

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

Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica

Luiz Carlos de Faria

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

**Piracicaba
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Luiz Carlos de Faria
Engenheiro Florestal

Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ CARLOS E. RODRIGUEZ**

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

Piracicaba
2007

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

Faria, Luiz Carlos de

Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica / Luiz Carlos de Faria. - - Piracicaba, 2007.
105 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Biossólidos 2. Crescimento vegetal - Análise 3. Eucalipto - Viabilidade econômica 4. Fertilizante orgânico 5. Florestas 6. Lodo de esgoto 7. Madeira - Produção 8. Modelos não lineares I. Título

CDD 634.9734

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

Á Sandra, Tayná e Sofia, minha querida esposa e lindas filhas

AGRADECIMENTOS

Acredito ser impossível citar os nomes de todos que merecem agradecimento por esse trabalho ora apresentado, por isso os que colaboraram e não têm os nomes abaixo, me desculpe.

Ao Prof. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez, pela amizade e profícua orientação e por fazer jus ao ditado “muito ajuda quem não atrapalha”.

À Esalq/USP, por me proporcionar os materiais e meios para concretização desse trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa.

À todos que pagam impostos, sem os quais as duas anteriores não existiriam.

À SABESP, pelo apoio à realização do trabalho, em especial ao Eng. Sacamoto pelas informações disponibilizadas.

À Fernando Carvalho, da ETE de Jundiaí, pelas informações imprescindíveis ao trabalho.

Aos amigos, Ana Schilling, Marcelino, Pérsio, Sem Rumo, Zé Mauro, Thiago, Jefersom, Abílio (Airbag), Rubens, Tora, Vanderlei Benedetti e Rildo cuja amizade, espero, seja eterna.

Aos professores Fábio Paggiani, Leonardo, Marcos Milan, Demóstenes, Fernando, Thadeu, João Batista e Stape pelas críticas, sugestões e amizade.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
Referências	11
2 GERAÇÃO E GESTÃO DE BIOSSÓLIDOS	13
Resumo	13
Abstract.....	13
2.1 Introdução.....	14
2.2 Tratamento de esgoto e geração de biossólido	15
2.3 Gestão de resíduos nas ETEs.....	17
2.4 Principais alternativas para destinação do biossólido.....	19
2.4.1 Aterros sanitários.....	19
2.4.2 Incineração	21
2.4.3 Uso agro-florestal	22
2.5 Restrições ao uso agro-florestal do biossólido	27
Referências	32
3 DEMANDA POTENCIAL POR BIOSSÓLIDO PRODUZIDO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO QUANDO USADO COMO FERTILIZANTE EM PLANTIOS DE EUCALIPTOS.....	37
Resumo	37
Abstract.....	37
3.1 Introdução.....	38
3.2 Materiais e Métodos	41
3.2.1 Quantificação das áreas total e anualmente disponíveis com eucaliptos.....	41
3.3 Resultados e discussão	43
3.4 Conclusões.....	50
Referências	51
4 PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DO <i>Eucalyptus grandis</i> FERTILIZADOS COM BIOSSÓLIDO	54

Resumo	54
Abstract.....	54
4.1 Introdução.....	55
4.2 Materiais e Métodos	56
4.3 Resultados e discussão	59
4.4 Conclusões.....	63
Referências	63
5 CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO DE <i>Eucalyptus grandis</i> FERTILIZADOS COM BIOSSÓLIDO	67
Resumo	67
Abstract.....	67
5.1 Introdução.....	68
5.2 Materiais e Métodos	70
5.2.1 Caracterização do experimento	70
5.2.2 Análise do Crescimento.....	72
5.3 Resultados e Discussão.....	74
5.4 Conclusões.....	82
Referências	82
6 VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE BIOSÓLIDO COMO FERTILIZANTE EM EUCALIPTOS.....	86
Resumo	86
Abstract.....	86
6.1 Introdução.....	87
6.2 Materiais e Métodos	91
6.3 Resultados e Discussão.....	93
6.3.1 Custos de utilização do biossólido em florestas de eucaliptos	93
6.3.2 Análise econômica.....	99
6.4 Conclusões.....	102
Referências	103

RESUMO

Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica

O presente trabalho avaliou o uso do lodo residual (biossólido) produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) como fertilizante em florestas de eucaliptos. Os aspectos estudados foram demanda potencial, resposta à fertilização em termos de produção madeireira, crescimento das árvores e viabilidade econômica. Foi verificada uma elevada demanda potencial pelo biossólido em povoamentos de eucaliptos localizados a curtas distâncias de transporte rodoviário no entorno da RMSP. Verificou-se também que o biossólido, complementado com P e K minerais no plantio, acelerou o ritmo de crescimento das árvores, aumentou o nível de produção madeireira e reduziu o ciclo de produção de *Eucalyptus grandis* em proporções semelhantes às observadas para a fertilização mineral convencional. Na avaliação aos 99 meses de idade, foi verificado que a maior dose de biossólido (40 Mg ha^{-1}) não resultou na maior produção de madeira. Se considerada a diferença estatística entre as curvas de crescimento, os modelos testados podem ser divididos em apenas dois grupos: (i) testemunha e dose de 10 Mg ha^{-1} ; e (ii) demais tratamentos. A análise econômica (valor presente líquido anualizado e a taxa de juros de 12% ao ano) recomenda a dose de 5 Mg ha^{-1} , com complementação com K mineral no plantio, se utilizado como critério de definição de corte a escolha da idade que maximiza o incremento médio anual em cada tratamento. Para as condições do trabalho concluiu-se que o biossólido não substitui totalmente a fertilização mineral convencional. Economicamente, confirmou-se a expectativa de que elevadas taxas de aplicação do biossólido são inviáveis, devido principalmente à alta umidade natural desse material que encarece significativamente o transporte.

Palavras-chave: Biossólido; Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; *Eucalyptus* spp, Demanda potencial; Avaliação econômica; Produção de madeira; Análise do crescimento; Modelos não-lineares; Fertilizante orgânico; Potencial de uso

ABSTRACT

Use of sewage sludge (biosolids) as a fertilizer in eucalypts forest plantations: potential demand, production and growth of the trees and economic viability

This work evaluates the use of the residual sludge (biosolids) produced by sewage treatment units located in the Metropolitan Region of the City of São Paulo (MRSP) as a fertilizer in *Eucalyptus grandis* forest plantations. The aspects studied were potential demand, wood production response to the fertilization, trees growth and economic viability. A high level of potential demand was observed for the biosolids on forest eucalyptus plantations located at short ground transportation distances in the MRSP. It was also observed that biosolids, complemented by phosphorous and potassium at the planting stage, increased the growth rate of the trees, resulted in more wood output and reduced the rotation age at levels similar to those observed for conventional mineral fertilization. When evaluated 99 months after planting, it was observed that the highest dosage of biosolids did not result on the highest wood production output. The adjusted models can be separated in only two groups according to the statistical differences among them: (i) control and dosage 10 Mg ha⁻¹; and (ii) all other treatments. The economic analysis (annualized net present value at 12% return rate) recommended dosage 5 Mg ha⁻¹ complemented with K, for rotation lengths defined by the age that maximizes mean annual increment. The use of biosolids does not substitute totally the use of mineral fertilizers. Economically, it was confirmed that the highest biosolid dosages were not viable, due mainly to its high levels of water content and consequently high transportation cost.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Eucalypts stands; *Eucalyptus* spp, Potential demand; Economic evaluation; Wood production; Analysis of the growth; Nonlinear models; Organic fertilizer

1 INTRODUÇÃO

O aumento na coleta e tratamento de **esgotos sanitários**¹ no Brasil, associado ao aumento populacional, tem elevado de forma preocupante a geração de um resíduo produzido em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), genericamente denominado de lodo de esgoto. Devido às grandes quantidades produzidas, e à sua elevada umidade natural, sua retirada dos pátios das ETEs e destinação em aterros sanitários, destino mais comum, resulta em elevados custos aos órgãos públicos. O problema é agravado pela redução da vida útil dos atuais aterros sanitários e pela dificuldade em se encontrar áreas próximas aos centros urbanos, adequadas à implantação de novos aterros. Recentemente, têm se intensificado os esforços no sentido de desenvolver tecnologias e estratégias de reuso capazes de tirar proveito do conteúdo de nutrientes ou da energia contida nesse material, em particular na transformação de um resíduo problemático em um produto útil. Quando possível, a sua denominação mais utilizada passa de **lodo de esgoto** para **biossólido**.

Por se tratar de um material predominantemente orgânico e com teores razoáveis de nutrientes para as plantas, o biossólido tem sido utilizado em diversos países como fertilizante orgânico e condicionador de solos para culturas florestais como pinus e álamo (HENRY; COLE 1997; KAYS et al., 2000; KIMBERLEYA et al., 2004). No Brasil, culturas como pupunha, banana, milho, café, cana-de-açúcar e eucaliptos têm sido avaliadas como potenciais candidatas ao uso do biossólido (CHIBA, 2005; SILVÉRIO, 2004; SOARES et al., 2002). Os resultados das pesquisas têm indicado que quando a prática é realizada de forma adequada verificam-se ganhos de produtividades nas culturas e observam-se efeitos adversos dentro de limites tecnicamente aceitáveis. A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) vem estudando diversas alternativas à disposição do biossólido produzido em suas ETEs na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em aterros sanitários (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO; 1996, 2005, KARABOLAD; FERRETTI; PEREIRA, 1998; TSUTYA, 2000). Uma proposta promissora é seu uso como fertilizante orgânico e condicionador de solos em florestas de eucaliptos. Para avaliar essa alternativa foi firmado um convênio entre a SABESP, o Instituto de Pesquisas Florestas (IPEF) e o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. O presente trabalho é parte desse projeto multi-disciplinar

¹ Despejo líquido constituído de esgotos predominantemente domésticos, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária (BRASIL, 2006).

que avaliou vários aspectos da aplicação do bio sólido em povoamentos de eucaliptos. Dentre os trabalhos que contribuíram para essas avaliações destacam-se os publicados por Andrade (2004), Barreiros (2005), Faria (2000), Fortes Neto (2000), Guedes (2005), Martins (2002), Rezende (2005), Rocha (2002) e Vaz (2000), dentre outros.

Este trabalho trata do uso de bio sólido como insumo na produção de florestas de eucaliptos, baseando-se em um estudo de caso envolvendo as ETEs da RMSP, os povoamentos de eucaliptos no seu entorno (dentro do Estado de São Paulo) e um experimento com o uso de bio sólido em *Eucalyptus grandis*. O trabalho foi subdividido em diferentes capítulos, como descrito a seguir.

No **segundo capítulo** é realizada uma revisão das principais questões relacionadas à problemática do tratamento de esgoto e da geração e gestão do resíduo resultante desse processo. Ênfase é dada ao uso do bio sólido como fertilizante florestal, suas potencialidades e restrições.

O **terceiro capítulo** avalia uma questão básica da utilização do bio sólido em eucaliptos como alternativa à sua disposição em aterros sanitários, qual seja se haveria demanda para esse tipo de bio sólido em florestas de eucalipto dentro da RMSP.

O aumento de produção de madeira devido ao uso de bio sólido foi comprovado em diversos países. Para espécies de eucaliptos em condições edafo-climáticas brasileiras, entretanto, as informações ainda são escassas e não permitem recomendações seguras quanto a taxas de aplicação e estratégias de uso. O **quarto capítulo** procura amenizar esse problema e aproveita-se da colheita de um experimento de campo que permitiu avaliar com precisão a resposta volumétrica e o efeito na conformação do perfil de fuste das árvores de eucalipto para diferentes taxas de aplicação do bio sólido.

O **quinto capítulo** avalia o efeito do bio sólido sobre o crescimento das árvores de eucalipto ao longo do seu ciclo de produção. Assim torna-se possível propor estratégias de condução das rotações mais adequadas do que as baseadas em análises pontuais que tomam como referência uma única idade.

Por fim, o **sexto capítulo** determina os principais custos e receitas associados com o uso do bio sólido como fertilizante em florestas de eucaliptos. A partir desses custos e receitas, foi possível avaliar para quais condições de uso a proposta se torna economicamente viável, em termos das taxas de aplicação e das distâncias de transporte. O critério econômico utilizado durante a análise foi o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA).

