodo úmido	73,1	a b	79,7	b	72,1	a	58,0	a	21,0	a
Lodo seco	77,0	a	81,6	b	74,7	a	62,1	a	28,7	a
Valor de F	4,9	(*)	8,8	(*)	1,4	(ns)	5,74	(*)	0,13	(ns)
18 meses – final do inverno										
Testemunha	84,0	a	90,8	a	82,8	a	59,5	a	62,6	a
Ad. mineral	82,7	a	92,0	a	68,0	a	43,0	a	62,9	a
Lodo úmido	84,0	a	87,7	a	75,8	a	59,7	a	62,0	a
Lodo seco	77,0	a	84,8	a	61,6	a	50,0	a	53,1	a
Valor de F	1,28	(ns)	2,36	(ns)	2,88	(ns)	1,33	(ns)	0,24	(ns)
24 meses – final do verão										
Testemunha	51,7	b	65,9	a	85,0	a	12,9	a	44,8	a
Ad. mineral	63,8	a	79,4	a	77,9	a	21,7	a	42,8	a
Lodo úmido	60,8	a	71,3	a	78,6	a	15,0	a	37,9	a
Lodo seco	59,2	a	71,4	a	77,9	a	13,6	a	46,4	a
Valor de F	3,91	(10%)	2,89	(ns)	2,94	(ns)	0,41	(ns)	0,94	(ns)
30 meses – final do inverno										
Testemunha	47,9	a	59,7	a	85,3	a	25,3	a	42,2	a
Ad. mineral	47,1	a	59,9	a	79,0	b	17,4	a	21,0	b
Lodo úmido	43,8	a	56,2	a	75,7	b	9,4	a	23,3	a b
Lodo seco	48,1	a	56,5	a	77,5	b	8,7	a	29,4	a
Valor de F	0,15	(ns)	0,52	(ns)	6,2	(*)	1,45	(ns)	5,2	(10%)
36 meses – final do verão										
Testemunha	52,9	a	65,8	a	89,7	a	31,2	a	30,8	a
Ad. mineral	65,7	a	76,6	a	84,3	b	29,7	a	38,9	a
Lodo úmido	66,4	a	73,2	a	82,0	b	32,4	a	51,7	a
Lodo seco	56,1	a	65,2	a	83,5	b	20,8	a	40,9	a
Valor de F	2,26	(ns)	0,88	(ns)	4,73	(10%)	2,34	(ns)	3,15	(ns)

4.4 Conclusões

1. A aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco nas linhas de plantio, complementados com K e B, incrementou significativamente o volume de madeira produzida pelos eucaliptos em relação à testemunha, servindo como fonte de nutrientes.

2. A aplicação de lodo de esgoto refletiu-se de maneira positiva na ciclagem dos nutrientes, alterando a quantidade e a velocidade das transferências entre os diferentes compartimentos do ecossistema.
3. A aplicação dos lodos de esgoto nas linhas de plantio dos eucaliptos refletiu-se positivamente, elevando a concentração dos nutrientes nas folhas e também a produção de folheto e, desta forma, incrementando a transferência de nutrientes das copas dos eucaliptos para os compartimentos da serapilheira e do solo.
4. Observou-se aumento da taxa de decomposição do folheto nas parcelas experimentais dos tratamentos com a adição dos lodos de esgoto úmido e seco.
5. Não foi observada diferença estatística entre os tratamentos com os lodos úmido (torta) e seco (granulado) aplicados nas linhas de plantio dos eucaliptos em relação aos diferentes aspectos da ciclagem dos nutrientes.

Referências

- CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.19-24, 1999.
- CHRISTIE, P.; EASSON, D.L.; PICTON, J.R.; LOVE, S.C.P. Agronomic value of alkaline-stabilized sewage biosolids for spring barley. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, n.1, p.144-151, 2001.
- EGIARTE, G; CAMPS ARBESTAIN, M.; ALONSO, A; RUÍZ-ROMERA, E. PINT, M. Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.216, n.1/3, p.257-269, 2005.
- GOLLEY, F.B.; MCGINNIS, J.T.; CLEMENTS, R.G.; CHILD, G.I.; DUEVER, M.J. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida**. São Paulo: EPU/EDUSP, 1978. 256p.
- GONÇALVES, J. L. M; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M e BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.

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

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

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

HOBBIE, S.E.; VITOUSEK, P.M. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests, **Ecology**, Washington, v.81, n.7, p.1867-1877. jul.2000.

LUDUVICE M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.

MOLINA-VELASCO, M.; MATTIAZZO, M.E.; ANDRADE, C.A., 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, 2006.

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

NEVES, E. J. M.; MARTINS, E. G.; REISSMANN, C. B. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n.43, p.47-60, 2001.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. . In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

PRITCHETT, W. **Properties and management of forest soils**. 2nd ed New York: John Wiley, 1979. 494 p

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

SOARES, C. R. F. S. **Toxidez de Zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**. 1999, 132p. Dissertação (Mestrado em Agronomia -Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

TSADILAS, C.D.; MATSI, T.; BARBAYANNIS, N.; DIOMOYANNIS, D. Influence of sewage sludge application on soilproperties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. **Communication Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n.15/16, p.2603-2619, 1995.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. . In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.

5 Alterações dos atributos químicos do solo em plantios de *Eucalyptus grandis* após a aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco.

Resumo

A utilização de lodo de esgoto em plantios florestais é uma alternativa plausível, visando dar um destino final para este resíduo, propiciando a reciclagem dos nutrientes das estações de tratamento de esgoto (ETEs) para os agroecossistemas. Sabe-se que os produtos resultantes das plantações florestais de rápido crescimento não são incorporados na cadeia alimentar humana e os solos, geralmente pobres, se beneficiam do elevado teor de nutrientes contidos no lodo de esgoto. Foi objetivo desta pesquisa avaliar as alterações dos atributos químicos do solo geradas pela aplicação do lodo de esgoto úmido (na forma de torta) e seco (granulado). Observou-se que a adição ao solo dos lodos de esgoto complementados com K e B, aumentou o crescimento volumétrico dos eucaliptos, bem como a produção de folheto, em relação ao tratamento testemunha. Não foram observadas diferenças no crescimento dos eucaliptos em função dos diferentes lodos aplicados. Até os 36 meses de idade do povoamento, a fertilidade do solo variou apenas sob a linha de plantio, onde foi aplicado o lodo, não sendo observado qualquer efeito nas entrelinhas, que possa ser atribuído à transferência dos nutrientes através da deposição do folheto nas entrelinhas de plantio dos eucaliptos. As variações mais evidentes foram observadas na camada superficial do solo em relação aos nutrientes mais abundantes no lodo como, por exemplo, o nitrogênio e o fósforo.

Palavras - chave: Lodo de esgoto, biossólido, eucaliptos, nutrientes, solo, fertilidade, biossólido.

Soil chemical alterations 18 and 36 months after the sewage sludge applications in a *Eucalyptus* stand

Abstract

The application of sewage sludge in forest stand of eucalypts seems to be a good alternative to provide a final destination for this residue. Forest plantations are usually located on infertile soils and the application of sewage sludge, rich in organic matter and nutrients, may improve soil fertility and increase the volume of wood production. Thus, the objective of the present study was to evaluate the wood production in experimental stand of *Eucalyptus grandis* and analyze the soil fertility alterations after the application of wet and dry sewage sludge in the rows of planting. The experiment was implanted in April 2003 in the Station of Forest Sciences (Itatinga-SP/Brazil) in randomized blocks. The experimental groups were: 1) – Control - without fertilization; 2) – Mineral fertilization; 3) -10 t ha⁻¹ wet sewage sludge; and 4) - 10 t ha⁻¹ dry sewage sludge. Wood volume produced by eucalypts and chemical attributes of the soil samples collected in the rows of planting were measured with 18 and 36 months of experimental stand age. No differences were noted between the growths of eucalypts treated with 10 t ha⁻¹ of wet or dry sewage sludge. Until the 36 months after planting, the soil attributes showed significant modifications only under the row of planting, where the sewage sludge was applied and the biggest variations were observed in the soil surface layer, mainly for nitrogen, phosphorus.

Key-words: Sewage sludge, biosolids, nutrients, soil attributes and eucalypt

5.1 Introdução

O lodo de esgoto, que após ser tratado e higienizado, é denominado biossólido é um resíduo resultante do tratamento dos esgotos e cuja composição, predominantemente orgânica, varia em função da sua origem e do sistema de tratamento utilizado nas estações (ETEs).

Li et al (2002) citam que a utilização do lodo, por conter matéria orgânica, nitrogênio e fósforo pode promover o aumento no crescimento das plantas devido à melhoria na fertilidade do solo. Fjällborg et al. (2005) citam que o lodo é uma fonte orgânica de nutrientes, mas os metais eventualmente presentes no lodo podem acumular-se no solo devido às repetidas aplicações e, dependendo das concentrações, podem tornar-se tóxicos aos microrganismos, às plantas e aos animais.

Vieira e Silva (2003) estudaram o efeito, na atividade microbiana, de freqüentes aplicações de lodo ao solo e observaram que a utilização de doses excessivas de lodo pode prejudicar a microflora do solo. Selivanovskaya et al. (2003) sugerem que um método para inverter a degradação e melhorar a qualidade do solo seria a adição de matéria orgânica e citam que o uso de lodo de esgoto em culturas pode ter efeito positivo, aumentando o crescimento das plantas, constituindo-se numa excelente alternativa para disposição do lodo de esgoto.

De acordo com Gobatto (2003), a disposição agrícola ou florestal do biossólido, incluído os custos de transporte até 100 km, é economicamente mais vantajosa do que outras alternativas de disposição como, por exemplo, o aterro sanitário ou a incineração.

A disposição do lodo de esgoto em plantios florestais difere de maneira positiva em relação às culturas agrícolas, visto que não representa qualquer ameaça de contaminação para os processos relacionados com a produção de alimentos. Geralmente, os solos florestais onde se pratica a silvicultura intensiva apresentam baixa fertilidade, o que leva a um melhor aproveitamento dos nutrientes contidos no lodo de esgoto pelas árvores e a menores perdas por lixiviação. Além disso, os ciclos das culturas florestais são mais longos (5 a 7 anos), permitindo, dessa forma, maiores intervalos entre as aplicações.

Considerando-se a intensa ciclagem de nutrientes geralmente observada em plantações florestais de eucaliptos (Guedes e Poggiani, 2003), espera-se que a produção e decomposição do folheto alterem a fertilidade da camada superficial do solo nos locais que não receberam aplicação do lodo, ou seja, um efeito indireto da aplicação do lodo.

Foi objetivo geral deste trabalho verificar a viabilidade da aplicação do lodo de esgoto gerado na ETE de Barueri da SABESP (região metropolitana de São Paulo) em plantações de eucaliptos, visando o aumento da produtividade madeireira e o seu reflexo sobre a ciclagem dos nutrientes no ecossistema. Neste trabalho foi focado, especificamente, o efeito dos lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado) aplicados nas linhas de plantio dos eucaliptos sobre os atributos químicos do solo das parcelas experimentais.

5.2 Material e métodos

Descrição da área experimental

O experimento está localizado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, localiza-se no município de Itatinga – SP, na latitude 23^o 02' e longitude 48^o 37', com altitude média de 830 m. O clima do município de Itatinga é do tipo mesotérmico úmido, segundo classificação de Köppen, com precipitação média mensal no mês mais seco entre 30 e 60 mm, temperatura mínima anual de 12,8 °C e média anual de 19,4 °C. A umidade relativa média anual é de 83,3%, e a precipitação média anual é de 1350 mm.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-Amarelo, com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 5.1). Esse tipo de solo é um dos mais representativos das áreas de eucalipto no estado de São Paulo. A vegetação natural da região é o cerrado, sendo que a maior parte da Estação Experimental de Itatinga era ocupada previamente por cerrado *sensu stricto*. Atualmente, na Estação Experimental de Itatinga há predominância das culturas florestais de eucaliptos e pinheiros, mas existem algumas manchas remanescentes da vegetação original.

Tabela 5.1 – Caracterização do solo antes da implantação da área experimental

Prof.	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	Sat.	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂				mmolc dm ⁻³			%	Al ³⁺		mg dm ⁻³					
0-5	9	26	4	0,7	5	4	71	27	10	82	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5-10	6	17	4	0,6	3	2	57	24	5	63	8	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10-20	7	13	4	0,6	2	2	44	20	4	51	9	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Nesta experimentação os tratamentos foram constituídos pela adição ao solo das doses de lodo de esgoto calculadas em base seca a partir das concentrações determinadas nos respectivos lodos úmido (torta) e seco (granulado), conforme expresso na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Caracterização física e química do lodo úmido e seco

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Mat. Orgânica resistente a compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	32,7 g kg ⁻¹	34,7 g kg ⁻¹
Fósforo (P ₂ O ₅)	32,7 g kg ⁻¹	38,4 g kg ⁻¹
Potássio (K ₂ O) total	2,7 g kg ⁻¹	2,7 g kg ⁻¹
Cálcio (Ca) Total	25,2 g kg ⁻¹	24,6 g kg ⁻¹
Magnésio (Mg) Total	4,9 g kg ⁻¹	3,9 g kg ⁻¹
Enxofre (S) Total	6,6 g kg ⁻¹	6,8 g kg ⁻¹
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	570 mg kg ⁻¹	700 mg kg ⁻¹
Manganês (Mn) Total	194 mg kg ⁻¹	300 mg kg ⁻¹
Zinco (Zn) Total	2,3 g kg ⁻¹	3,2 g kg ⁻¹
Ferro (Fe) Total	39,0 g kg ⁻¹	45,2 g kg ⁻¹
Boro (B) Total	9 mg kg ⁻¹	2 mg kg ⁻¹
Sódio (Na) Total	583 mg kg ⁻¹	900 mg kg ⁻¹

Obs.: Valores obtidos em base seca.

Observa-se que, de maneira geral, os lodos podem suprir elevadas quantidades de nitrogênio e fósforo, além de micronutrientes, com exceção de potássio e boro. Estes elementos são em grande parte perdidos no processo de tratamento do lodo.

Descrição da área e dos tratamentos silviculturais no talhão experimental

A área do talhão experimental era previamente ocupada por um povoamento de *Eucalyptus grandis*, com idade aproximada de 6 anos, submetido a corte raso. A área foi reformada com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis* em março de 2003. As atividades realizadas para instalação do experimento foram: aplicação de herbicida (controle da matocompetição), subsolagem (preparo do solo) e combate às formigas cortadeiras (período de 24/03 a 28/03); marcação das parcelas experimentais e plantio das mudas (período de 07/04 a 11/04); distribuição do lodo de esgoto e replantio das mudas mortas (período de 14/04 a 25/04)

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi implantado em blocos casualizados. Foram aplicados 4 tratamentos com 3 repetições (blocos), totalizando 12 parcelas experimentais. Cada parcela possui 384 m² (24x16 m) e é constituída por 8 linhas. Na linha, as plantas foram espaçadas em 2 m e nas entrelinhas em 3 m, totalizando 64 plantas por parcela. A área útil da parcela considerou as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m².

A complementação com K e B foi realizada nos tratamentos onde foi aplicado o lodo, de modo a igualar a quantidade total de potássio e boro adicionada em cada tratamento com a adubação mineral convencional (Tabela 5.3). A complementação de cloreto de potássio foi realizada simultaneamente com as adubações de base e de cobertura do tratamento com a adubação mineral. A dosagem do lodo nos tratamentos foi calculada em base seca e, para a aplicação, utilizaram-se recipientes devidamente calibrados.

Para a correta interpretação dos resultados, deve-se salientar que a quantidade de lodo aplicada nas linhas de plantio corresponde aproximadamente ao quádruplo do indicado na denominação do tratamento (10 t ha⁻¹), visto que os lodos não foram esparramados de forma

homogênea sobre a área total, mas concentrados nas linhas de plantio em faixa de aproximadamente com 0,75 cm de largura e as linhas de plantio estão espaçada em 3 metros.

Tabela 5.3 – Quantidade de nutrientes adicionados ao solo (kg ha^{-1}) nos diferentes tratamentos através da distribuição dos lodos úmido e seco e da adubação mineral nas linhas de plantio

Tratamentos	Insumo (por árvore) kg ha ⁻¹							
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Zn
a - Testemunha	sem adubação	-	-	-	-	-	-	-	-
	TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	-
b - Adubação mineral	1,2 kg de calcário dolomítico	-	-	-	440	160	-	-	-
	160 g NPK 6:30:6 + 2% S + 0,5% Zn	16	80	16	-	-	5	-	1,5
	70 g de Nitrato de Amônio	39	-	-	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	8 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	1,5	-
	180 g de NPK 20:0:20+0,5% B	60	-	60	-	-	-	1,5	-
	TOTAL	115	80	126	440	160	5	3	2
c - 10 t ha ⁻¹ lodo úmido	26 kg de lodo úmido	320	320	26	248	48	66	0,1	24
	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	34 g de Cloreto de Potássio	-	-	34	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2,9	-
	TOTAL	320	320	126	248	48	66	3	24
d - 10 t ha ⁻¹ lodo seco	6 kg de lodo seco	322	356	25	228	36	63	0,1	32
	16 g de Cloreto de potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	35 g de Cloreto de Potássio	-	-	35	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2,9	-
	TOTAL	322	356	126	228	36	63	3	24

Estudos realizados

Crescimento das árvores

Foram realizadas as medições de altura e DAP em todas as árvores nas parcelas do experimento, sendo mensuradas as 36 árvores úteis (desconsiderando uma bordadura simples) em cada uma das parcelas. Foram obtidos os valores nas idades de 18 e 36 meses e na determinação do volume individual das árvores foi utilizada a equação $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times DAP^{1,9117} \times HT^{1,3065}$, obtida por GUEDES (2005) em trabalho realizado na Estação Experimental de Itatinga, onde também foi avaliado o crescimento do *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólido nas entrelinhas de plantio.

Coletas do solo para análise dos atributos químicos

Foram obtidas com o auxílio de um trado amostras de terra coletadas em 8 pontos dentro de cada parcela experimental, nas profundidades de 0-5; 5-10; 10-20; 20-50 cm. As coletas de terra foram realizadas nas linhas de plantio dos eucaliptos aos 18 e 36 meses após a implantação do experimento e somente aos 36 meses nas entrelinhas. As amostras de terra foram secas em estufa (40°C) até atingirem peso constante. Logo após foram peneiradas em malha de 2 mm (9 mesh) e encaminhadas para análise laboratorial. No laboratório foram analisados os macro e micronutrientes. O N total foi determinado pelo método micro-Kjedhal, o P (resina) por colorimetria, os elementos K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, e Zn por espectrometria de absorção atômica, o sulfato por BaCl₂ em pó, a matéria orgânica por colorimetria, o potencial hidrogeniônico por potenciometria, o Al por titulometria.

A soma de bases foi obtida através do cálculo ($K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$), a capacidade troca catiônica foi obtida através do cálculo ($[SB + (H + Al)]$), a saturação de base foi obtida através do cálculo ($(S/T) \times 100$) e a saturação de alumínio ($[Al / (SB + Al)] \times 100$).

Para se avaliar de maneira adequada os resultados obtidos nas análises de solo realizadas aos 18 e 36 meses de idade, deve ser assinalado que a aplicação dos lodos de esgoto e do adubo químico não foi efetuada em toda a superfície das parcelas experimentais, mas apenas ao longo das linhas de plantio das mudas dentro de uma faixa de aproximadamente 0,75 cm de largura.