Referências

- ANDRADE, C.A. **Fração orgânica de biossólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com eucalipto**. 2004. 121p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- BARREIROS, R. M. **Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado**. 2005. 111p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- CHIBA, M.K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. 143p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano diretor de uso e disposição dos lodos das ETEs da RMSP - Aterro Exclusivo**. 2005. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/a_sabesp/tecnologia/apresentacao/plano_diretor_aterro_exclusivo.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2006.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do lodo das ETEs da RMSP**. São Paulo: SABESP, 1996. 120p. (Relatório Técnico)
- FARIA, L. C. de **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 Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- FORTES NETO, P. **Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas**. 2000. 113p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – 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. 168p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- HENRY, C.L.; COLE, D.W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, n. 45, p. 269-217, 1997.
- KARABOLAD, J.C.; FERRETTI, M.R.J.; PEREIRA, M. de B. et al. Aterro Exclusivo para Lodo/Biossólido de ETEs: Alternativa para Disposição Final. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p. 137-143.

KAYS, J.S.; FLAMINO, E.J., FELTON, G.; FLAMINO, P.D. Use of deep-row biosolids applications to grow forest trees: a case study. In: HENRY, C.L.; HARRISON, R.B.; BASTIAN, R.K. **The forest alternative: principles and practice of residuals use**. Seattle, WA: University of Washington College of Forest Resources, 2000. chap.1, p.105-110. Disponível em: <http://www.naturalresources.umd.edu/Pages/Biosolids_Paper_1.html>. Acesso em: 13 out. 2005.

KIMBERLEYA, M.O., WANG, H., WILKSB, P.J., FISHERB, C.R., MAGESANA, G.N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.189, p. 345-351, 2004.

MARTINS, L. F. da S. **Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de bio sólido**. Piracicaba, 2002. 73p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

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

SILVÉRIO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto, da matéria orgânica do lixo urbano e de resíduos industriais. **O Agrônomo**, Campinas, v. 1, n. 56, p. 5-8, 2004.

SOARES, M.T.S.; GONÇALVES, J.L.M.; ALVAREZ, L.; MELFI, A.J.; TEIXEIRA, C. M.; FEIGL, B.J. Uso de bio sólido em povoamentos de eucalipto em solos degradados e não degradados: transferência de nitrogênio. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2002, Belo Horizontes. **Anais...** Belo Horizonte : SOBRADE, 2002. p. 221-223.

TSUTYA, M.T. Alternativas de disposição final de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-105.

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

2 GERAÇÃO E GESTÃO DE BIOSSÓLIDOS

Resumo

O tratamento de esgoto doméstico gera um resíduo predominantemente orgânico, conhecido como lodo de esgoto ou biossólido, cujo destino final mais comum no Brasil é a sua deposição em aterros sanitários. A quantidade e características físico-químicas e biológicas do biossólido dependem, principalmente, da origem do esgoto tratado e do tipo de tratamento utilizado. Devido aos altos volumes gerados e à elevada umidade natural, somente a destinação final do biossólido normalmente representa mais da metade do custo operacional de todo o tratamento. Diversas alternativas vêm sendo propostas para a destinação do biossólido, dentre as quais a sua re-utilização como fertilizante orgânico e condicionador de solos, apontada como a mais promissora para as condições brasileiras. Devido ao risco representado pelos contaminantes que podem ser encontrados no biossólido (substâncias orgânicas e inorgânicas potencialmente tóxicas e agentes patogênicos) a sua utilização agro-florestal é disciplinada por normas governamentais como, no caso brasileiro, a Resolução do CONAMA N° 375 de 29 de Agosto de 2006. A maioria dos pesquisadores concorda que as culturas florestais são mais adequadas ao uso do biossólido do que as culturas agrícolas anuais, em termos de segurança alimentar e ambiental. Em diferentes países as pesquisas têm comprovado o aumento da produção das árvores e a melhoria das qualidades edáficas dos sítios de aplicação. Em condições brasileiras as informações ainda são escassas e não permitem uma conclusão definitiva sobre o tema, principalmente quanto à viabilidade econômica dessa alternativa como destinação final para o biossólido.

Palavras-chave: Biossólido; Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; Estação de Tratamento de Esgoto; Gestão de Resíduos; Potencial de uso

Abstract

Waste management is one of the major challenges of modern cities, including the problem of handling the residue produced by domestic sewage treatment in Wastewater Treatment Plants (WTPs). In Brazil, most of the biosolids produced in WTPs has landfills as its final destination. However, due to its predominantly organic composition, a reasonably high level of plant nutrients content can be found in this type of waste. That is why several countries have already tried the use of biosolids as organic fertilizers and soil conditioners in forestation. In addition to nutrients for plants, the high content of organic matter in the biosolid is high and can significantly and positively alter the quality of the soil structure as demonstrated by several authors. The recommended amount and characteristics of the biosolids depend, mainly, on the origin of the sewer treated and the type of treatment used. Due to the large volumes produced and to its high level of humidity, the final disposal of the biosolids normally represents more than half of the total costs observed during the treatment. Many alternatives have been proposed to dispose biosolids. Among them, its re-utilization as an organic fertilizer and soil conditioner have been pointed as the most promising under Brazilian conditions. The existence of organic and inorganic toxic substances and the possibility of becoming a vector for pathogenic agents when used in

agro-forest systems has been disciplined by norms, like the Brazilian CONAMA resolution n° 375 published in August 29, 2006. Most of the scientists agree that its use in forest plantations is more appropriate, considering alimentary and environmental security, than the other alternative when used in agricultural annual crops. Research in different countries has found that the use of biosolids increases production in forest plantations, and that the magnitude of this increase depends on the species involved, on the characteristics of the waste and on local environmental conditions. This subject has so far been little studied under Brazilian conditions, but preliminary results indicate gains as well in trees productivity, with adverse effects restricted to technically acceptable limits.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Wastewater Treatment Plants; Eucalypts stands; Waste management

2.1 Introdução

O tratamento de esgoto é uma importante medida de saneamento básico. Ela não só melhora as condições de vida das populações diretamente atendidas, mas também ameniza a degradação ambiental, visto que no Brasil o lançamento de esgoto bruto é a principal fonte de depreciação dos recursos hídricos. Embora as diferentes formas de tratamento já sejam bem definidas e continuem sendo aperfeiçoadas regularmente, o mesmo não se pode dizer para o destino do resíduo gerado. Sua destinação atual mais comum no Brasil é a deposição em aterros sanitários. Entretanto, o seu alto custo, associado à diminuição da vida útil dos atuais aterros e a dificuldade em se encontrar novos locais apropriados, tem intensificado os estudos para se encontrar alternativas viáveis para essa prática. Dentre as propostas, a sua re-utilização como fertilizante para a produção vegetal tem sido apontada como promissora para as condições brasileiras, sendo consenso que as culturas florestais são as mais adequadas para esse fim do que as agrícolas. Embora bem estudada em países como EUA e Suécia, no Brasil o uso agro-florestal do biossólido ainda carece de informações básicas, como taxas de aplicação adequadas para as diferentes culturas, demanda e aceitação dos produtores e possíveis problemas ambientais, dentre outras.

Por isso o objetivo deste estudo é o de revisar os principais aspectos relacionados à destinação do resíduo orgânico produzido nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), apresentando as principais alternativas, suas potencialidades e limitações, em especial a sua re-utilização como insumo para a produção vegetal.

2.2 Tratamento de esgoto e geração de biossólido

O lançamento de esgoto doméstico direto nos cursos de água é atualmente uma das principais fontes de contaminação e degradação dos recursos hídricos (ALÉM SOBRINHO, 2001). Para minimizar o problema o seu tratamento é realizado de forma a atender a padrões mínimos de qualidade estabelecidos pelos agentes públicos de controle ambiental. O tratamento consiste, simplificado, na remoção da matéria orgânica e inorgânica em suspensão e dissolvida no esgoto. O tratamento resulta, entretanto, na produção de um resíduo denominado lodo de esgoto, ou biossólido, que é um dos principais problemas operacionais nas ETEs. Todavia, Guedes (2005) lembra oportunamente que o aumento da geração de biossólido nas últimas décadas indica que o tratamento do esgoto também vem aumentando e por isso pode ser considerado como um sinal positivo.

A produção de esgoto doméstico no Brasil situa-se entre 80 a 200 L hab⁻¹ dia⁻¹ sendo que, de modo geral, cada habitante produz cerca de 150 g dia⁻¹ de lodo centrifugado (ALÉM SOBRINHO, 2001). O esgoto sanitário pode ser subdividido em parte líquida e parte sólida. A parte líquida refere-se à água e representa cerca de 99,9% do seu volume, apesar dos sistemas de coleta do esgoto sanitário e das águas pluviais serem totalmente independentes (ALÉM SOBRINHO, 2001). Segundo o autor, a maior parte dessa água é oriunda das descargas indevidas e das infiltrações na rede de coleta, que podem variar de 0,05 a 1,00 L s⁻¹ km⁻¹, dependendo da idade da rede e da profundidade do lençol freático. A parte sólida do esgoto sanitário é composta por matéria orgânica e inorgânica em suspensão e dissolvida (em estado coloidal e suspensão) e por microorganismos. Ela representa menos de 0,1% do volume original a ser tratado (Quadro 2.1).

A principal finalidade do tratamento da fase sólida é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes. As etapas do tratamento da fase sólida são: **condicionamento**, **desaguamento** (ou desidratação), **estabilização** e **higienização** (ALÉM SOBRINHO, 2001; MIKI; ANDRIGUETI; ALEM SOBRINHO, 2001). Para esses autores somente o tratamento e disposição da fase sólida é responsável por aproximadamente 40% dos custos de implantação e 50% dos custos operacionais das ETEs. Miki; Andrigueti e Alem Sobrinho (2001) lembram ainda que essas

proporções foram estimadas para o ano de 1980, quando os requisitos de controle, de monitoramento e de qualidade do resíduo não eram tão restritivos quanto atualmente.

COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS	DESTINO FINAL
Material gradeado	Material retido no tratamento preliminar por gradeamento. Sua remoção evita danos nos equipamentos mecânicos de bombeamento e remoção de lodo.	Aterro sanitário
Areia	Material abrasivo removido para evitar o desgaste dos equipamentos mecânicos e seu acúmulo nos recipientes de tratamento, diminuindo sua capacidade.	Aterro sanitário
Escuma	Composto de materiais flutuantes (graxas, plásticos, papel, resíduos de alimentos etc). É retirado por raspagem de decantadores primários ou secundários.	Aterro sanitários ou encaminhado para outros métodos de tratamento.
Lodo de esgoto	É o resíduo predominantemente orgânico gerado antes de tratamentos como estabilização, de higienização ou de redução de umidade. Não é possível seu uso benéfico ¹ .	Diversos, normalmente aterro sanitário ou exclusivo.
Biossólido	Material resultante de processos como adensamento, estabilização, desaguamento, higienização ou secagem térmica do lodo de esgoto. O lodo com taxas de contaminantes que não permitam sua utilização de forma benéfica não são considerados biossólidos, mesmo passando por algum desses processos.	Uso benéfico. Em muitos países predominantemente com fertilizante ou condicionador de solos.

Fonte: Adaptado de Miki; Andriqueti e Alem Sobrinho (2001)

¹ Quando o uso não causa dano ou ameaça à saúde, ao bem estar e à segurança pública ou ao meio ambiente de acordo com normas legais e que permita reaproveitar, de alguma forma, seu conteúdo de nutrientes ou energético.

Quadro 2.1 - Principais características dos componentes da fase sólida do tratamento de esgotos sanitário

Diversos sistemas de tratamento de esgoto sanitário foram desenvolvidos para a remoção da sua carga poluidora. A decisão por um ou outro sistema depende, principalmente, das características químicas, físicas e biológicas do efluente a tratar, dos padrões mínimos de qualidade a serem mantidos no afluente e no corpo de água receptor e da disponibilidade de recursos financeiros e materiais locais (ALÉM SOBRINHO, 2001).

A redução da umidade excessiva do biossólido é uma etapa importante no manejo desse resíduo. Segundo Andreoli et al. (2001), as principais razões para realizar essa operação são as: redução do custo de transporte para o local de disposição final; melhoria nas suas condições de manejo; aumento do poder calorífico, com vistas à preparação para incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura e diminuição da produção de lixiviados, quando da sua disposição em aterros sanitários. A desidratação ou desaguamento pode ser realizada por diversos processos, dentre os quais: injeção de ar, filtros a vácuo e filtros

prensas (ESTADOS UNIDOS, 1999). A efetividade dessa operação varia com o tipo de biossólido e com o processo utilizado. Para Ferreira e Nishiyamai (2003) a seleção do processo de desidratação depende do tipo de biossólido, da área disponível nas ETEs, do destino posterior e das condições econômicas. O teor de umidade no biossólido depende do tipo de estabilização e desaguamento utilizados (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Teor de sólidos no resíduo do tratamento de esgoto de acordo com o tipo de estabilização e equipamento utilizado para o deságüe (secagem)

Tipo de estabilização	Equipamento de desaguamento	Teor de sólidos no resíduo (%)
Digestão anaeróbia	Filtro prensa de placas	30 a 40
	Filtro prensa de esteiras	16 a 25
	Centrífugas	25 a 30
	Leitos de secagem	20 a 30
Digestão aeróbia	Filtro prensa de placas	25 a 35
	Filtro prensa de esteiras	13 a 18
	Centrífugas	20 a 25
	Leitos de secagem	25 a 30

Fonte: adaptado de Alem Sobrinho (2001)

A quantidade e características do resíduo gerado nas ETEs depende basicamente da composição do esgotos coletados, do tipo de tratamento utilizado e do tipo de condicionamento para desidratação empregado (cloreto férrico e cal ou polímeros). Alguns tratamentos reduzem sua massa (ex. digestão) enquanto outros aumentam (adição de cal para controle de patógenos). Assim, no resíduo podem ser encontrados também produtos químicos utilizados no próprio tratamento, como cloreto férrico, sulfato de alumínio, cal, polímeros etc. Mesmo na mesma ETE, sob o mesmo tratamento as características do resíduo podem variar anualmente, sazonalmente, ou mesmo diariamente, devido à variação no esgoto coletado e no processo de tratamento (ESTADOS UNIDOS, 1999). O autor afirma ainda que quanto maior o grau do tratamento tanto maior será a quantidade de resíduo produzida e menor a concentração de contaminantes no efluente produzido.

2.3 Gestão de resíduos nas ETEs

A destinação final de resíduo das ETEs é atualmente um dos principais problemas enfrentados pelos seus gestores. Somente sua disposição final pode representar mais de 50% do

custo operacional total de tratamento e, quando não realizada de forma adequada, pode anular os benefícios da coleta e tratamento dos esgotos, tornando-se um novo problema ambiental (ALEM SOBRINHO, 2001; SILVÉRIO, 2004). Para os autores, a disposição do resíduo é tão ou mais complexa do que o tratamento propriamente dito. O manejo de resíduos adotado atualmente pela maioria das ETEs no Brasil compreende sua estabilização e desaguamento para entre 15 a 20% de sólidos visando quase que exclusivamente sua retirada da área por caminhões, sem entretanto uma definição clara de sua destinação final (ALEM SOBRINHO, 2001). Segundo o autor, os destinos mais comuns incluem aterros sanitários ou exclusivos próximas as ETEs, lagoas de lodo ou mesmo de maneira não controlada em áreas agrícolas. Para Andreoli, et al. (1999), a adequada destinação do biossólido é um fator fundamental para que os objetivos do tratamento dos esgotos sejam plenamente alcançados.

Uma gestão sustentável deve reconhecer e entender por completo o modo como os resíduos são gerados e como eles podem ser reciclados ou reutilizados. Lundin et al. (2004) a define como aquela que é socialmente aceitável, economicamente viável e a que garante que substâncias potencialmente perigosas não são transferidas ao homem ou ao meio ambiente. Atualmente a redução da produção e o **reuso**¹ de resíduos são aceitas internacionalmente como os princípios básicos de qualquer sistema de gestão de resíduos, porque elas economizam recursos e reduzem o custo de disposição final (FUREDY, 1994). Com relação aos resíduos potencialmente perigosos, como o biossólido, por exemplo, a redução na fonte pode significar não somente sua redução em volume ou peso, mas também a redução de sua toxicidade devido a processos ou tratamentos posteriores (MacLAREN, 1994). Segundo a autora, o investimento em equipamentos para a redução na quantidade de resíduos produzidos (ou na sua toxicidade) normalmente é alto. Todavia, ele pode ser pago em um curto período de tempo se computado a economia no custo de disposição. Kidder (2003) lembra ainda que muitos dos materiais atualmente considerados resíduos são recursos que poderiam ser utilizados no processo produtivo, eles apenas estão no lugar ou forma inadequados. Para o autor, a principal e mais problemática etapa, na gestão de resíduos é a de encontrar um valor de uso para eles. Para Guedes (2005) a transformação de resíduo em produto, cuja utilização traga perspectivas de ganhos econômicos para os setores envolvidos, atualmente é uma estratégia mais efetiva para viabilizar a utilização benéfica do biossólido do que o simples convencimento pela questão ecológica e social. Entretanto, há um

¹ Prática de utilizar o resíduo sem modificá-lo significativamente (LUNDIN et al., 2004).

consenso entre os pesquisadores de que não existe solução universal para a problemática da gestão do bio-sólido, cada situação deve ser avaliada apropriadamente para a identificação dos pontos fortes e fracos de cada alternativa.

2.4 Principais alternativas para destinação do bio-sólido

Diversas alternativas têm sido adotadas e propostas para a disposição final do bio-sólido, muitas ainda em caráter experimental. A seguir são apresentadas as principais.

2.4.1 Aterros sanitários

A disposição em aterros sanitários é a forma de destino final mais comum para o bio-sólido das ETEs Brasileiras (BIDONE, 1998). Ela pode ser realizada de duas formas: (i) a disposição conjunta com os resíduos sólidos urbanos, genericamente denominados de lixo; e (ii) a disposição em aterros construídos exclusivamente para esse fim. Na maior ETE da América Latina, a da SABESP em Barueri, SP, a co-disposição com lixo urbano em um aterro sanitário localizado ao lado da Rodovia dos Bandeirantes é o destino final dado ao bio-sólido. Nesse caso a disposição só é permitida pela Prefeitura Municipal de São Paulo desde que o peso do bio-sólido não ultrapasse 5% do peso dos resíduos urbanos dispostos e a sua umidade não supere 60% (TSUTYA, 2000). O autor salienta que o grande inconveniente dessa prática é a diminuição da vida útil dos aterros destinados a deposição dos resíduos sólidos e que ela só é viável quando há a cooperação entre os responsáveis pela produção de bio-sólido e pela coleta e tratamento do resíduo sólido urbano. A construção e manutenção dos aterros, exclusivos ou não, é baseada em critérios específicos a fim de garantir o confinamento dos resíduos dispostos com o mínimo risco para o ambiente e para a saúde pública (BIDONE, 1998). Essa alternativa exige áreas relativamente próximas dos centros geradores, uma vez que o custo com o transporte é normalmente elevado. No Estado de São Paulo, Tsutya (2000) e Karabolad et al. (1998) justificam a construção de aterros exclusivos para: (i) disposição de bio-sólidos com características inadequadas para os usos que estiverem sendo praticados; (ii) para absorver o excedente da oferta; e (iii) para a disposição de cinzas de incineração que apresentarem altos níveis de contaminantes, caso esta solução venha a ser implementada. Os autores ressaltam,

ainda, que os aterros exclusivos são a garantia de destinação adequada do bio-sólido, independente de quaisquer fatores. Segundo Karabolad et al. (1998), a construção de aterros exclusivos, embora necessária, apresenta um custo bastante elevado que pode alcançar o valor de R\$ 244,00 por tonelada seca disposta. Nos EUA, Webb; Jokela e Smith (2000) apresentam um custo de U\$ 50,00, por tonelada seca, para a disposição de bio-sólido em aterros sanitários.

Os principais aspectos negativos da disposição de bio-sólidos em aterros sanitários são: a exalação de odor desagradável, quando o bio-sólido não for devidamente estabilizado, e a poluição visual, o que tem causado reclamações justificáveis das populações vizinhas aos aterros. Adicionalmente, a presença de resíduos orgânicos nos aterros causa uma série de preocupações aos operadores do sistema, gerando problemas como a produção de **chorume**² e abatimento de partes do aterro devido à decomposição da carga orgânica, tornando indesejável a presença desses resíduos.

Há uma tendência mundial no sentido de proibir a disposição do bio-sólido em aterros sanitários. A justificativa é que estudos recentes indicam ser possível o seu reuso em outras atividades, principalmente na produção vegetal. Isso por um lado reduziria a pressão por recursos extraídos da natureza, por exemplo, os fertilizantes minerais, por outro reduziria a necessidade da construção de novos aterros. Na Europa foi formulada diretiva adotada pelos países membros Comunidade Econômica Européia que obriga a coleta e tratamento de esgotos de todas as cidades com mais de 2000 habitantes (STENGER, 2000). Aliada ao potencial aumento na produção de bio-sólido, a diretiva ainda proibiu a partir do ano de 2002 o uso de aterros sanitários como destino final para resíduos com possibilidade de reciclagem. Nos EUA a disposição do bio-sólido em aterros sanitários vem sendo reduzida gradativamente devido aos elevados custos e a dificuldade em se encontrar áreas apropriadas a este fim. Em 1998 17% dos bio-sólidos eram dispostos em aterros sanitários, a projeção para 2010 é de que essa proporção represente apenas 10% (ESTADOS UNIDOS, 1999). Há uma expectativa de que essa tendência mundial de não permitir que resíduos com possibilidade de reuso sejam depositados em aterros venha a ser seguida também pelo Brasil.

² Líquido resultante da decomposição de resíduos orgânicos com alto potencial poluidor.

2.4.2 Incineração

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990), a incineração consiste no processo de oxidação à alta temperatura que destrói ou reduz o volume, podendo ainda recuperar materiais ou substâncias. Na incineração a massa inicial do bio-sólido é reduzida em até 5 vezes, restando apenas os sólidos fixos (KARABOLAD et al., 1998). Essa alternativa normalmente é empregada quando a contaminação do bio-sólido é muito alta ou quando há escassez de áreas adequadas à implementação de outras alternativas, como no Japão por exemplo (ENDO; NAGAYOSHI; SUZUKI, 1997). A incineração do bio-sólido, além de ser potencialmente poluidora da atmosfera, consome grande quantidade de energia e requer elevados investimentos em filtros para a retenção dos gases tóxicos produzidos (ESTADOS UNIDOS, 1999). Segundo o autor, durante a incineração do bio-sólido podem ser formados outros compostos como dioxinas e outras substâncias de combustão incompleta que necessitam de controle posterior. Todavia, Lundin et al. (2004) afirmam que quando planejada adequadamente a incineração emite pequena quantidade de poluentes na atmosfera, sendo a emissão de cádmio apontada como o impacto mais prejudicial aos humanos.

Lundin et al. (2004) afirmam que um dos aspectos favoráveis da incineração, ou co-incineração com resíduos urbanos, é possibilidade de reaproveitamento de componentes ou da energia contida no bio-sólido. Ela pode produzir calor e eletricidade em substituição a outras fontes energéticas, como óleo combustível ou gás natural. A energia produzida pode ainda ser utilizada no próprio processo, reduzindo assim o custo operacional da atividade. Segundo os autores, a receita proporcionada por esse aproveitamento de energia pode representar o equivalente a 11% dos custos operacionais totais dessa opção. Como principal desvantagem os autores apontam a perda dos nutrientes e da matéria orgânica, as quais poderiam ser utilizados na produção vegetal.

Diferentes técnicas vêm sendo estudadas para recuperar algumas substâncias úteis durante processo de incineração. Uma delas utiliza o ácido sulfúrico para dissolver o fósforo contido na matéria orgânica para sua posterior recuperação. O processo requer uma quantidade elevada de produtos químicos, entretanto não só o fósforo como também os metais pesados podem ser recuperados para posterior tratamento individual ou disposição em aterros para resíduos perigosos. O potencial dessa alternativa levou o governo sueco a estipular como meta, até o ano

de 2010, a recuperação de pelos menos 75% do fósforo contido no biossólido gerado naquele país (LUNDIN et al., 2004).

Weismantel (2001) afirma que é crescente a demanda por biossólido como fonte de combustível para incineração nos EUA. Para o autor, o problema é encontrar biossólido suficientemente seco e em quantidades que atendam a demanda, uma vez que a redução da umidade no biossólido é essencial para sua incineração.