Análise estatística

As comparações entre as médias foram realizadas através da análise de variância e optou-se por aceitar todas as variações de até 5% de probabilidade. Para as análises nas quais se observou diferença significativa, utilizou-se o teste complementar de Duncan que é mais sensível as possíveis diferenças do que o teste de Tukey, comumente utilizado nesse tipo de pesquisa (Pimentel- Gomes e Garcia, 2002). Para representar o nível de significância obtido pela análise da variância foram utilizadas as seguintes legendas: (ns) – não significativo, (*) – significativo a 5 %, e (**) – significativo a 1 %, sendo esses símbolos padrões utilizados comumente.

5.3 Resultados

Produtividade

Observou-se que a adição do lodo de esgoto ao solo, complementado com K e B, aumentou a produtividade florestal, promovendo um maior crescimento dos eucaliptos em relação ao volume de madeira obtido no tratamento testemunha. O resultado dos tratamentos com o lodo de esgoto foi semelhante ao obtido com a adição do adubo mineral rotineiramente aplicado nos plantios das empresas florestais da região de Itatinga (Tabela 5.4). Esse efeito do lodo sobre os eucaliptos demonstrou sua capacidade de fornecer nutrientes de modo equivalente ao manejo mineral convencional, até os 36 meses de idade (tempo de observação deste estudo).

Tabela 5.4 - Volume médio de madeira ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) produzido respectivamente aos 18 e 36 meses nos tratamentos: testemunha, adubação mineral e aplicação de 10 t ha^{-1} dos lodos úmido (torta) e seco (granulado)

Idade	Testemunha	Adubo Mineral	Lodo úmido	Lodo seco
36 meses (*)	38,37 (b)	86,27 (a)	87,22 (a)	100,34 (a)
18 meses (*)	22,37 (b)	28,94 (a)	27,51 (a)	31,68 (a)

Fertilidade do solo

A fertilidade do solo de um povoamento florestal quando avaliada após o fechamento das copas não está relacionada apenas com os atributos químicos do solo pré-existent à implantação das árvores, mas também com os efeitos da transferência dos nutrientes do dossel da floresta para a superfície do solo, através da deposição do folheto e demais componentes da serapilheira (PRITCHETT, 1979). No capítulo anterior foi abordado a ciclagem de nutrientes e observou que a aplicação do lodo aumenta o fluxo de nutrientes da copa para o solo e neste capítulo verificou se existe um efeito significativo desse aumento de fluxo nos atributos químicos da entrelinha de plantio, aos 36 meses, que não recebeu a aplicação do lodo. A seguir são apresentadas as alterações observadas em relação a cada nutriente mineral em função dos tratamentos aplicados.

Nitrogênio total

Na camada superficial do solo (0-5 cm) as concentrações de N total obtidas nos tratamentos com aplicação dos lodos foram mais elevadas em relação ao tratamento testemunha e semelhantes ao tratamento com adubação mineral (Figura 2). Na camada de 5-10 cm de profundidade a diferença diminuiu, ficando em torno de 15% apenas em relação à testemunha e 30 % para a adubação mineral. Isso demonstra haver um efeito do lodo nos teores de nitrogênio até 10 cm de profundidade. Resultado semelhante foi encontrado por Rezende (2005), em parcelas experimentais de eucaliptos onde foram aplicadas 20 t ha⁻¹.

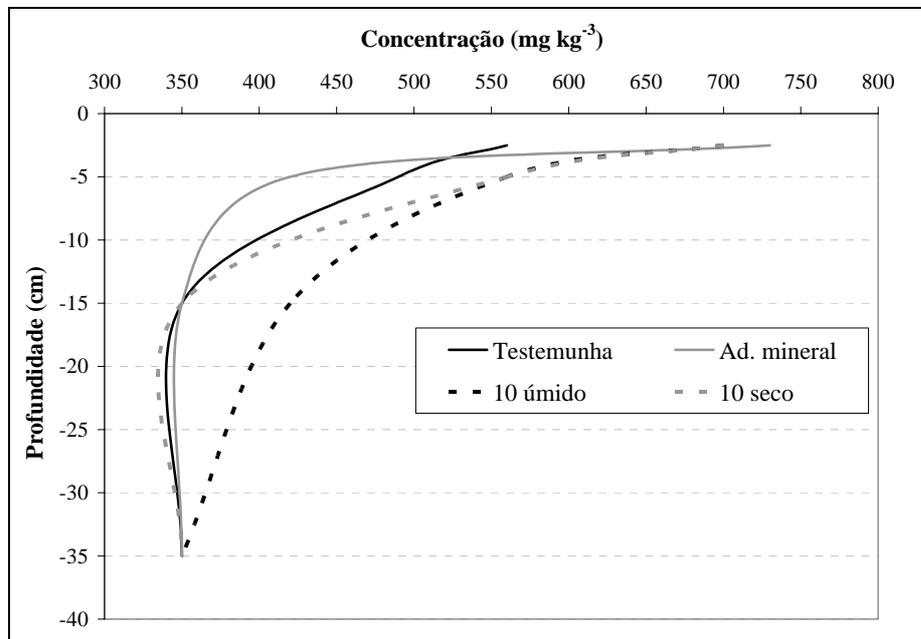


Figura 5.2. – Variação da concentração de nitrogênio total no perfil do solo, aos 18 meses, sob a linha de plantio, nos tratamentos sem adubação (testemunha), adubação mineral (ad. mineral) e nos tratamentos com aplicação de 10 t ha⁻¹ do lodo de Barueri úmido (10 úmido) e seco (10 seco)

Aos 36 meses de idade, foi verificado que ocorreram apenas diferenças significativas do N total na camada do solo, até 5 centímetros de profundidade, sob a linha de plantio, nos tratamentos com aplicação de lodo (Figura 5.3). Na entrelinha foram observados valores que foram, em média, cerca de 20% superiores, na camada de 0 a 5 cm, para os tratamentos com aplicação de fertilizantes (mineral ou lodo) em relação à testemunha. Entretanto, devido à variação naturalmente existente nesse tipo de estudo, não foi possível verificar diferenças estatísticas entre os tratamentos. Talvez a análise de amostras de solo coletadas apenas na camada

mais superficial (0-2 cm), poderia acusar diferenças significativas para os elementos N e P, em virtude da deposição do folheto. De acordo com Molina-Velasco (2004), apenas a aplicação de lodo de esgoto em quantidades superiores a 20 t ha⁻¹ resultara em aumento significativo dos teores de N-total em profundidade no solo. Deve-se ressaltar, no estudo realizado por Velasco Molina, que a avaliação foi realizada 55 meses após a aplicação dos adubos. Isto poderia explicar porque não se verificou diferença em relação à concentração do N total na camada superficial, como encontrado neste estudo aos 18 e aos 36 meses, após a aplicação do lodo na linha de plantio. Deve-se ressaltar, entretanto, que o efeito da liberação e a movimentação em profundidade do N contido no lodo deverão continuar ao longo do desenvolvimento do eucalipto.

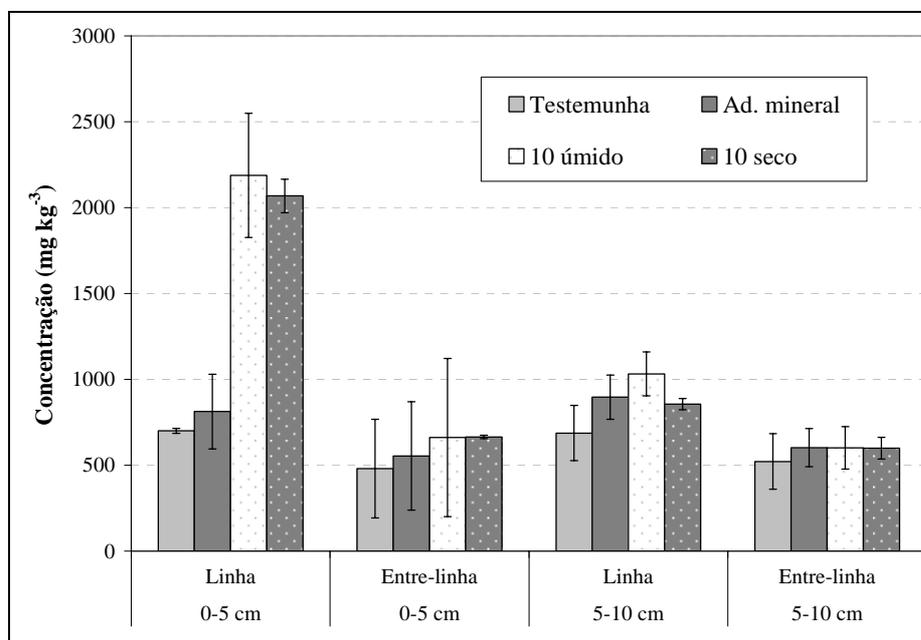


Figura 5.3. – Variação da concentração de nitrogênio no perfil do solo, aos 36 meses de idade, na linha e na entrelinha de 0 a 10 cm de profundidade, nos tratamentos: testemunha, adubação mineral (Ad. Mineral) e nos tratamentos com aplicação de 10 t ha⁻¹ do lodo de Barueri úmido (10 úmido) e seco (10 seco)

Fósforo

Observou-se um aumento na concentração de fósforo na camada superior do solo (0-10 cm de profundidade), devido à aplicação dos lodos seco e úmido em relação aos valores obtidos nos tratamentos com adubação mineral e testemunha (Figura 5.4). A maior quantidade de P na camada superficial foi encontrada no tratamento com biofósforo seco, sendo que a diferença em relação ao biofósforo úmido pode ser atribuída à decomposição mais rápida do lodo granulado. É possível que grande parte do fósforo adicionado, via adubo mineral, tenha sido absorvido pelas

árvores e em parte fixado pelo solo. Abaixo de 10 centímetros de profundidade não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Mas os valores foram de médio a alto (maior que 9 mg dm^{-3}) para os tratamentos com aplicação de lodo e baixos (de 3 a 5 mg dm^{-3}) para os tratamentos com adubação mineral e a testemunha, de acordo com a classificação de Van Raij et al. (1996). Aplicando essa classificação aos resultados obtidos na camada superficial (0-5 cm), os valores obtidos nos tratamentos com aplicação de lodo poderiam ser considerados como “muito altos”, para todas as culturas.