2.4.3 Uso agro-florestal

Retornar ao solo, e respectivos ciclos naturais, os nutrientes e a matéria orgânica removida com a produção vegetal é a base conceitual da utilização do biossólido como fertilizante orgânico e condicionador de solos (CORRÊA; CORRÊA, 2003). Para os autores, a produção agrícola necessária para satisfazer o elevado consumo de alimentos e produtos nos centros urbanos resultou em uma grande transferência de nutrientes e matéria orgânica dos solos agrícolas para os resíduos urbanos. O retorno do biossólido para essas áreas seria importante não só para equilibrar parte desse ciclo, como também reduziria a pressão sobre as fontes naturais de nutrientes utilizadas na produção dos fertilizantes químicos. Para ter uma dimensão dessa redução, Frank (1998)³ apud Corrêa e Corrêa (2001) estimou que se a totalidade do biossólido produzido mundialmente fosse utilizada como fertilizante, seriam reduzidos cerca de 40% do consumo de fertilizantes químicos fosfatados. Quando considerados os conceitos de sustentabilidade e que o biossólido é composto por outros nutrientes que não o fósforo a questão se torna ainda mais relevante.

Os estudos têm demonstrado também que o biossólido estritamente urbano não leva ao acúmulo significativo de patógenos e metais no solo ou na parte aérea das plantas. O problema sanitário da aplicação do biossólido ao solo pode ser superado por meio do seu manejo adequado ou pelo emprego de processos que o higienizem e o estabilizem. Os processos de higienização/estabilização reduzem a quantidade de água do biossólido e alteram as concentrações de seus componentes (matéria orgânica, nutrientes etc). Entretanto, poucos estudos têm sido realizados sobre o efeito dos diferentes tipos de estabilização empregados para o

³ FRANK, R. The use of biosolids from wastewater treatment plants in agriculture. **Environmental Management**, Ipswich, v. 9, n. 4, p.165-169. 1998.

biossólido na produção vegetal. A higienização, além de ocasionar a diluição da matéria orgânica no biossólido, provoca a volatilização de parte do nitrogênio, carbono e enxofre presentes (CORRÊA; CORRÊA, 2001). Segundo os autores, a higienização acarreta a redução de cerca de 35% do volume inicial do biossólido pela diminuição da umidade, o que comercialmente é desejável porque reduz o custo de transporte. Quando o sistema de higienização do biossólido adotado é a calagem, o produto gerado pode elevar o pH do solo a níveis superiores a sete. Essa mudança pode ser prejudicial porque desequilibra a dinâmica dos nutrientes, causando prejuízo ao desenvolvimento da cultura e empobrecendo o solo (ANDREOLI, et al., 1999).

Quando manejado de forma adequada o uso do biossólido na produção vegetal é mais vantajoso do que fertilizantes químicos, pelas seguintes razões (ESTADOS UNIDOS, 2000; MUCHOVEJ; OBREZA, 2004):

- a) O biossólido é um produto reciclado, e por isso não esgota as fontes não renováveis de nutrientes, como o fósforo; pelo contrário, a pressão sobre as fontes é diminuída.
- b) Por estarem numa forma orgânica, os nutrientes do biossólido são menos solúveis do que os de fertilizantes químicos e por isso são liberados lentamente durante o ciclo produtivo das culturas, evitando-se assim desperdícios e lixiviação no solo.
- c) A matéria orgânica do biossólido melhora as propriedades químicas e físicas dos solos e dessa forma propicia melhor aproveitamento dos nutrientes, inclusive os aplicados via fertilizantes químicos.
- d) A aplicação do biossólido é regulada por normas dos órgãos públicos e por isso há um maior controle e monitoramento da aplicação do que os fertilizantes químicos e orgânicos usualmente utilizados de forma indiscriminada na agricultura e silvicultura.

No Estado de São Paulo, o biossólido vem sendo avaliado pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) como fertilizante para as culturas de pupunha (litoral norte), de banana (Vale do Ribeira) e de milho e café (Campinas) com resultados promissores em termos de aumento de produtividade e redução no uso de fertilizantes químicos (SILVÉRIO, 2004).

Chiba (2005) avaliou o uso do biossólido como fonte de nitrogênio e fósforo para a cultura da cana-de-açúcar, entre os anos de 2002 a 2004. O autor comprovou que o biossólido constituiu-se numa fonte eficiente de N para a cana-soqueira, não sendo necessária a aplicação

adicional de fertilizantes nitrogenados para a obtenção de produção de colmos e de açúcar similares ao do tratamento com adubação mineral convencional. Para a cana-planta, foi necessário aplicar 75% da dose de fósforo recomendada para obter rendimentos similares aos da adubação mineral. Conclui o autor que a aplicação de biossólido não causou efeitos prejudiciais a qualidade do solo e da matéria prima produzida e que os teores de metais pesados no solo, nas folhas e no caldo da cana foram semelhantes à adubação mineral.

Apesar de produzir um produto com excelentes qualidades para uso agrícola, a compostagem do biossólido com outros produtos orgânicos é normalmente um processo caro (CORRÊA; CORRÊA, 2001). Nos EUA, o custo total de compostagem situa-se entre 150 a 200 dólares por tonelada seca de biossólido consumido (DUNN, 2000). Ainda nos EUA, de acordo com um levantamento realizado por Goldstein e Block (1997), o custo de compostagem do biossólido variou de 12 a 540 dólares por tonelada de composto produzido, dependendo do método de compostagem e da escala de operação. Segundo os autores, o preço de venda do composto variou de 1 a 35 dólares por metro cúbico de composto. O autor afirma que a operação em maior escala resultaria em custos operacionais menores. Na cidade de Austin, Texas, são produzidas cerca de 50 toneladas secas por dia de biossólido. Desse total 55% é destinado a um processo de compostagem que resulta em um produto comercial orgânico vendido sem restrição como fertilizante e condicionador de solos (ESTADOS UNIDOS, 1999).

O uso do biossólido exclusivamente como condicionador de solos é normalmente realizado somente em áreas degradadas. A dificuldade em se remediar tais áreas está relacionada aos solos com problemas de retenção de água, baixos níveis de carbono, baixa disponibilidade de nutrientes, problemas de pH e poluentes (DUNN, 2000). Para o autor, o biossólido se presta a esse fim porque apresenta uma composição adequada de nutrientes e matéria orgânica, é produzido em grandes quantidades nos centros urbanos e, principalmente, porque há uma grande pressão para que esse material seja utilizado de forma benéfica. Além de nutriente para as plantas, o biossólido possui um teor significativo de matéria orgânica cujos efeitos positivos no solo têm sido comprovados por diversos autores. A matéria orgânica aumenta a atividade microbiana, melhora a circulação de água e a aeração, sendo a principal responsável pela estruturação física do solo (BESIGNANO; POKOCKY, 2004; KIEHL, 1985; MUCHOVEJ; OBREZA, 2004; PRIMAVESI, 1979; RAIJ van, 1998). Outros efeitos da matéria orgânica no solo são a fixação, complexação ou quelação de elementos tóxicos, como os metais pesados.

Muchovej e Obreza (2004) apresentam ainda outras vantagens da aplicação de bio sólido ao solo, tais como: melhora suas propriedades químicas pelo aumento do estoque de nutrientes; promove o aumento da CTC e do pH em solos ácidos; melhora suas propriedades físicas, como a estrutura, agregação de partículas, aeração, drenagem e retenção de água; aumento das propriedades biológicas pelo aumento da comunidade microbiana e da fauna edáfica e redução da fertilização química. Para Estados Unidos (2000), a melhora na textura e na capacidade de retenção de água do solo, devido à aplicação do bio sólido, resulta em condições mais favoráveis para o crescimento das plantas. O bio sólido também fornece nutrientes as plantas, como NPK e os micro Ni, Zn e Cu. Como a maior parte desses nutrientes está na forma orgânica, eles são liberados de forma lenta no solo, o que é bastante desejável para espécies florestais que apresentam longo ciclo de produção. Além disso, os nutrientes na forma orgânica são menos solúveis e lixiviam menos nos solos do que as formas mais solúveis. Entretanto, além das características do bio sólido (teores de microrganismos patogênicos e de elementos químicos e orgânicos perigosos) e dos sítios de aplicação (tipo de solo, profundidade dos aquíferos etc.), os pesquisadores recomendam especial atenção à topografia dessas áreas para a aplicação do bio sólido, uma vez que elas geralmente apresentam solos descobertos e sujeitos à erosão (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO PARANÁ, 1997; DEUS; CASTRO; LUCA, 1996). Além das características do local de aplicação e das espécies que serão fertilizadas, a qualidade do bio sólido é também um importante fator a ser observado para uma utilização segura.

A quase totalidade dos autores que tratam do uso do bio sólido na silvicultura afirma que existem vantagens em relação à sua utilização em culturas agrícolas. As principais justificativas são:

- a) Os produtos das culturas florestais, normalmente não são comestíveis, diminuindo o risco quanto à entrada de possíveis contaminantes na cadeia alimentar.
- b) Os ciclos das culturas florestais são mais longos e a acumulação de biomassa durante esse período pode ser uma maneira de retirar do solo e armazenar certos elementos perigosos, que podem ser exportados do local com a colheita da madeira.
- c) O ciclo longo permite maiores intervalos e uma maior dinâmica entre aplicações. Diferentemente de uma cultura agrícola, na qual a aplicação deve ocorrer em uma

determinada época, na maioria das culturas florestais a qualquer momento seria possível entrar no povoamento para realizar a distribuição do resíduo.

- d) Os solos florestais são geralmente pobres, resultando em melhor aproveitamento e menores perdas dos nutrientes.
- e) As culturas florestais oferecem menor oportunidade de contato humano com biossólido recém aplicado.
- f) O sistema radicular perene e bem distribuído das espécies florestais forma um verdadeiro emaranhado de raízes finas na camada mais superficial do solo que aumenta a eficiência de absorção dos elementos e pode funcionar como um verdadeiro filtro para evitar, por exemplo, a lixiviação de nitrato. Dessa maneira, os nutrientes do biossólido, liberados de forma mais lenta, podem ser melhor aproveitados pelas árvores, com menores perdas por lixiviação ou escorrimento superficial.
- g) No caso do Brasil, deve-se considerar ainda que a silvicultura intensiva é realizada por empresas que possuem extensas áreas plantadas, principalmente com eucaliptos. Nesse caso, a gestão do uso do biossólido (escolhas das áreas aptas, monitoramento da atividade, contratos entre gerador e usuário, etc) poderia ser mais simples do que trabalhar com um grande número de pequenos produtores agrícolas.

Guedes (2005) analisou a ciclagem biogeoquímica de nutrientes em um experimento com *Eucalyptus grandis* fertilizado com taxas de aplicação de 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹ de biossólido, base seca, cinco anos após o plantio. O biossólido proporcionou aumentos significativos de fitomassa, de produção de serapilheira e na devolução de nutrientes ao solo com o aumento das taxas de aplicação. Para a dose de 20 Mg ha⁻¹ a taxa média de degradação foi igual a 2,42 Mg ha⁻¹.ano⁻¹. O autor afirma ainda que a aplicação de biossólido propiciou, na fase final da rotação, maiores estoques de nutrientes em todos os compartimentos do ecossistema e que há uma maior capacidade em manter a sustentabilidade produtiva do ecossistema quando se aplica biossólido.

Nos EUA, a diminuição de áreas disponíveis para uso do biossólido associadas às restrições legais e à reclamação pública, levou o desenvolvimento de uma nova técnica para destino final desse resíduo, que alia a disposição de altas doses de aplicação com a produção florestal (KAYS et al., 2000). Utilizada em áreas degradadas de extração de areia e cascalho, o biossólido é disposto em trincheiras, com aproximadamente 1 metro de profundidade e 1 de largura, cobertas

novamente com uma camada de 15 a 30 cm solo. Essa disposição resulta numa taxa de aplicação de aproximadamente 420 toneladas secas por hectare. Nessas trincheiras são plantados híbridos de álamo que entre 6 a 8 anos são colhidos e novas aplicações de biofóssido são realizadas. Segundo os autores, as raízes profundas dos álamos resultam numa melhor aeração do solo e fornece oxigênio para a mineralização do biofóssido e absorção dos nutrientes liberados, especialmente o nitrogênio. O monitoramento realizado bianualmente em uma área tratada desde 1983 não detectou problemas ambientais relativos à lixiviação de nutrientes e metais e contaminação com coliformes fecais. Os autores afirmam que a técnica permite a conversão de áreas degradadas em um ambiente florestal estável para a vida selvagem e que uma de suas principais vantagens é a possibilidade de aplicação de grandes taxas de uma única vez aliada a produção de madeira, o que reduz os custos.

2.5 Restrições ao uso agro-florestal do biofóssido

Apesar de todos os pontos positivos da utilização de biofóssido como fertilizante, podem ocorrer efeitos negativos nos corpos d'água, no solo e na atmosfera, caso essa prática não seja conduzida adequadamente. A depreciação de corpos d'água pode ocorrer quando o biofóssido é aplicado em taxas que excedem os requerimentos nutricionais das plantas. O excesso de nitrogênio, por exemplo, pode lixiviar do solo até os corpos subterrâneos de água. O escoamento superficial pode conduzir os contaminantes do biofóssido da superfície do solo até as fontes de águas superficiais. O risco representado pelo seu arraste por erosão é devido ao possível contato direto com a população ou indiretamente pelo seu carreamento até corpos d'água. Já a lixiviação está associada à percolação dos componentes do biofóssido no solo e contaminação do lençol freático, principalmente por nitratos resultantes pela mineralização da matéria orgânica. Esse impacto pode ser minimizado pela manutenção de zonas de proteção nos corpos d'água superficiais e por práticas de conservação de solos. Por ser praticamente orgânico, apesar do risco, o potencial de contaminação hídrica do biofóssido é menor do que os fertilizantes químicos convencionais (ESTADOS UNIDOS, 2000).

O maior risco relacionado ao uso do biofóssido como fertilizante refere-se à segurança alimentar. No uso florestal ele é reduzido, entretanto em culturas agrícolas pode-se tornar um problema de saúde pública. A segurança alimentar é um bem público e por isso não tem um valor

explícito. Ela pode ser definida como uma redução de morbidade, medida pelo decréscimo da probabilidade de contrair doenças, pela qual o consumidor está disposto a pagar um custo adicional (STENGER, 2000). O autor afirma que os consumidores da França são céticos a respeito da segurança dos vegetais produzidos com a utilização de biofóssido como fertilizante.

Diversos autores afirmam que quanto à questão sanitária, o biofóssido é um produto seguro para uso como fertilizante. Tratamentos adicionais, como a calagem e secagem térmica, reduzem a concentração de organismos patogênicos a níveis seguros. Entretanto, a contaminação humana e ambiental por metais pesados é um risco ainda associado ao uso desse resíduo como fertilizante, uma vez que dependendo de sua concentração no biofóssido eles podem causar efeitos ambientais indesejáveis. O termo metal pesado é frequentemente usado de maneira generalizada para os elementos classificados como poluentes ambientais, o que engloba tanto elementos metálicos, como semi-metálicos e não metálicos (TYLER; MCBRIDE, 1989). Muitos desses elementos encontrados no biofóssido não são essenciais ao metabolismo das plantas (ex. Cd, Cr, Hg, Ni e Pb) ou o são em quantidades muito pequenas (ex. Cu, Fe e Z). Sua remoção do solo é quase impossível, por isso eles tendem a se acumular. A contaminação dos vegetais por metais pesados depende de sua mobilidade no solo e de sua biodisponibilidade (STENGER, 2000). Esses elementos geralmente apresentam baixa solubilidade e baixa mobilidade no solo, com risco de contaminação conseqüentemente baixo. A menos que ocorram erosões ou o pH do solo seja muito ácido (MUCHOVEJ; OBREZA, 2004). Deve-se considerar que os metais encontrados no biofóssido geralmente se encontram na forma orgânica e estão menos disponíveis para absorção das plantas do que os que podem ser encontrados como impurezas em fertilizantes químicos comerciais (FROSTA; KETCHUM JÚNIOR, 2000).

Devido ao desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento de resíduos industriais, tem se observado uma contínua diminuição no conteúdo de elementos químicos perigosos do biofóssido. Entretanto, a grande maioria de estudos sobre metais pesados realizadas recentemente se refere a biofóssidos cuja quantidade de metais pesados é maior do que são observados atualmente (COGGER et al., 2001). A qualidade do biofóssido tem melhorado ao longo das décadas, devido principalmente pelo maior controle no lançamento de efluentes contaminados na rede pública de coleta de esgoto (HENRY; COLE, 1997). Nos EUA, por exemplo, a concentração de metais pesados no biofóssido produzido atualmente é substancialmente diferente do produzido antes da década de 80 (OBREZA; O'CONNOR, 2003).

Os autores atribuem essa melhoria na qualidade do bioestabilizado ao controle e monitoramento de descarga de resíduos industriais na rede pública de esgoto.

Tanto o bioestabilizado quanto os fertilizantes minerais podem conter metais pesados. Seus teores no bioestabilizado são regulados por normas específicas para uso na agricultura e são monitorados frequentemente nas ETEs. Para os fertilizantes químicos, entretanto, o controle é quase inexistente (ESTADOS UNIDOS, 1999). No Brasil, Frosta e Ketchum Júnior (2000) afirmam que mesmo algumas pesquisas tendo demonstrado que a aplicação frequente e regular de fertilizantes químicos pode causar a acumulação de metais pesados no solo a níveis críticos, seu uso não é objeto de nenhuma ação regulatória. Os autores comparam a fitodisponibilização de metais pesados oriundos do bioestabilizado (estocado por 20 anos) e de fertilizantes químicos comerciais através de um experimento em casa de vegetação. Concluíram que a concentração de metais nos tecidos das plantas não diferiu significativamente entre os fertilizantes químicos e o bioestabilizado. Segundo os autores, metais pesados que podem ser encontrados nos fertilizantes químicos comerciais são oriundos da matéria prima utilizada ou do próprio processo de fabricação.

Devido ao potencial risco representado pelos contaminantes que podem ser encontrados na composição do bioestabilizado (substâncias orgânicas e inorgânicas potencialmente tóxicas e agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos), o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) elaborou uma resolução que disciplina o seu uso como fertilizante. A Resolução Nº 375, de 29 de Agosto de 2006, “define critérios e procedimentos para o **uso agrícola**⁴ de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados” (BRASIL, 2006). A Resolução abrange aspectos relacionados aos parâmetros de qualidade do resíduo e às características dos locais de aplicação, dentro outros (Quadro 2.2).

O uso na produção vegetal permite a reciclagem de nutrientes do bioestabilizado como fósforo, potássio e nitrogênio que podem ser fonte alternativa aos fertilizantes químicos. Além disso, a grande proporção de matéria orgânica pode melhorar as propriedades químicas e físicas de solos com baixa fertilidade natural utilizados na produção. Paradoxalmente, essa alternativa de destino final para o bioestabilizado tem sido bastante criticada pelos seus potenciais efeitos adversos. Principalmente devido à presença de organismos patogênicos e substâncias perigosas que podem ser encontradas nesse resíduo, mesmo em níveis aceitáveis pela legislação. Na Suécia, por

⁴ Compreende o uso em áreas destinadas à produção agrícola e silvicultura (BRASIL, 2006).

exemplo, a organização dos produtores rurais recomendou a seus membros em 1999 que não mais utilizassem o bioestabilizado para fins agrícolas. Tal fato agravou o problema, uma vez que os aterros sanitários daquele País não mais podem receber resíduos orgânicos a partir de 2005 (LUNDIN et al., 2004).

ASPÉCTO	PARÂMETRO A SER OBSERVADO
Potencial agrônômico	Carbono orgânico; fósforo total; nitrogênio Kjeldahl; nitrogênio amoniacal; nitrogênio nitrato/nitrito; pH em água (1:10); potássio total; sódio total; enxofre total; cálcio total; magnésio total; umidade e sólidos voláteis e totais.
Substâncias inorgânicas no bioestabilizado	Arsênio; Bário; Cádmio; Chumbo; Cobre; Cromo; Mercúrio; Molibdênio; Níquel; Selênio; e Zinco.
Substâncias orgânicas no bioestabilizado	Benzenos clorados; Ésteres de ftalatos; Fenóis clorados e não clorados; Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos; e Poluentes orgânicos persistentes (POP's), constantes da convenção de Estocolmo.
Agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos no bioestabilizado	Coliformes termotolerantes; ovos viáveis de helmintos; Salmonella; e vírus entéricos.

Fonte: Adaptado de Brasil (2006)

Quadro 2.2 - Parâmetros de alguns aspectos a serem observados no uso agrícola do bioestabilizado segundo a Resolução do CONAMA Nº 375 , de 29 de Agosto de 2006

Dunn (2000), afirma que a despeito das normas regulatórias para a utilização do bioestabilizado, a aceitação pública pode ser uma fonte de regulação mais restritiva ainda. Por isso, é sempre importante considerar os impactos negativos do projeto do ponto de vista da vizinhança. A maioria das reclamações se refere ao tráfego de caminhões nas áreas, ao odor e ao impacto visual. Minimizando esses aspectos o projeto terá grandes chances de aceitação pública (ESTADOS UNIDOS, 2000). Para Riekerk (2000) e Estados Unidos (2000) os aspectos sociais são os principais limitantes na utilização de resíduos de ETEs em áreas agrícolas. Os autores afirmam que a aversão dos produtores e consumidores desses produtos podem inviabilizar sua adoção em escala comercial. Afirmam ainda que programas de esclarecimento dos proprietários rurais e demais atores envolvidos é a única forma de contornar o problema.

Na Florida, a utilização de bioestabilizado como fertilizante tem sido alvo de críticas e suspeitas recentes de contaminação de seres humanos por agentes patogênicos. Mesmo sem comprovação científica, esse quadro social resultou na proibição do uso de bioestabilizado em alguns condados do Estado (OBREZA; O'CONNOR, 2003). Os autores associam esse quadro de rejeição social à síndrome do "NIMBY" (*Not In My Back Yard*), isto é, muitos proprietários não aceitam a

aplicação do bio sólido em suas propriedades ou em áreas vizinhas. Afirmam ainda que não há mundialmente nenhum caso documentado de risco a saúde pública, de morte, doenças sérias ou de anomalias físicas em animais ou humanos devido ao uso de bio sólido como fertilizante.

Atualmente nos EUA a oposição pública, em detrimento de restrições técnicas, é o principal motivo para a diminuição do programa de uso benéfico de bio sólido como fertilizante (ESTADOS UNIDOS, 2000). A percepção social do reuso do bio sólido quase nunca é baseada em critérios científicos e geralmente não é associada ao grau de risco aos seres humanos ou ao ambiente que essa prática pode proporcionar (ESTADOS UNIDOS, 1999). Segundo o autor, a rejeição pública ao uso agrícola do bio sólido pode ser reduzida pela combinação de manejo adequado, investimento em programas informativos e marketing.

Com exceção dos peletizados, o bio sólido que sai das estações de tratamento normalmente apresenta aspecto visual e odor desagradáveis. Os peletes são produzidos no processo de secagem térmica, que consiste no aquecimento do bio sólido em ambiente hermeticamente fechado, com a consequente evaporação e coleta da umidade presente (FERREIRA; NISHIYAMAI, 2003). Diferentes tipos de bio sólido podem ser secos termicamente, entretanto para que o processo seja eficiente eles devem apresentar teores de sólidos entre 15 e 30 %, o que é obtido por meio de desidratação mecânica (ANDREOLI et al., 2001). O bio sólido sai do secador em forma de peletes, com diâmetro médio entre 2 e 5 mm e umidade entre 5 e 10 % (95 e 90 % de teor de sólidos). O líquido evaporado é condensado e retornado novamente ao início do tratamento na ETE. O processo é compacto e completamente fechado, não permitindo a liberação de odores desagradáveis. É indicado para ETEs de médio e grande porte, que possuam limitada disponibilidade de área e que estejam localizadas próximas a áreas residenciais.

Além disso, o repúdio existente pelos nossos próprios dejetos, inexistente para esterco de animais, pode prejudicar a aceitação por parte dos produtores e a comercialização de um produto que tenha sido cultivado utilizando bio sólido. Fatos como, por exemplo, o ocorrido recentemente no Distrito Federal envolvendo um grupo caracterizado como a “máfia do lodo” (CARDOSO, 2003), certamente comprometem a credibilidade e colocam em risco programas sérios de uso agro-florestal do bio sólido. Segundo o autor, pessoas ligadas à “máfia do lodo” retiravam o lodo da ETE da CAESB (Companhia de Saneamento do Distrito Federal), distribuído gratuitamente, e o vendiam indiscriminadamente e sem nenhum controle para os produtores não cadastrados na companhia.