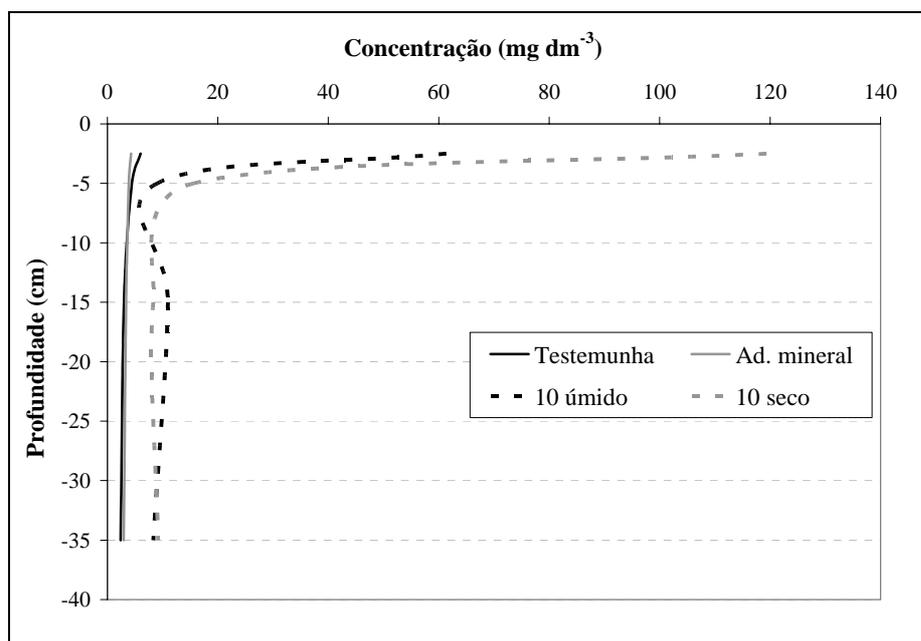


Figura 5.4 – Variação da concentração de fósforo (resina), aos 18 meses de idade dos eucaliptos, no perfil do solo sob a linha de plantio em função dos diferentes tratamentos aplicados

Comparando os valores obtidos na linha de plantio, aos 36 meses de idade, com os obtidos aos 18 meses, observou-se um comportamento semelhante (Figura 5.5). Observa-se, entretanto, que as concentrações de fósforo foram mais elevadas, chegando o lodo úmido a 250 e o seco a 390 mg dm^{-3} . As diferenças que ocorrem nas camadas mais profundas (abaixo de 10 cm) são numericamente muito grandes e isso se deve, provavelmente, à movimentação do fósforo orgânico do lodo, visto que no tratamento com aplicação do fósforo mineral não foi observado aumento em nenhuma das camadas. Presume-se, portanto, que o fósforo mineral tenha sido fixado no solo. Nas entrelinhas (Figura 5.6), não foi observada nenhuma diferença entre os tratamentos, sendo os valores das concentrações de fósforo bem inferiores aos da linha de plantio nos tratamentos com aplicação do lodo.

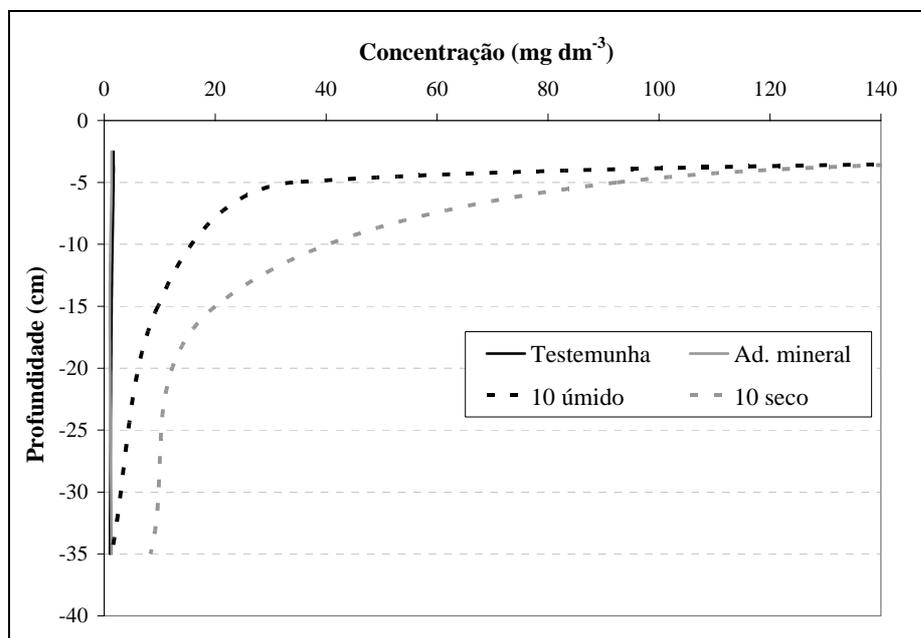


Figura 5.5 – Variação da concentração de fósforo aos 36 meses no perfil do solo, sob a linha de plantio, em função dos diferentes tratamentos aplicados

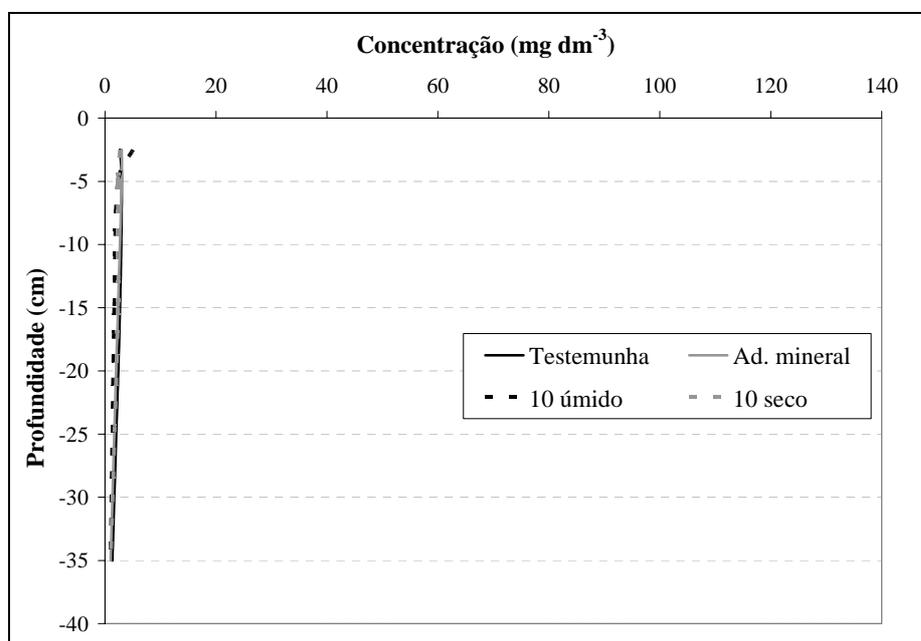


Figura 5.6 – Variação da concentração de fósforo aos 36 meses no perfil do solo, na entrelinha de plantio, em função dos diferentes tratamentos aplicados

Potássio

Observa-se na Tabela 5.5, que a diferença da concentração de potássio no solo entre os tratamentos aplicados não foi significativa. Entretanto, as concentrações de K no solo dos tratamentos com aplicação de lodo foram numericamente superiores ao tratamento testemunha e similares ao tratamento com adubação mineral, nas camadas mais superficiais do solo, evidenciando o efeito da complementação do lodo de esgoto com potássio. Provavelmente, o potássio, que apresenta grande mobilidade no ecossistema, foi absorvido pelas raízes dos eucaliptos e novamente transferido para o estoque da serapilheira acumulada sobre o solo do povoamento, formando assim um contínuo processo de ciclagem. Aos 36 meses de idade (Tabela 5.7), observaram-se diferenças significativas apenas entre as amostras coletadas nas linhas de plantio da camada superficial do solo (0-10 cm), sendo maiores as concentrações de K nos tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco.

Cálcio

Observa-se na Tabela 5.5 que, aos 18 meses, a concentração de cálcio no solo do tratamento com aplicação de lodo seco, entre 0 e 5 cm, foi superior ao tratamento testemunha e semelhante à adubação mineral. Entretanto, o tratamento com lodo úmido apresentou a concentração de cálcio apenas semelhante à testemunha, devido talvez à sua degradação mais lenta. Abaixo de 5 cm de profundidade, não mais se observa o efeito dos lodos sobre a concentração de cálcio no solo. Aos 36 meses de idade (Tabela 5.7), observa-se apenas o efeito direto da aplicação dos lodos na camada superficial do solo. Esses resultados diferem dos obtidos por Guedes (2005), devido às características do experimento no qual o lodo havia sido tratado com cal hidratada e aplicado nas entrelinhas de plantio. De acordo com van Raij et al. (1996) os valores obtidos aos 36 meses na camada de 0-5 cm, nos tratamentos com aplicação de lodo, são considerados altos, mas se considerar a camada de 0-20 cm os valores são considerados médios para esses tratamentos.

Magnésio

Os maiores valores de Mg no solo foram observados no tratamento com adubação mineral até 20 cm de profundidade (Tabela 5.5 e 5.6). Na camada entre 0 e 10 cm de profundidade, o Mg chegou a apresentar uma concentração 10 vezes superior aos tratamentos com bio-sólido, o que

pode ser atribuído à calagem previamente efetuada no tratamento com adubo mineral. Deve ser salientado que o magnésio foi o único nutriente adicionado ao solo em quantidade três vezes maior através da calagem no tratamento com adubação mineral, ao passo que os demais nutrientes foram adicionados em maior quantidade pelos tratamentos com aplicação de biossólidos. De acordo com van Raij et al. (1996) os valores obtidos com tratamentos são considerados baixos, apenas o tratamento com adubação mineral obteve, de acordo com essa classificação, valores altos aos 18 meses de idade.