Quando tratado conforme as normas e padrões estabelecidos, o bioossólido é um produto seguro para o meio ambiente e para a saúde humana. Entretanto, o sucesso do uso benéfico do bioossólido em culturas agroflorestais depende do desenvolvimento de uma logística de uso que permita o controle de todas as etapas do processo, desde sua saída das ETEs até a distribuição no campo. Adicionalmente, as unidades geradoras de bioossólido devem desenvolver um adequado sistema de gerenciamento que garanta que o material saído das ETEs chegue ao destino final planejado e seja utilizado de acordo com boas práticas de manejo e seguindo projeto elaborado por responsável técnico.

Referências

- ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Bioossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap. 2, p. 7-40.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; FREGADOLLI, P.; CASTRO, L.A.R. de. Diagnóstico do potencial dos solos da região de Maringá para disposição final do lodo gerado pelos sistemas de tratamento de esgoto do Município. **Sanare**, Curitiba, v.13, n.13, jan./jun. 1999. 1v. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/weHP/HPTInternetSanepar-0010>>. Acesso em: 10 out. 2005.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI et al. (Ed). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, Sanepar, 2001. v. 6, cap. 4, p.87-117. (Série Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.175**: Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrão de desempenho. Rio de Janeiro, 1990. 5p.
- BESIGNANO, R.; POKOCKY, K. Using a GIS-based Model to Determine Agricultural Lands Suitable for Biosolid Application in Whiteside County, Illinois. University of Guelph, Department of Geography. Canada, Winter 2004. 1v. Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2004/Group03>. Acesso em: 30 ago. 2005.
- BIDONE, F.R.A. Alternativas de Disposição Final de Bioossólidos: Aterros, Landfarming e Incineração. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.131-135.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **DOU**, Brasília, 30 de ago. 2006, 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2006>>. Acesso em: 22 abr. 2007.

CARDOSO, C. Promotora tenta barrar venda ilegal de lodo de esgoto. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 25 de fev. 2003. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u63902.shtml>>. Acesso em: 19 mar. 2006.

CHIBA, M.K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo:** parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura. 2005. 143p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

COGGER, C.G.; BARY, A.I.; FRANSEN, S.C.; SULLIVAN, D.M. Seven Years of Biosolids versus Inorganic Nitrogen Applications to Tall Fescue. **Journal of Environmental Quality**, Madison, n. 30, p. 2188-2194, 2001.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO PARANÁ. **Manual técnico para a utilização do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Eficiência agrônômica e produção vegetal de cinco biossólidos aplicados a dois solos tropicais. **Sanare**, Curitiba, v.20, n.20, p. 49-57, jul./dez. 2003.

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **Sanare**, Curitiba, v.16, n.16. jul./dez. 2001. 1v. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/weHP/HPTInternetSanepar-0010>>. Acesso em: 10 out. 2005.

DEUS, A.B. de; CASTRO, C.M.B. de ; LUCA, S.J. A disposição de lodos de esgoto no solo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 1, 1996, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: 1996. p.191-195.

DUNN, J.A. **Reclamation Using Biosolids:** a primer on economics and other concerns. In: MINING, FOREST AND LAND SYMPOSIUM, July, 2000. [s.l.:s.n.] 1v. Disponível em: <http://www.rmwea.org/tech_papers/mine_forest_land_2000/Dunn.pdf>. Acesso em: 25 out. 2005.

ENDO, H.; NAGAYOSHI, Y.; SUZUKI, K. Production of glass ceramics from sewage sludge. **Water Science and Technology**, Colchester, v.36, n.11, p. 235-241, 1997.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Municipal and Industrial Solid Waste Division, Office of Solid Waste. **Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States**. EPA530-R-99-009. Washington, D.C. September, 1999. 81p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/compost/biosolid.pdf>> Acesso em: 10 out. 2005.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Water. **Biosolids Technology Fact Sheet: Land Application of Biosolids**. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C.: September, 2000. 1v. Disponível em: <http://www.epa.gov/owm/mtb/land_application.pdf> Acesso em: 25 out. 2005.

FERREIRA, R.A.R.; NISHIYAMAI, L. Principais equipamentos e processos utilizados no condicionamento e tratamento do lodo de esgoto. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOGRAFIA “PERSPECTIVAS PARA O CERRADO NO SÉCULO XXI”, 2, 2003. 11p. [s.l.:s.n.]. Disponível em: <www.ig.ufu.br/2srg/3/3-92.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2005.

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

FUREDY, C. **Solid wastes in the waste economy: socio-cultural aspects**. Vietnam Environmental Training Program. Publication Series. Report No. 3; The Urban Waste Economy in Vietnam. Proceedings of a Workshop Funded by: International Development Research Centre, Ottawa; Hanoi, August 22-25, 1994. [s.l.:s.n.]. 1v. Disponível em: <<http://www.utoronto.ca/env/vietpro/waste/Chapt4.htm>>. Acesso em: 1 set. 2005.

GOLDSTEIN, N.; BLOCK, D. Biosolids Composting Holds its Own. **BioCycle**, Emmaus, v. 38, n. 12, p.64-74, 1997.

GUEDES, M.C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005, 168p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

HENRY, C.L.; COLE, D.W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, n. 45, p. 269-217, 1997.

KARABOLAD, J.C.; FERRETTI, M.R.J.; PEREIRA, M. de B. et al. Aterro Exclusivo para Lodo/Biossólido de ETES: Alternativa para Disposição Final. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p. 137-143.

KAYS, J.S.; FLAMINO, E.J., FELTON, G.; FLAMINO, P.D. Use of deep-row biosolids applications to grow forest trees: a case study. In: HENRY, C.L.; HARRISON, R.B.; BASTIAN, R.K. **The forest alternative: principles and practice of residuals use**. Seattle, WA: University of Washington College of Forest Resources, 2000. chap.1, p.105-110. Disponível em: <http://www.naturalresources.umd.edu/Pages/Biosolids_Paper_1.html>. Acesso em: 13 out. 2005.

KIDDER, G. **Applying Non-Hazardous Wastes to Land: Opportunities and Problems**. Notes in Soil Science, SS-SOS-43. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. September 1993. Revised as SL-137, January 1998. Reviewed September 2003. 1v. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SS/SS16600.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2006.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

LUNDIN M.; OLOFSSON M., PETTERSSON; G.J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.41, p. 255-278, 2004.

McLAREN, V.W. Appropriate industrial waste management strategies for developing countries. Vietnam Environmental Training Program. Publication Series. Report, 3; The Urban Waste Economy in Vietnam. **Proceedings** of a Workshop Funded by: International Development Research Centre, Ottawa; Hanoi, August 22-25, 1994. 1v. Disponível em: <www.utoronto.ca/env/vietpro/waste/Chapt5.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

MIKI, M.K.; ANDRIGUETI, E.J.; ALEM SOBRINHO, P. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap. 2, p. 41-87.

MUCHOVEJ, R.M.; OBREZA; T.A. **Biosolids: Are These Residuals All the Same?** SS-AGR-167, Series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published June 2001. Reviewed April 2004. 3p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/AG114>>. Acesso em: 3 set. 2005.

OBREZA, T.A.; O'CONNOR, G.A. **The Basics of Biosolids Application to Land in Florida**. SL 205. Fact sheet of the Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. First printed: April 2003. 4p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SS/SS42400.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2006.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 1979. 549p.

RAIJ, B. van Uso agrícola de biossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BISSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.147-151.

RIEKERK, H. Waste Utilization in Forest Lands of Florida. Circular 734, Series of the Department of Forest Resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Date reviewed; March 2000. 1v. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/FR028#copy>>. Acesso em: 5 set. 2005.

SILVÉRIO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto, da matéria orgânica do lixo urbano e de resíduos industriais. **O Agrônomo**, Campinas, v. 1, n. 56, p. 5-8, 2004.

STENGER, A. Experimental valuation of food safety: Application to sewage sludge. **Food Policy**, Amsterdam, n. 25, p. 211-218, 2000.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-105.

TYLER, L.D.; McBRIDE, M.B. Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel and Zinc in organic mineral soils columns. **Soil Science**, Baltimore, v.134, p.198-205, 1989.

WEBB, R. S.; JOKELA, E.J.; SMITH, W.H. Recycling Composted Organic Wastes on Florida's Forest Lands. FOR 44, Series of the Department of Forest Resources and Coservation, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published January 1991, Reviewed March 2000. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/FR026#copy>>. Acesso em: 5 set. 2005.

WEISMANTEL, G. What's New in Sewage Sludge Separation and Processing ? **Filtration and Separation** . Amsterdam, v. 38, n. 5 p.22-25, 2001.

3 DEMANDA POTENCIAL POR BIODÓLIDO PRODUZIDO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO QUANDO USADO COMO FERTILIZANTE EM PLANTIOS DE EUCALIPTOS

Resumo

Avaliou-se a demanda potencial por biossólido produzido nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) quando reutilizado como fertilizante em florestas de eucaliptos situadas a diferentes distâncias do centro da RMSP. A determinação da cobertura com plantios de eucaliptos disponível nessa região baseou-se no Inventário Florestal do Estado de São Paulo publicado pelo Instituto Florestal de São Paulo em 2002. A demanda foi estimada de acordo com cenários que consideraram diferentes doses de aplicação no campo, níveis de produção nas ETEs e área variável de plantios florestais disponíveis dependendo do nível de restrições cautelares impostas ao uso e distribuição do biossólido no solo (por exemplo, proibição de uso em plantios muito próximos a nascentes, áreas urbanizadas ou em áreas com alta declividade). Na situação mais favorável, onde se considera a menor quantidade possível de biossólido produzido nas ETEs, a maior dose de aplicação no campo e a existência de nenhuma restrição ao seu uso nas áreas anualmente disponíveis para plantio, observa-se que o biossólido seria totalmente consumido em um raio de apenas 32 km. Em um cenário menos favorável, com alta produção de biossólido nas ETEs, uso da menor dose de aplicação e liberação de apenas 25% da área anualmente disponível, o raio necessário para consumir todo o biossólido produzido nas ETEs se elevaria para 120 quilômetros. Conclui-se que a demanda potencial por biossólidos produzidos nas ETEs da RMSP é suficientemente alta a curtas distâncias, e que o uso dos plantios de eucaliptos como destino final alternativo para esse resíduo na RMSP é perfeitamente viável, mesmo que restrições cautelares bastante limitantes sejam adotadas.

Palavras-chave: Biossólido; Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; *Eucalyptus* spp; Demanda potencial; Potencial de uso

Abstract

The potential demand for biosolids produced in Wastewater Treatment Plants (WTPs) located in the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) was estimated at different road distances. The availability of eucalyptus plantations in this region was based on the Forest Inventory of the State of São Paulo published in 2002. The potential demand was estimated according to different scenarios that considered variable application dosages, different production levels in the WTPs and different levels of precautionary constraints that reduce the total area where the biosolids can be disposed (for example, proximity to springs or to urban areas and irregular topography). In the most favorable scenario, where WTPs produce lower quantities, application dosages of biosolids are higher and no constraints are imposed to the use of biosolids, the annual production of biosolids can be disposed in less than 32 kilometers from the WTPs. On the other hand, in a less favorable scenario, where the annual production of biosolids in the WTPs

is the highest possible, application dosages are smaller and several precautionary constraints limit its use to only 25% of the available area, the disposal distance increases to 120 kilometers. It is concluded that the potential demand for biosolids produced in WTPs in the MRSP is sufficiently high at short distances, and that the use of eucalyptus plantations as final disposal alternatives for biosolids produced in the MRSP is perfectly viable, even under very limiting precautionary constraints.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Eucalypts stands; *Eucalyptus* spp; Potential demand; Waste management

3.1 Introdução

O tratamento de esgotos domésticos resulta na produção de um resíduo, o biossólido, cuja destinação é um dos principais problemas operacionais nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Para Silvério (2004) e Alem Sobrinho (2001), os destinos mais comuns para o biossólido produzido nas ETEs brasileiras são os aterros sanitários, ou exclusivos, próximos às ETEs, lagoas de lodo ou mesmo de maneira não controlada em áreas agrícolas. Atualmente, o destino final adotado para a totalidade do biossólido produzido na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é a co-disposição com resíduos sólidos urbanos (lixo) nos Aterros Sanitários Municipais São João (Zona Leste) e Bandeirantes (Zona Oeste) da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2005). Segundo o Eng. Sacamoto¹, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a PMSP não cobra pela disposição do biossólido. Em contrapartida os Aterros Municipais encaminham o **chorume**² gerado na decomposição do lixo para as ETEs, o qual é encaminhado ao processo de tratamento para redução de seu potencial poluidor. Nesse processo, viabilizado por meio de um Termo de Cooperação Técnica, cada parte arca com os seus respectivos custos de transporte.