Tabela 5.5 – Concentração de macronutrientes na camada do solo entre 0 e 50 cm de profundidade em amostras coletadas, aos 18 meses após o início do experimento, nas linhas de plantio dos tratamentos: testemunha, adição de adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	Profun. (cm)	mmolc dm ⁻³						S-SO ₄ ²⁻ mg dm ⁻³	
		K		Ca		Mg			
Testemunha		0,11	a	2,4	b	0,9	b	7,6	b
Ad. mineral	0-5	0,39	a	14,1	a	14,2	a	6,9	b
10 úmido		0,39	a	5,1	b	1,4	b	20,2	a
10 seco		0,36	a	10,9	a	2,7	b	16,8	a
Valor de F		1,30	(ns)	16,8	(**)	20,8	(**)	13,9	(**)
Testemunha	5-10	0,03	a	2,0	b	1,2	b	6,5	c
Ad. mineral		0,22	a	9,8	a	10,4	a	7,6	c
10 úmido		0,17	a	1,5	b	0,6	b	25,6	a
10 seco		0,17	a	3,0	a b	0,8	b	17,2	b
Valor de F	1,67	(ns)	3,50	(10%)	8,17	(*)	27,9	(**)	
Testemunha	10-20	0,03	a	1,9	a	1,1	b	9,9	c
Ad. mineral		0,01	a	5,9	a	6,0	a	8,8	c
10 úmido		0,06	a	2,0	a	0,6	b	37,4	a
10 seco		0,06	a	2,3	a	0,8	b	23,7	b
Valor de F	0,55	(ns)	3,27	(ns)	9,14	(*)	23,6	(**)	
Testemunha	20-50	0,00	a	1,0	a	0,4	a	9,5	c
Ad. mineral		0,00	a	2,9	a	2,2	a	12,2	c
10 úmido		0,00	a	1,4	a	0,5	a	59,5	a
10 seco		0,00	a	1,5	a	0,6	a	42,4	b
Valor de F	nd		1,6	(ns)	2,2	(ns)	75,23	(**)	

Tabela 5.6 – Concentração de macronutrientes na camada do solo entre 0 e 50 cm de profundidade, aos 36 meses, nas *linhas e entrelinhas* de plantio dos tratamentos: testemunha, adição de adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	Profun.	mmolc dm ⁻³				Mg	S-SO ₄ ²⁻		
		K	Ca		mg dm ⁻³				
LINHAS DE PLANTIO									
Testemunha		0,30	b	1,0	c	1,00	b	1,33	a
Ad. mineral	0-5	0,40	b	4,0	b c	4,00	a	1,00	a
10 úmido		0,67	a	11,0	a b	2,33	a b	2,00	a
10 seco		0,63	a	16,0	a	3,00	a b	3,33	a
Valor F		10,42	(**)	8,49	(**)	4,38	(*)	1,32	(ns)
Testemunha		0,20	c	1,0	b	1,00	b	1,00	a
Ad. mineral	5-10	0,27	b c	2,0	a b	2,00	a	1,33	a
10 úmido		0,33	a b	1,6	a b	1,00	b	2,67	a
10 seco		0,37	a b	4,0	a	1,00	b	2,33	a
Valor F		6,56	(*)	2,73	(ns)	nd	(**)	0,76	(ns)
Testemunha		0,20	a	1,0	a	1,00	a	1,33	b
Ad. mineral	10-20	0,20	a	1,0	a	1,00	a	1,33	b
10 úmido		0,20	a	1,0	a	1,00	a	4,33	a
10 seco		0,20	a	1,6	a	1,00	a	3,67	a b
Valor F		nd	(ns)	1,00	(ns)	nd	(ns)	4,00	0,1
Testemunha		0,10	b	1,0	a	1,00	a	1,67	c
Ad. mineral	20-50	0,10	b	1,0	a	1,00	a	1,33	c
10 úmido		0,20	a	1,0	a	1,00	a	17,33	a
10 seco		0,10	b	1,0	a	1,00	a	8,67	b
Valor F		inf	(**)		(ns)	nd	(ns)	20,38	(**)
Testemunha		0,37	a	2,0	a	1,00	b	1,00	b
ENTRELINHAS DE PLANTIO									
Ad. mineral	0-5	0,40	a	3,6	a	3,67	a	4,00	a
10 úmido		0,37	a	1,0	a	1,00	b	1,00	b
10 seco		0,37	a	1,0	a	1,00	b	1,00	b
Valor F		0,17	(ns)	2,59	(ns)	4,92	(*)	3,86	0,1
Testemunha		0,30	a	1,0	b	1,00	b	1,00	a
Ad. mineral	5-10	0,27	a	1,6	a	1,67	a	1,33	a
10 úmido		0,30	a	1,0	b	1,00	b	1,00	a
10 seco		0,23	a	1,0	b	1,00	b	2,00	a
Valor F		1,83	(ns)	4,00	(10%)	4,00	(10%)	0,18	(ns)
Testemunha		0,20	a	1,0	a	1,00	a	1,00	b
Ad. mineral	10-20	0,20	a	1,0	a	1,00	a	1,67	a
10 úmido		0,20	a	1,0	a	1,00	a	1,00	b
10 seco		0,23	a	1,0	a	1,00	a	1,00	b
Valor F		1,00	(ns)	nd	(ns)	nd	(ns)	4,00	0,1
Testemunha		0,10	a	1,0	a	1,00	a	1,33	c
Ad. mineral	20-50	0,10	a	1,0	a	1,00	a	3,67	a
10 úmido		0,10	a	1,0	a	1,00	a	1,00	c
10 seco		0,13	a	1,0	a	1,00	a	2,67	b
Valor F		1,00	(ns)	nd	(ns)	nd	(ns)	18,22	(**)

Enxofre

Ocorre uma maior elevação na concentração deste nutriente nos tratamentos com a aplicação dos lodos e principalmente do lodo úmido (Tabelas 5.5 e 5.6). Essa tendência foi observada até a profundidade de 50 cm. Diferentemente dos demais elementos, foi observado um aumento da concentração do enxofre com a profundidade, independentemente dos tratamentos. Os valores obtidos nos tratamentos com aplicação de lodo na linha de plantio, aos 18 meses, são considerados altos (VAN RAIJ et al., 1996). O fato evidencia sua grande mobilidade no solo, sendo o enxofre facilmente lixiviado ou absorvido pelas plantas. Observa-se na Tabela 5.7 que, aos 36 meses, as concentrações do S no solo são mais baixas do que aos 18 meses em todos os tratamentos.

Os valores das concentrações de micronutrientes nas amostras de solo coletadas entre 0 e 50 cm de profundidade aos 18 e aos 36 meses, após o início do experimento, são apresentados respectivamente nas Tabelas 5.8 e 5.9.

Boro

Mesmo não sendo estatisticamente diferentes, devido à grande variação dos teores do boro nas amostras de solo, as concentrações deste elemento nos tratamentos com aplicação do lodo de esgoto foram superiores ao tratamento testemunha e semelhantes ao tratamento com adubação mineral, principalmente na camada superficial do solo (Tabelas 5.8 e 5.9).

Cobre

Os teores de cobre nas amostras de solo foram mais elevados nos tratamentos com a aplicação dos lodos, principalmente nas camadas superficiais entre 0 e 10 cm de profundidade. Nota-se, entretanto, que aos 36 meses os tratamentos com os lodos apresentaram teores significativamente mais elevados de Cu no solo até a camada de 50 cm de profundidade. Essa modificação encontrada no solo difere dos resultados obtidos por Rezende (2005) que não observou aumento do teor de cobre na camada superficial do solo (0-10 cm) com aplicação de 20 t ha⁻¹ de lodo, mas cabe ressaltar que a aplicação foi realizada em faixa superior a 2 metros de largura na entrelinha de plantio e neste experimento a faixa de aplicação foi de apenas 0,75.

Ferro

Aos 18 meses, mesmo não sendo estatisticamente diferentes, os teores de ferro encontrados nos tratamentos evidenciam aumento de sua concentração na camada superior do solo devido à aplicação dos lodos de esgoto (Tabela 5.8). A semelhança estatística entre tratamentos pode ser explicada pela grande variação entre amostras de solo. Entretanto, aos 36 meses, a diferença significativa foi observada até a camada de 20 cm de profundidade.

Manganês

Aos 18 meses, observou-se aumento na concentração de manganês até 20 cm de profundidade, devido à aplicação da adubação mineral (Tabela 5.8). As concentrações mais baixas foram observadas nos tratamentos com aplicação do lodo de esgoto. Este resultado difere do obtido por Guedes (2005), que observou um aumento no teor do Mn devido à aplicação do lodo. Esta resposta diferente pode estar relacionada com as taxas de liberação do manganês no solo, devido às características dos lodos utilizados. Todavia, aos 36 meses, os maiores valores foram observados nos tratamentos com aplicação de lodo, em consonância com os resultados observados por Guedes (2005) em seu estudo. Os valores obtidos aos 36 meses são superiores aos obtidos aos 18 meses, mas são considerados teores médios para todos os tratamentos na camada superficial (VAN RAIJ et al., 1996).

Zinco

Foi observado o aumento significativo deste metal nas amostras coletadas nas linhas de plantio nas camadas do solo até 20 e 50 cm de profundidade, respectivamente, aos 18 e aos 36 meses após o plantio, devido à aplicação dos lodos de esgoto. (Figura 5.9) As concentrações mais baixas foram observadas no tratamento com adubação mineral, visto que apresentaram valores também inferiores ao tratamento testemunha. Esse resultado pode ser atribuído ao acentuado crescimento dos eucaliptos plantados nas parcelas tratadas com adubo mineral, que intensificou a absorção destes micronutrientes, através do sistema radicular. O efeito da aplicação do lodo é visível na concentração desse nutriente no solo sob a faixa em que foi aplicado o lodo e esse efeito é mais pronunciado aos 36 meses.