Para Silvério (2004) e Alem Sobrinho (2001), somente a destinação final do biossólido pode representar mais de 50% do custo operacional total de tratamento e quando não realizada de forma adequada pode anular os benefícios da coleta e tratamento dos esgotos, tornando-se um novo problema ambiental. Uma alternativa recente é a transformação do resíduo em um material inofensivo que pode ser reutilizado como fertilizante, por exemplo. Isso só é possível desde que

¹ Informação pessoal.

² Líquido resultante da decomposição de resíduos orgânicos com alto potencial poluidor.

a sua concentração com contaminantes potencialmente perigosos (elementos químicos e orgânicos perigosos e agentes patológicos) atenda aos limites legais estabelecidos, de acordo com utilização. Nesse caso, é comum denominá-lo de **biossólido** em vez de lodo de esgoto.

No Brasil, a Resolução N° 375, de 29 de Agosto de 2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) disciplina a utilização agro-florestal do biossólido. Dentre outras medidas, a entidade estipula a criação de Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) que serão responsáveis pelo “recebimento, processamento, caracterização, transporte, destinação do lodo de esgoto produzido por uma ou mais estações de tratamento de esgoto sanitário e monitoramento dos efeitos ambientais, agronômicos e sanitários de sua aplicação em área agrícola” (BRASIL, 2006).

Na Nova Zelândia, a estratégia de gestão de resíduos tem como meta destinar 95% do biossólido para fins benéficos, em substituição a sua deposição em aterros sanitários. Nesse país é proibida a aplicação de biossólido em fazendas leiteiras. Essa medida objetiva proteger a indústria exportadora de laticínios (KIMBERLEYA et al., 2004). Para os autores, a aplicação de biossólido em plantios florestais reduz o risco de substâncias potencialmente tóxicas entrarem na cadeia alimentar humana.

A maioria dos solos florestais no Estado de São Paulo é de baixa fertilidade, assim o biossólido apresenta um grande potencial de aumentar a produtividade das florestas devido ao seu conteúdo de nutrientes e matéria orgânica. Para alguns nutrientes o biossólido é comparável aos fertilizantes químicos e pode ser utilizado para reduzir a sua quantidade utilizada (MUCHOVEJ; OBREZA, 2004). Entretanto, ele normalmente não é um material bem balanceado nutricionalmente para a maioria das culturas, e raramente substitui totalmente a fertilização química convencional (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005).

No Brasil, as florestas plantadas, especialmente as de eucaliptos, são potenciais candidatas à fertilização com o biossólido, principalmente devido ao seu curto ciclo produtivo e grande área plantada. Para a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2006) as florestas plantadas representam hoje no Brasil a principal fonte de suprimento de madeira das cadeias produtivas de importantes segmentos industriais como os de celulose e papel, produtos sólidos de madeira, painéis reconstituídos, móveis, siderurgia a carvão vegetal, energia e produtos de madeira sólida. Segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura (2006), em 2005 o Brasil ocupou mundialmente o 7º lugar em quantidade de florestas plantadas com 5,6 milhões de hectares,

sendo a 3ª cultura mais plantada no país. Das florestas plantadas, as de eucalipto representam a maior parte com 3,4 milhões. Individualmente, o Estado de São Paulo ocupa o segundo lugar em plantios de eucaliptos com 887.929 ha, sendo 49% destes pertencem ao setor de Celulose e Papel (FUNDAÇÃO FLORESTAL; FUNDO FLORESTAR, 2006). Segundo Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2006), as principais espécies cultivadas atualmente no Brasil são o *Eucalyptus grandis*, *E. citriodora*, *E. camaldulensis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, entre outras. Além disso, foram desenvolvidos cruzamentos entre as espécies, derivando as espécies híbridas como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. urophylla* x *E. grandis*).

O aumento da produtividade florestal devido ao uso do bio-sólido tem sido comprovado por autores como Kimberley et al. (2004), Vaz e Gonçalves (2002) Kays et al., 2000 e McNab e Berry (1985). Além de nutrientes para as plantas, o bio-sólido também possui um teor significativo de matéria orgânica, cujos efeitos positivos no solo têm sido comprovados por diversos autores. A matéria orgânica melhora as propriedades químicas pelo aumento do estoque de nutrientes; promove o aumento da CTC e do pH em solos ácidos; melhora suas propriedades físicas, como a estrutura, agregação de partículas, aeração, drenagem e retenção de água; melhora as suas propriedades biológicas pelo aumento da comunidade microbiana e da fauna edáfica. (BESIGNANO; POKOCKY, 2004; KIEHL, 1985; MUCHOVEJ; OBREZA, 2004; PRIMAVESI, 1979; RAIJ van, 1998).

Soares et al. (2002) conduziram um experimento em Salto de Pirapora, SP, em que foi avaliada a lixiviação de Nitrogênio após a aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de bio-sólido, base seca, em um solo degradado em plantio de *Eucalyptus grandis*, conduzido sob manejo de cultivo mínimo. Os autores constataram ao longo de seis meses uma rápida perda de N do resíduo via lixiviação, que foi mais pronunciada no solo degradado logo após a aplicação do resíduo. Entretanto, o efeito retornou aos valores similares ao tratamento controle após seis meses. Na área sob cultivo mínimo foi observada uma maior imobilização de N mineral na serapilheira. Os autores concluíram que o cultivo mínimo colabora para a redução da lixiviação de nitrato em plantios florestais fertilizados com bio-sólido.

O uso do bio-sólido como fertilizante em florestas de eucaliptos depara-se com uma questão básica que se refere à existência de áreas disponíveis para a fertilização que pudessem consumir o grande volume de bio-sólido gerado nos grandes centros, total ou parcialmente. Por isso, o objetivo desse estudo foi o de avaliar o demanda potencial pelo bio-sólido produzido nas

ETEs da RMSP em povoamentos de eucaliptos do seu entorno, em diferentes distância rodoviárias de transporte.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Quantificação das áreas total e anualmente disponíveis com eucaliptos

O presente trabalho representa um estudo de caso envolvendo as ETEs da SABESP localizadas na RMSP e os povoamentos de eucaliptos do seu entorno, dentro do Estado de São Paulo. A fonte de dados utilizada no presente trabalho foi a cobertura com eucaliptos dos municípios paulistas constante no Inventário Florestal do Estado de São Paulo, editado pelo Instituto Florestal do Estado de São Paulo (KRONKA et al., 2002). O município de São Paulo foi considerado como ponto central de produção de biossólido na RMSP (Figura 3.1).

As distâncias rodoviárias (em quilômetros) entre a sede dos municípios paulistas, com alguma cobertura de eucaliptos, até a sede do município de São Paulo foram determinadas utilizando o programa “Guia Quatro Rodas Rodoviário” e referem-se às rotas mais rápidas entre as localidades consideradas (EDITORA ABRIL S.A.; MAPLINK, 2003).

Para estimativa da área anualmente disponível são necessárias informações que não constavam na base de dados utilizada, ou seja: (i) o sistema de manejo e (ii) a distribuição entre classes de idade dos povoamentos de eucaliptos. Por isso, para o cálculo da área anual potencialmente disponível para fertilização com biossólido foram consideradas as seguintes pressuposições:

- a) ciclo de produção para o eucalipto de sete anos;
- b) distribuição uniforme de área entre classes de idade. Portanto, um sétimo da área total plantada com eucalipto encontra-se no primeiro ano de desenvolvimento; e
- c) a aplicação do biossólido seria feita apenas uma vez no primeiro ano de desenvolvimento.

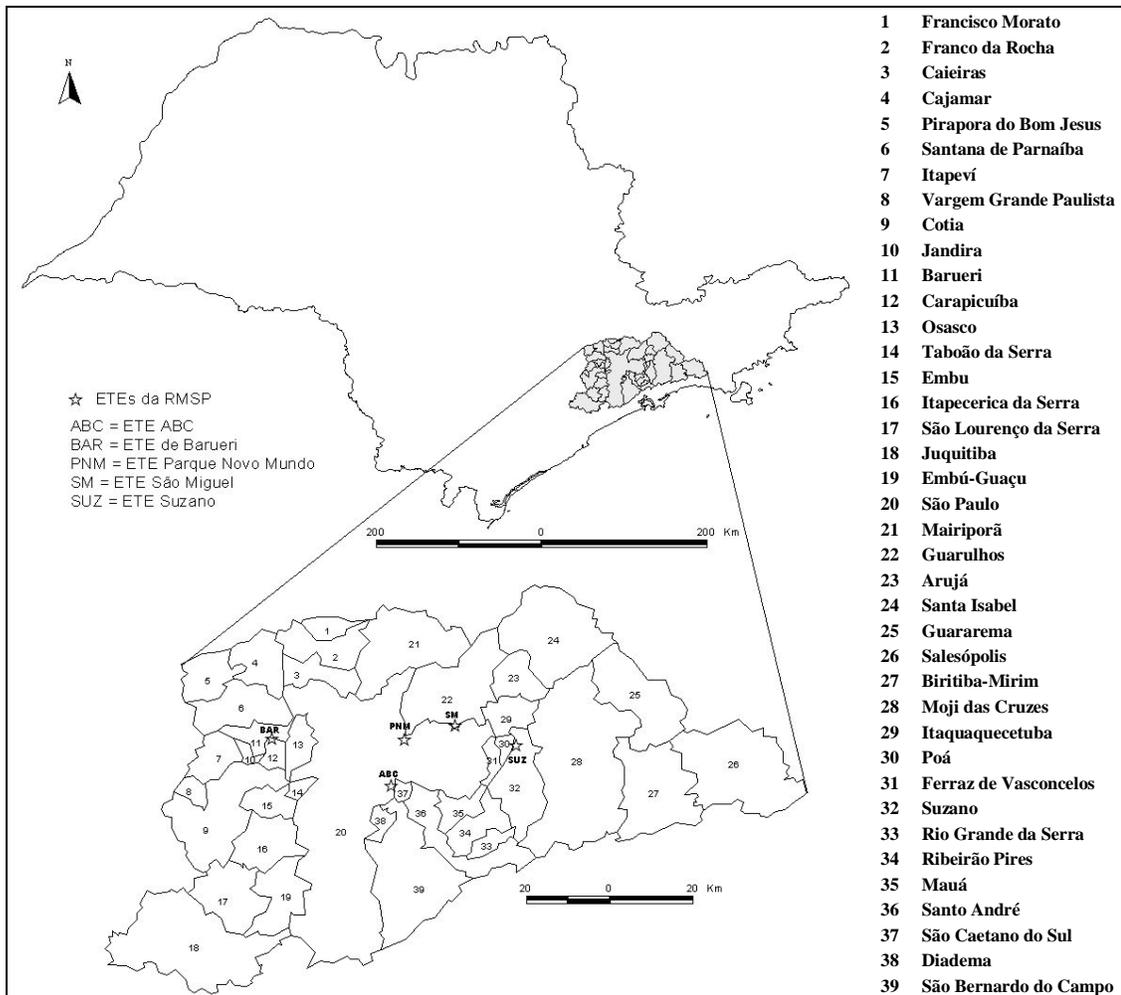


Figura 3.1 - Posição relativa dos municípios que compõem a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e das ETEs que atendem essa região

A base de dados da cobertura com eucaliptos não permitiu a seleção de áreas aptas a disposição do bio-sólido, observando os critérios de localização estipulados pela Seção V da Resolução do CONAMA N° 375, de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006). Por isso foram elaborados cenários considerando reduções percentuais na área disponível anualmente para fertilização. Também foram incluídos nos cenários diferentes níveis de produção de bio-sólido na RMSP e diferentes taxas de aplicação de bio-sólido no campo, dentro de intervalos encontrados na literatura. As produções de bio-sólido consideradas nos cenários foram baseadas nos atuais níveis e projeções futuras para geração desse resíduo nas ETEs da RMSP divulgados pela SABESP. Para os cenários assim criados foi diagnosticado o potencial de consumo de bio-sólido nos povoados de eucalipto.

3.3 Resultados e discussão

A Tabela 3.1 apresenta o resumo da quantificação das áreas com plantios de eucaliptos a diferentes distâncias rodoviárias das ETes localizadas na RMSP.