Tabela 5.8 – Concentração de micronutrientes na camada do solo entre 0 e 50 cm de profundidade em amostras coletadas *nas linhas de plantio* 18 meses após o início do experimento nos tratamentos: testemunha, adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	prof (cm)	mg dm ⁻³									
		B		Cu		Fe		Mn		Zn	
Testemunha	0-5	0,2	a	1,3	b	95,5	a	1,1	b	1,17	b
Ad. mineral		0,5	a	1,4	b	82,6	a	2,4	a	0,3	b
10 úmido		0,4	a	2,5	a b	137,5	a	0,7	b	4,35	a b
10 seco		0,6	a	3,9	a	117,2	a	0,6	b	7,3	a
Valor de F		2,1	(ns)	6,82	(*)	1,6	(ns)	8,0	(*)	7,46	(*)
Testemunha	5-10	0,2	a	1,0	b	79,8	a	0,8	b	0,5	b
Ad. mineral		0,6	a	1,4	b	69,0	a	1,8	a	0,3	b
10 úmido		0,3	a	1,8	ab	104,1	a	0,5	b	2,9	a
10 seco		0,5	a	2,5	a	102,2	a	0,5	b	3,4	a
Valor de F		2,0	(ns)	5,1	(*)	1,2	(ns)	21,8	(**)	5,3	(*)
Testemunha	10-20	0,2	a	0,9	b	67,3	a	0,6	b	0,3	b
Ad. mineral		0,4	a	1,1	ab	62,5	a	1,2	a	0,2	b
10 úmido		0,3	a	1,2	ab	81,8	a	0,5	b	1,5	a
10 seco		0,6	a	1,5	a	77,4	a	0,4	b	1,3	a
Valor de F		1,3	(ns)	5,5	(*)	1,1	(ns)	6,1	(*)	7,3	(*)
Testemunha	20-50	0,2	a	0,9	a	44,6	a	0,4	a	0,4	ab
Ad. mineral		0,3	a	1,0	a	49,3	a	0,7	a	0,2	b
10 úmido		0,2	a	1,2	a	66,8	a	0,5	a	1,0	a
10 seco		0,6	a	1,1	a	55,5	a	0,3	a	0,8	ab
Valor de F		1,1	(ns)	1,2	(ns)	1,4	(ns)	2,6	(ns)	3,8	(10%)

Matéria orgânica

Aos 18 meses não foi observado aumento da matéria orgânica no solo devido à aplicação dos diferentes tipos de lodo (Tabela 5.10). Deve-se lembrar que as amostras coletadas foram apenas de solo sem conter, aparentemente, resíduo dos lodos aplicados. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Rezende (2005), segundo o qual, ocorreria o aumento da atividade microbiana do solo, após a aplicação do bio sólido, provocando a redução no teor da matéria orgânica e igualando seus valores nos diferentes tratamentos. Mas aos 36 meses de idade, na camada de 0 a 10 cm, foram observadas diferenças entre os tratamentos devido à aplicação de lodo.

Tabela 5.9 – Concentração de micronutrientes na camada do solo entre 0 e 50 cm de profundidade *nas linhas e entrelinhas de plantio*, 36 meses após o início do experimento nos tratamentos: testemunha, adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	prof (cm)	mg dm ⁻³									
		B	Cu		Fe		Mn		Zn		
LINHAS DE PLANTIO											
Testemunha		0,18	b	2,8	b	135	b	1,36	b	0,73	b
Ad. mineral	0-5	0,29	a b	2,4	b	128	b	3,2	a b	0,33	b
10 úmido		0,38	a	20,7	a	278,3	a	3,76	a	45,2	a
10 seco		0,25	a b	12,3	a b	203,3	a b	4,06	a	39,8	a
Valor F		4,49	(10%)	6,75	(*)	6,18	(*)	4,94	(*)	82,2	(**)
Testemunha		0,22	a	1,2	b	92	b	0,76	a	0,43	b
Ad. mineral	5-10	0,27	a	1,26	b	82,67	b	1,40	a	0,16	b
10 úmido		0,2	a	5,4	a	183,33	a	1,46	a	15,7	a
10 seco		0,3	a	5,13	a	191,67	a	1,63	a	15,4	a
Valor F		1,43	(ns)	22,04	(**)	5,7	(*)	0,96	(ns)	19,81	(**)
Testemunha		0,26	a	0,83	b	66	b	0,5	a	0,5	b
Ad. mineral	10-20	0,29	a	0,9	b	65	b	0,56	a	0,1	b
10 úmido		0,26	a	1,86	a	133	a	0,56	a	3,9	a
10 seco		0,23	a	1,76	a	99	a b	0,46	a	3,4	a
Valor F		1,21	(ns)	18,61	(**)	6,52	(*)	0,75	(ns)	24,12	(*)
Testemunha		0,2	a	0,86	b	48,3	a	0,46	a	0,2	a
Ad. mineral	20-50	0,32	a	0,9	b	45,6	a	0,4	a	nd	
10 úmido		0,23	a	1,33	a	54	a	0,43	a	1,46	a
10 seco		0,24	a	1,36	a	59,6	a	0,33	a	1,36	a
Valor F		1,06	(ns)	6,57	(*)	1,82	(ns)	0,52	(ns)	3,97	(ns)
ENTRELINHAS DE PLANTIO											
Testemunha		0,21	a	1,47	a	203	a	0,96	b	0,43	a
Ad. mineral	0-5	0,26	a	0,9	a	170	a	3,6	a	0,40	a
10 úmido		0,27	a	1,5	a	171	a	1,76	a b	1,20	a
10 seco		0,25	a	1,47	a	179	a	1,03	b	0,63	a
Valor F		0,87	(ns)	1,6	(ns)	1,11	(ns)	4,11	10	1,74	(ns)
Testemunha		0,19	a	1,1	a	167	a	0,86	a	0,33	a
Ad. mineral	5-10	0,23	a	0,6	a	133	a	1,23	a	0,23	a
10 úmido		0,19	a	0,86	a	215	a	0,9	a	0,5	a
10 seco		0,24	a	1,26	a	158	a	0,76	a	0,53	a
Valor F		0,89	(ns)	3,01	(ns)	0,54	(ns)	1,3	(ns)	0,45	(ns)
Testemunha		0,17	a	0,93	a	73	a	0,56	a	0,2	a
Ad. mineral	10-20	0,25	a	0,83	a	69	a	0,6	a	0,1	a
10 úmido		0,23	a	0,83	a	83,3	a	0,53	a	0,26	a
10 seco		0,15	a	0,93	a	84,6	a	0,4	a	0,25	a
Valor F		1,99	(ns)	0,17	(ns)	0,72	(ns)	0,61	(ns)	1,71	(ns)
Testemunha		0,15	b	0,9	a	47,6	a	0,43	a	nd	
Ad. mineral	20-50	0,18	a b	0,9	a	50	a	0,4	a	nd	
10 úmido		0,23	a	0,86	a	55,3	a	0,43	a	nd	
10 seco		0,17	a b	0,86	a	57,3	a	0,33	a	nd	
Valor F		3,33	(10%)	0,05	(ns)	0,53	(ns)	0,47	(ns)		

Potencial Hidrogeniônico

A aplicação dos lodos de esgoto condicionados com polieletrólitos não gerou grandes alterações nos valores de pH do solo, ao contrario do que ocorreu no experimento conduzido por Guedes (2005) no qual, o lodo aplicado nas entrelinhas de plantio dos eucaliptos foi condicionado quimicamente com cal e cloreto férrico, apresentando um pH fortemente alcalino. O bio sólido utilizado neste experimento foi condicionado com um polímero catiônico que não influencia o pH. Todavia pode-se verificar o efeito da calagem sobre o pH (Tabela 5.10). Conseqüentemente, o tratamento com adubação mineral tem valores mais elevados de pH.

Alumínio

Os teores de alumínio no solo não foram afetados pela adição de bio sólido. Observou-se que a concentração do alumínio é influenciada pela prática da calagem que, de acordo com Camargo et al (1997), ocorre quando se aumenta o pH do solo e assim o Al^{3+} sofre hidrólise deixando vagos sítios de troca de cátions.

A aplicação dos lodos ao solo deu origem a valores inferiores para a saturação de Al em relação aos valores observados no tratamento testemunha, entretanto, observou-se o menor valor no solo para o tratamento com adubação mineral. Esses resultados são observados principalmente na camada superficial do solo entre 0-10 cm (Tabela 5.10).

Soma de Base (SB)

Foi observado que os dados de saturação de base nas amostras de solo coletado nos tratamentos com aplicação de lodos foram superiores (principalmente, na camada de 0-5 cm) ao tratamento testemunha e inferiores à adubação mineral em todo o perfil. Nos tratamentos com aplicação de lodo foi possível observar diferença entre eles, sendo que o lodo seco propiciou maiores valores do que o lodo úmido, o que está relacionado com o cálcio, pois a soma de base é resultante da somatória dos teores de K, Ca e Mg.

Capacidade de troca catiônica (T)

Não foi observado o aumento dos valores da capacidade de troca catiônica no solo devido à aplicação dos diferentes tipos de lodos, aos 18 meses. Observou-se que a capacidade de troca catiônica é influenciada diretamente pela a prática da calagem, pois ocorre o aumento do pH do

solo, deixando vagos sítios de troca de cátions e ocasionando a dissociação do hidrogênio aumentando a CTC (T) do solo (CAMARGO et al., 1997). Aos 36 meses foi observada a influencia da aplicação do lodo, principalmente, na camada superficial do solo.

Tabela 5.10 – Atributos do solo na camada entre 0 e 50 cm de profundidade em amostras coletadas 18 meses após o início do experimento nos tratamentos: testemunha, adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	prof (cm)	M.O.		pH		Al		SB		T		V		Sat.	
		g dm ⁻³		CaCl ₂		mmolc dm ⁻³		mmolc dm ⁻³		%		Al ³⁺			
Testemunha		29,5	a	3,7	b	22,5	a	3,4	c	75,2	a	5,0	c	86,4	a
Ad. mineral	0-5	29,1	a	4,5	a	6,3	b	28,7	a	72,7	a	40,0	a	19,4	d
10 úmido		26,0	a	3,7	b	18,5	a	6,9	b c	68,1	a	9,8	b c	74,6	b
10 seco		27,6	a	3,7	b	20,1	a	14,0	b	85,3	a	17,3	b	58,7	c
Valor de F		0,2	(ns)	12,1	(**)	21,7	(**)	21,5	(**)	1,2	(ns)	21,3	(**)	94,0	(**)
Testemunha		22,9	a	3,8	b	19,4	a	3,2	a	62,2	a	4,7	b	87,1	a
Ad. mineral	5-10	23,7	a	4,4	a	7,1	b	20,5	b	65,5	a	31,2	a	29,8	b
10 úmido		20,2	a	3,7	b	19,5	a	2,2	a	67,1	a	3,2	b	90,0	a
10 seco		22,5	a	3,7	b	19,3	a	4,0	a	71,7	a	5,6	b	82,8	a
Valor de F		1,9	(ns)	7,0	(*)	21,3	(**)	4,98	(*)	0,5	(ns)	5,9	(*)	19,1	(**)
Testemunha		18,3	a	3,8	b	16,9	a	3,0	b	57,4	a	5,3	b	85,6	a
Ad. mineral	10-20	20,2	a	4,1	a	10,1	b	11,9	a	54,3	a	22,1	a	47,6	b
10 úmido		18,6	a	3,7	b	18,2	a	2,6	b	61,3	a	4,4	b	87,0	a
10 seco		19,0	a	3,8	b	18,0	a	3,1	b	60,1	a	5,3	b	85,2	a
Valor de F		0,5	(ns)	5,9	(*)	10,93	(**)	7,3	(*)	0,9	(ns)	6,3	(*)	10,8	(**)
Testemunha		14,0	a	3,9	b	13,3	a	1,4	b	40,4	a	3,5	b	90,5	a
Ad. mineral	20-50	15,9	a	4,0	a	10,4	a	5,2	a	43,8	a	11,4	a	67,9	b
10 úmido		13,6	a	3,8	b	19,1	a	1,9	a b	39,2	a	5,1	b	89,8	a
10 seco		18,6	a	3,8	b	15,7	a	2,1	a b	47,4	a	4,3	b	88,2	a
Valor de F		0,4	(ns)	9,3	(**)	20,1	(ns)	3,6	(10)	0,7	(ns)	4,0	(10)	5,4	(*)

Saturação de Base (V)

Foi observado que os valores de saturação de base do solo nos tratamentos com aplicação de lodo foram superiores ao tratamento testemunha e inferiores a adubação mineral em todo o perfil. A diferença foi mais acentuada na camada superficial do solo. Aos 36 meses foi observada a influencia da aplicação do lodo seco, principalmente, na camada superficial do solo.

Tabela 5.11 – Atributos do solo na camada entre 0 e 50 cm de profundidade em amostras coletadas 36 meses após o início do experimento nos tratamentos: testemunha, adubo mineral e 10 toneladas por hectare dos lodos úmido e seco

Tratamentos	prof (cm)	M.O. g dm ⁻³	pH CaCl ₂	Al	SB mmolc dm ⁻³	T	V %	Sat. Al ³⁺							
LINHAS DE PLANTIO															
Testemunha		24,3	b	3,70	c	13,6	a	2,3	c	55,6	b	4,33	b	85,6	a
Ad. mineral	0-5	30,3	b	3,93	a b	11,0	a b	8,4	b c	64,7	b	14,33	a b	60,3	b
10 úmido		50,6	a	3,87	b	11,3	a b	14,0	a b	101	a b	14,33	a b	45,3	b c
10 seco		44,0	a	4,00	a	9,0	b	19,6	a b	84,3	a	23,00	a	33,3	c
Valor F		12,0	(**)	11,93	(**)	4,54	(*)	7,05	(*)	5,04	(*)	4,75	(*)	15,4	(**)
Testemunha		21,3	b	3,77	a b	12,3	a	2,20	b	47,8	a b	4,33	b	85,3	a
Ad. mineral	5-10	22,0	a b	3,90	a b	10,0	b	4,27	a b	43,6	b	9,67	a	70,0	b
10 úmido		27,0	a b	3,67	b	13,3	a	3,00	a b	64,6	a	5,00	b	82,0	a
10 seco		28,6	a	3,70	b	13,0	a	5,37	a	65,3	a	8,33	a b	72,0	b
Valor F		3,40	(10%)	4,79	(*)	7,39	(*)	3,08	(10%)	3,57	(*)	4,68	(*)	6,38	(*)
Testemunha		16,6	a	3,87	a	11,0	a b	2,20	a	36,5	b	6,00	a	83,3	a
Ad. mineral	10-20	16,3	a	3,87	a	9,3	b	2,20	a	35,5	b	6,00	a	80,6	a
10 úmido		19,6	a	3,73	b	12,0	a b	2,20	a	50,8	a	4,33	a	84,6	a
10 seco		19,3	a	3,77	a b	12,6	a	2,87	a	49,2	a	5,67	a	82,3	a
Valor F		2,90	(ns)	4,25	(*)	6,88	(*)	1,00	(ns)	3,30	(10%)	1,62	(ns)	1,25	(ns)
Testemunha		14,3	a	3,90	a	9,3	b c	2,10	a	31,1	a	6,67	a	81,6	a b
Ad. mineral	20-50	14,6	a	3,97	a	8,6	c	2,10	a	29,1	a	7,67	a	80,3	b
10 úmido		15,3	a	3,83	a	10,6	a	2,20	a	38,2	a	5,67	a	82,6	a
10 seco		13,6	a	3,80	a	10,3	a b	2,10	a	36,7	a	5,67	a	83,3	a
Valor F		0,62	(ns)	2,46	(ns)	7,58	(**)	1,00	(ns)	1,81	(ns)	2,06	(ns)	6,13	(*)
Testemunha			31,3	a	3,67	b	16,3	a	3,37	b	74,0	a	5,00	b	82,6
ENTRELINHAS DE PLANTIO															
Ad. mineral	0-5	34,3	a	3,93	a	12,3	a	7,73	a	70,4	a	10,67	a	62,3	b
10 úmido		32,3	a	3,57	b	17,6	a	2,37	b	87,0	a	3,33	b	87,3	a
10 seco		33,0	a	3,60	b	17,3	a	2,37	b	88,3	a	2,67	b	88,0	a
Valor F		0,29	(ns)	5,54	(*)	1,22	(ns)	3,85	(10%)	0,26	(ns)	5,29	(*)	5,38	(*)
Testemunha		25,3	a	3,70	b	15,3	a	2,30	b	60,6	a	3,67	b	86,6	a
Ad. mineral	5-10	23,0	a	3,83	a	12,6	a	3,60	a	55,6	a	6,33	a	77,6	b
10 úmido		24,3	a	3,77	b	13,6	a	2,30	b	51,3	a	4,67	b	85,6	a
10 seco		24,3	a	3,70	b	13,6	a	2,23	b	66,2	a	3,00	b	86,0	a
Valor F		0,18	(ns)	2,93	(10%)	1,76	(ns)	4,13	(*)	3,03	(ns)	4,20	(*)	3,72	(10%)
Testemunha		17,6	a	3,87	a	11,6	a	2,20	a	42,2	a	5,33	a	84,3	a
Ad. mineral	10-20	15,3	a	3,90	a	10,0	a	2,20	a	39,2	a	5,67	a	81,6	a
10 úmido		19,0	a	3,80	a	11,0	a	2,20	a	40,8	a	5,33	a	83,3	a
10 seco		17,3	a	3,83	a	11,6	a	2,23	a	52,9	a	4,00	a	84,0	a
Valor F		0,95	(ns)	0,83	(ns)	1,60	(ns)	1,00	(ns)	1,88	(ns)	1,31	(ns)	1,69	(ns)
Testemunha		14,0	a	3,83	a	9,3	a	2,10	a	32,4	a	6,67	a	81,6	a
Ad. mineral	20-50	13,6	a	3,90	a	9,6	a	2,10	a	31,4	a	7,00	a	82,3	a
10 úmido		15,3	a	3,90	a	9,3	a	2,10	a	33,1	a	6,67	a	81,3	a
10 seco		14,3	a	3,87	a	9,6	a	2,13	a	38,8	a	5,33	a	82,0	a
Valor F		0,78	(ns)	1,83	(ns)	0,13	(ns)	1,00	(ns)	0,97	(ns)	0,94	(ns)	0,22	(ns)

Considerando-se a sustentabilidade do ecossistema florestal, a aplicação do lodo é benéfica, pois pode repor os nutrientes exportados pela colheita ou mesmo enriquecer um ecossistema degradado. A aplicação do lodo além de ser benéfica ao crescimento das plantas, aumenta o fluxo dos nutrientes nos diferentes compartimentos do ecossistema (solo, planta, serapilheira) de modo a acelerar a regeneração local. O efeito indireto da aplicação do lodo provavelmente será observado ao final do ciclo do eucalipto, que gira normalmente ao redor de 6 anos.

De maneira geral, foi possível observar neste estudo, que a adição de lodo de esgoto ao solo em plantações florestais, além de aumentar a produtividade de madeira não afetou de forma deletéria os atributos químicos do solo estudados. Os valores observados de Cu, Mn e Zn estão abaixo das concentrações fitotóxicas em solos apresentados por Tsutiya (2006). O único elemento que obteve grande aumento na concentração foi o fósforo na camada superficial que ficou muito acima do considerado adequado para a cultura florestal (VAN RAIJ et al., 1996).

Considerando o resultado do estudo realizado por Faria (2000), que concluiu haver ao redor de ETE de Barueri da SABESP-SP um raio economicamente viável de plantações de eucaliptos capazes de absorver toda a produção de lodo de esgoto produzido na ETE, a destinação do lodo para estas áreas poderia ser uma solução viável. Obviamente haverá necessidade de um estudo caso a caso.

De acordo com Abreu Junior et al. (2005), que reuniram informações de diversos trabalhos, a definição da dose adequada de lodo a ser aplicada ao solo depende principalmente das características do lodo produzido na ETE. Concluem esses autores, que não existem geralmente grandes diferenças na composição do lodo de esgoto, visto que as faixas de variações observadas para N, P e K são sensivelmente menores do que as variações encontradas nas concentrações dos metais pesados. As maiores variações ocorrem principalmente nos teores de Cu, Cd, Pb, Cr, Ni e Zn e pode ser atribuída ao perfil industrial da área de coleta do esgoto e aos fatores de sazonalidade.

5.4 Conclusões

1. A aplicação dos lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado), complementados com K e B, nas linhas de plantio dos eucaliptos das parcelas experimentais propiciou um maior incremento no volume de madeira produzida em relação ao tratamento testemunha.
2. A aplicação dos lodos promoveu o aumento da concentração dos macro e micronutrientes do solo nas camadas superficiais das linhas de plantio (0-5 e 5-10 cm), onde foram aplicados os lodos.
3. Os tratamentos com a aplicação dos lodos de esgoto e do adubo mineral nas linhas de plantio não modificaram significativamente os atributos químicos do solo nas entrelinhas dos eucaliptos.

Referências

- ABREU JUNIOR, C.H.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.391-479, 2005.
- CAMARGO, O.A. de, CASTRO, O.M. de, VIEIRA, S.R; QUAGGIO, A.. Alteração de atributos químicos do horizonte superficial de um latossolo e um podzólico com a calagem. **Scientia agricola**, Piracicaba, v.54, n.1/2, p.1-8, jan./aug. 1997.
- FARIA, L.C. **Fertilização de povoamentos de eucalipto com o biossólido da ETE de Barueri, SP: demanda potencial e nível mínimo de resposta**. 2000. 85p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- FJÄLLBORG, B.; HLBERG, G.; ILSSON, E. DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Carnforth, v.31, n.1, p.25-31, 2005.
- GOBATTO, G. **O biossólido como insumo agrícola: subsídios para formação de preço - o estudo de caso da ETE Franca**. 2003, 100p. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) - Centro Universitário de Franca – Administração, Franca, 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) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- JAMAL, M.S.; SAMMIS, T.W.; MEXAL, J.G.; PICCHIONI, G.A.; ZACHRITZ, W.H A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production. **Agricultural Water Management**, Fresno, v.56, n.1/2, p.57-79, jul.2002.

LI, G.; YIN, C.; LIN, Y.; LI, Z. Artificial improvement of soil fertility in a regraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge. **The journal of applied ecology**, Liaoning, v.13, n.2, p.159-162, 2002.

MOLINA-VELASCO, M. **Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólido**, 2004. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

TSUTIYA M., T. Limites de metais pesados em biossólidos para uso agrícola proposta para a regulamentação federal e estadual. In: ENCONTRO TÉCNICO, 17., 2006. São Paulo p. 22, 2006.

REZENDE, C. I. O. **Influência da aplicação do lodo de esgoto (biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do sub-bosque, na serapilheira e no solo de um talhão de *Eucalyptus grandis***, 2005. 80p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SELIVANOVSKAYA, S.Y.; LATYPOVA, V.Z.; ARTAMONOVA, L.A Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v.38, n.8, p.1549-1556, 2003

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed., Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100).

VIEIRA R.F.; SILVA C. M. M. S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. **Brazilian Journal of Microbiology**. São Paulo, v.34, p. 340, 2003.

REFERÊNCIAS

ABREU JUNIOR, C.H.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.391-479, 2005.

ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; MADER NETTO, O.S. Desidratação de lodo aeróbio e séptico através de uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem uso de polieletrólitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21. **Anais...** João Pessoa, 2001 1 CD-ROM

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Técnicas e amostragens e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus spp.* In: GONÇALVES, J. L. M e BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.106-136.

CAMARGO, O.A. de, CASTRO, O.M. de, VIEIRA, S.R; QUAGGIO, A.. Alteração de atributos químicos do horizonte superficial de um latossolo e um podzólico com a calagem. **Scientia agricola**, Piracicaba, v.54, n.1/2, p.1-8, jan./aug. 1997.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.19-24, 1999.

CHRISTIE, P.; EASSON, D.L.; PICTON, J.R.; LOVE, S.C.P. Agronomic value of alkaline-stabilized sewage biosolids for spring barley. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, n.1, p.144-151, 2001.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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

FARIA, L.C. **Fertilização de povoamentos de eucalipto com o biossólido da ETE de Barueri, SP: demanda potencial e nível mínimo de resposta**, 2000. 85p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FJÄLLBORG, B.; HLBERG, G.; ILSSON, E. DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Carnforth, v.31, n.1, p.25-31, 2005.

FORSTER, L.J. LOGAN, R.H. MILLER WHITE, R.K., State of the art in municipal sewage sludge landspreading. In: R.C. Loehr, (Ed.), **Land as a waste management alternative**. **Ann Arbor: Arbor Science Publishers**, , 1977, p. 603-618.

GATTO, A.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M.; NEVES, J.C.L. Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa v.27, n.5, p.635-46, 2003.

GOBATTO, G. **O biossólido como insumo agrícola: subsídios para formação de preço - o estudo de caso da ETE Franca**. 2003, 100p. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) - Centro Universitário de Franca – Administração, Franca, 2003.

GOLLEY, F.B.; MCGINNIS, J.T.; CLEMENTS, R.G.; CHILD, G.I.; DUEVER, M.J. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida**. São Paulo: EPU/EDUSP, 1978. 256p.

GONÇALVES, J. L. M; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.

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

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

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

HARRISON, R. B.; GUERRINI, I. A.; HENRY, C. L.; COLE, D. W. Reciclagem de resíduos industriais e urbanos em áreas de reflorestamento. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n.198, p.1-21, 2003 .

HARRISON, R.B.; 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**, Madison, v.66, p.165-177, 1994.

HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HINCKLEY, T.M.; HARRISON, R.B. The use of municipal and pulp paper sludge to increase production in forestry. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v.1, n.3, p.41-45, 1993.

HENRY, C. L.; COLE, D. W. Use of biosolids in the forest: Technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, New York, v.13, n.4/5, p.269-277, 1997.

HOBBIE, S.E.; VITOUSEK, P.M. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests, **Ecology**, Washington, v.81, n.7, p.1867-1877. jul.2000.

JAMAL, M.S.; SAMMIS, T.W.; MEXAL, J.G.; PICCHIONI, G.A.; ZACHRITZ, W.H A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production. **Agricultural Water Management**, Fresno, v.56, n.1/2, p.57-79, jul.2002.

KIMBERLEY, M.O.A; WANG, H.A; WILKS, P.J.B; FISHER, C.R.B; 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.

LI, G.; YIN, C.; LIN, Y.; LI, Z. Artificial improvement of soil fertility in a regraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge. **The journal of applied ecology**, Liaoning, v.13, n.2, p.159-162, 2002.

LUDUVICE M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: Princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MCNAB, W.H.; BERY, C. R. Distribution of aboveground in three pine species planted on a devastated site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. **Forest Science**, Bethesda, v.31, n.2, p.373-382, 1985.

MIKI, K.M.; SAMPAIO, A.O.; ALEM SOBRINHO, P. Benefícios técnicos e econômicos referentes à substituição, por polímeros, do método tradicional de condicionamento químico para desaguamento de lodo ETE em filtro prensa de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21, 2001. João Pessoa, **Proceedings...**São Paulo, POLITECNICA, 2001 1 CD-ROM.

MILARE, G.; TRIVELIN, P. C. O.; LACLAU, J. P. Volatilização do nitrogênio de biossólidos aplicados em plantios de *Eucalyptus grandis*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 13., 2005, Piracicaba. **Resumos...** meio digital São Paulo: USP, 2005. 1 CD-ROM.

MOLINA-VELASCO, M. **Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólido**. Piracicaba, 2004. 65p. Dissertação (Mestrado Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

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

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

NEVES, E. J. M.; MARTINS, E. G.; REISSMANN, C. B. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n.43, p.47-60, 2001.

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

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* implicações silviculturais**, 1985. 211p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2003. 93p . (Relatório Técnico-Científico, 12).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2004. 69 p . (Relatório Técnico-Científico, 18).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2005. 68p . (Relatório Técnico-Científico, 36).

POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2006. 70p. (Relatório Técnico-Científico, 42).

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M. Biossólido aumenta produtividade de eucaliptos. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, p.105-107, dez. 2005.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. (Ed). Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species. In: JOINT AUSTRALIAN/JAPANESE WORKSHOP HELD IN AUSTRALIA, 1995. Melbourne, **Proceedings ...**, JONT, 1995. p.100-109.

PRITCHETT, W. **Properties and management of forest soils**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1979. p.494.

REZENDE, C. I. O. **Influência da aplicação do lodo de esgoto (biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do sub-bosque, na serapilheira e no solo de um talhão de *Eucalyptus grandis***, 2005. 80p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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

SEWELL, G.H. **Administração e controle da qualidade ambiental**. São Paulo: Editora Pedagógica Universitária, 1978. 295p.

SELIVANOVSKAYA, S.Y.; LATYPOVA, V.Z.; ARTAMONOVA, L.A Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v.38, n.8, p.1549-1556, 2003

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

SOARES, C. R. F. S. **Toxidez de Zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**, 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em - Agronomia -Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

SOUZA VAZ, L.; GONÇALVES, J.L.M.: Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: II. Efeitos na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.9, p.179-198.

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

TSADILAS, C.D.; MATSI, T.; BARBAYANNIS, N.; DIOMOYANNIS, D. Influence of sewage sludge application on soilproperties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. **Communication Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n.15/16, p.2603-2619, 1995.

TSUTYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.

TSUTIYA M.,T. Limites de metais pesados em biossólidos para uso agrícola proposta para a regulamentação federal e estadual. In: ENCONTRO TÉCNICO, 17.,2006. São Paulo p. 22, 2006.

VAN RAIJ,B.; CANTARELLA,H.; QUAGGIO,J.A.; FURLANI,A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed., Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100)

VIEIRA R.F.; SILVA C. M. M. S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo,v.34, 340 p, 2003.