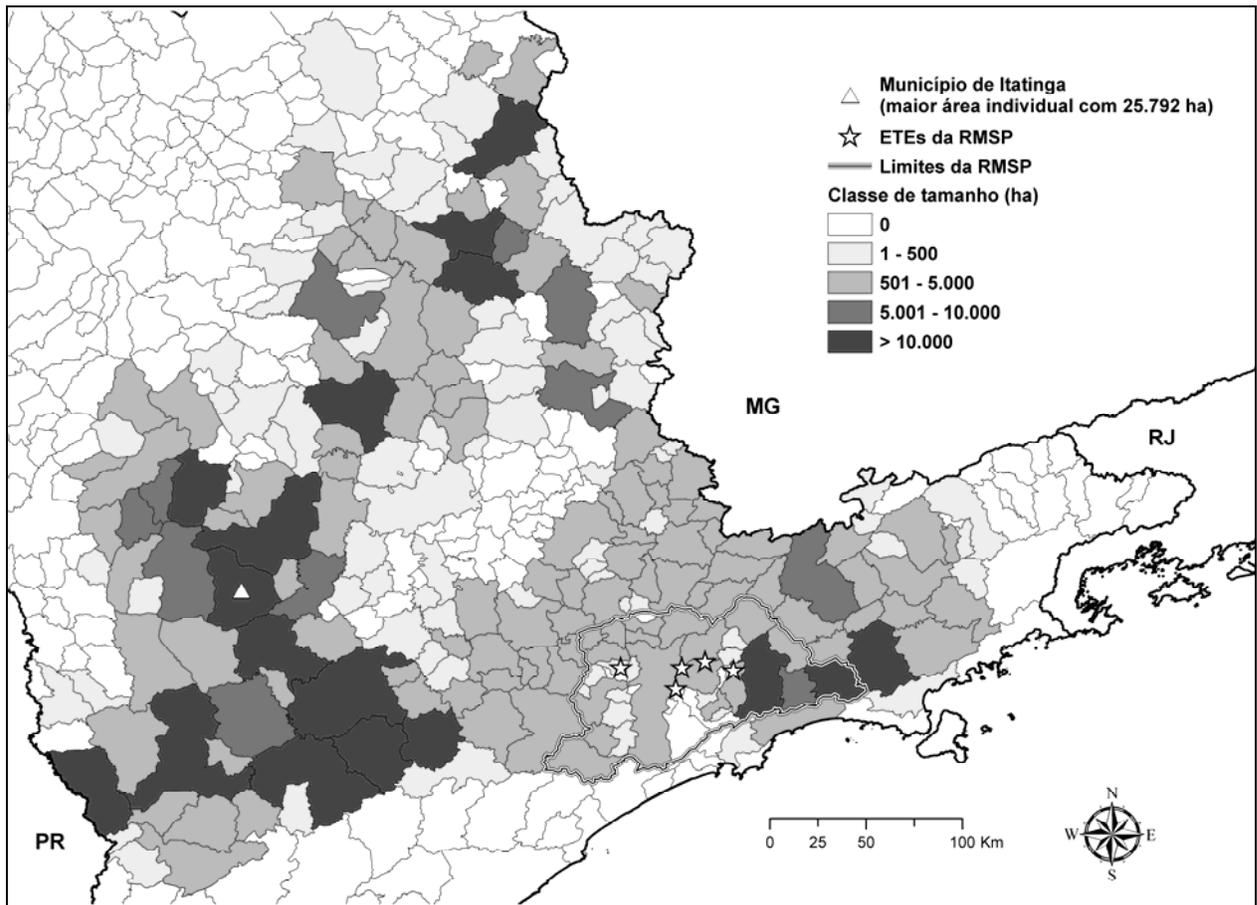
Tabela 3.1 - Área reflorestada com eucaliptos a diferentes classes de distâncias rodoviárias das ETes da RMSP

Classe de Distância Rodoviária	Área coberta com eucaliptos			
	Parcial		Acumulada	
km	ha	%	ha	%
0 a 49	18.920	3,5	18.920	3,5
50 a 99	69.622	12,9	88.542	16,4
100 a 149	80.233	14,9	168.775	31,3
150 a 199	50.545	9,4	219.320	40,6
200 a 249	132.384	24,5	351.704	65,2
250 a 299	119.440	22,1	471.144	87,3
300 a 349	50.967	9,4	522.111	96,8
350 a 400	17.464	3,2	539.575	100,0
Geral	539.575	100,0		

Dos municípios considerados no estudo, verifica-se que existem 539.575 hectares de florestas de eucaliptos até a distância de 400 km das ETes da RMSP. Até 100 km concentram-se 88.542 ha de eucaliptos (16%), sendo que mais da metade do total de reflorestamentos (51%) está localizado até a distância de 216 km. Dentre dos municípios que possuem povoamentos de eucaliptos, o de Restinga é mais distante (378 km) com 1.926 ha, já o mais próximo é o de São Paulo com 1.420 ha. Itatinga é isoladamente o Município que apresentou a maior área com eucaliptos com 25.792 ha (5% do total), o que representa cerca de 27% da área do Município.

Em termos de localização, verifica-se uma grande concentração de áreas com florestas de eucaliptos a Sudoeste do RMSP, no pólo madeireiro que abrange o Município de Itapeva, na divisa com o Estado do Paraná, prolongando-se a Noroeste incluindo o pólo madeireiro que abrange o Município de Mogi-Guaçu (Figura 3.2).

Verifica-se também, municípios com grande área coberta com florestas de eucalipto relativamente próximos da RMSP, a Sudeste desta. Nessa situação incluem-se os Municípios de Mogi das Cruzes, Salesópolis e Paraibuna. Entretanto, deve-se considerar que apesar de próximos da RMSP esses Municípios apresentam uma grande porção de seu território com declividade acentuada, o que inviabilizaria o uso de biossólido nesses locais.



Fonte: Adaptado de Kronka et al. (2002)

Figura 3.2 - Distribuição dos municípios paulistas em classes de tamanho da área coberta com florestas de eucaliptos

As áreas apresentadas na Tabela 3.1 não representam a real demanda por bioossólido, já que elas se encontram em diferentes classes de idade e sob diferentes regimes de manejo e considerou-se que o bioossólido seria aplicado apenas no primeiro ano de desenvolvimento da floresta. Por isso, a Tabela 3.2 resume as áreas com florestas de eucalipto que representam demanda potencial anual pelo bioossólido das ETes da RMSP.

A adoção das pressuposições da seção 3.2.1 resultou na redução de 86% das áreas com florestas de eucalipto no entorno da RMSP, em todas as classes de distâncias rodoviárias. Assim do total de 539.57 ha restaram apenas 77.082 ha de eucalipto que estariam disponíveis anualmente para fertilização com bioossólido. É oportuno ressaltar que a adoção das pressuposições reduziu as áreas de forma linear em todas as classes de distância, o que

difícilmente ocorreria na prática devido, por exemplo, a condições locais de relevo e de manejo das florestas.

Tabela 3.2 - Área reflorestada com eucaliptos anualmente disponível para a disposição de biossólido a diferentes classes de distâncias rodoviárias das ETES da RMSP

Classe de distância rodoviária km	Área coberta com eucaliptos anualmente disponível para fertilização			
	Parciais		Acumulado	
	ha	%	ha	%
0 a 49	2.703	3,5	2.703	3,5
50 a 99	9.946	12,9	12.649	16,4
100 a 149	11.462	14,9	24.111	31,3
150 a 199	7.221	9,4	31.331	40,6
200 a 249	18.912	24,5	50.243	65,2
250 a 299	17.063	22,1	67.306	87,3
300 a 349	7.281	9,4	74.587	96,8
350 a 400	2.495	3,2	77.082	100,0
Geral	77.082	100,0		

Fonte: Adaptado da Tabela 3.1, considerando as pressuposições da seção 3.2.1

Utilizando a metodologia proposta pela Norma³ da CETESB P4.230-jan./99 para utilização agro-florestal do biossólido (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1999) e dados históricos de análises químico-físicas do biossólido da ETE de Barueri, Faria (2000) chegou a taxa de máxima aplicação permissível de 28 Mg ha⁻¹, em base seca, para a aplicação de biossólido em povoamentos de eucaliptos. Entretanto, o autor afirma que doses dessa magnitude dificilmente seriam econômicas devido ao elevado custo de transporte do resíduo até as áreas de aplicação. Segundo Fernando Carvalho de Oliveira⁴, a Companhia Suzano de Papel e Celulose vem utilizando operacionalmente doses em torno de 5 Mg ha⁻¹, em base seca, do biossólido produzido na ETE de Jundiá, SP, em plantio de eucaliptos da empresa. Por isso, os cenários avaliados nesse estudo consideraram taxas de aplicação variando de 5 a 20 Mg ha⁻¹, em base seca.

Os níveis de produção utilizados nos cenários elaborados basearam-se na produção atual e projeção futura para a produção de biossólido nas ETES das SABESP, localizadas na RMSP (Tabela 3.3).

³ Cujas metodologia é semelhante a da Resolução do CONAMA (BRASIL, 2006).

⁴ Informação pessoal. Representante da empresa que opera a ETE de Jundiá.

Tabela 3.3 - Evolução da produção de biossólido nas ETEs da SABESP localizadas na RMSP

ETE	Teor de sólidos (%)	Ano			
		2005	2007	2010	2015
----- produção de biossólido em base seca (Mg ano ⁻¹) -----					
Barueri	24	20.586	34.865	38.001	92.733
ABC	41	4.490	6.360	6.734	19.829
Pq. Novo Mundo	38	5.548	5.825	6.380	13.870
São Miguel	36	3.942	6.675	7.884	18.199
Suzano	38	5.548	6.824	7.684	13.662
Geral	29*	40.114	60.549	66.683	158.293

Fonte: Adaptado de COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005)

* Média aritmética ponderada pela produção.

Considerando os níveis para as variáveis descritos acima, a Tabela 3.4 apresenta diferentes cenários para o uso do biossólido produzido nas ETEs da RMSP em povoamentos de eucaliptos no seu entorno.

Nos cenários avaliados o aumento na produção de biossólido, a diminuição na dose de aplicação ou o aumento da redução na área disponível anualmente, obviamente, aumentam o raio de consumo e vice-versa (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Raio de consumo do biossólido produzido na RMSP em povoamentos de eucalipto do seu entorno, considerando diferentes reduções na área anualmente disponível, diferentes produções de biossólido e diferentes doses de aplicação no campo

Produção de biossólido ¹	Dose de aplicação no campo ²	Demanda de área ³	Redução na área disponível anualmente			
			0%	25%	50%	75%
(Mg ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(ha)	Raio de consumo (km) ⁴			
60.549	5	12.110	38	44	62	74
66.683	5	13.337	38	49	62	78
158.293	5	31.659	63	72	84	120
60.549	10	6.055	37	38	38	62
66.683	10	6.668	37	38	38	62
158.293	10	15.829	44	58	63	84
60.549	20	3.027	32	34	37	38
66.683	20	3.334	32	34	37	38
158.293	20	7.915	38	38	44	63

¹Em base seca, com base na Tabela 3.3. ²Em base seca. ³Área necessária para consumir a produção anual de biossólido, considerando a dose de aplicação no campo. ⁴Distância que consumiria a produção anual de biossólido, considerando a dose de aplicação no campo e os dados da Tabela 3.2.

Na situação mais favorável, onde seria produzida a menor quantidade de biossólido nas ETEs, utilizada a maior dose de aplicação no campo e nenhuma redução na área anualmente disponível, observa-se um raio de consumo de apenas 32 km. Em um cenário menos favorável, produção da maior quantidade de biossólido nas ETEs, uso da menor dose de aplicação no campo e redução de 75% na área anualmente disponível, o raio de consumo de eleva-se para 120 quilômetros de distancias da ETEs da RMSP.

Diversos fatores podem afetar a intensidade de aumento na produção futura de biossólido na RMSP, dentre os quais o amento populacional nessa região, o aumento na coleta ou tratamento dos esgotos domésticos e mesmo a mudança no nível de consumo da população. A produção de esgoto doméstico no Brasil situa-se entre 80 a 200 L hab⁻¹ dia⁻¹ sendo que, de modo geral, cada habitante produz cerca de 150 g dia⁻¹ de lodo centrifugado (ALÉM SOBRINHO, 2001). Segundo o autor, a quantidade e as características do resíduo gerado nas ETEs depende basicamente da composição do esgotos coletados, do tipo de tratamento utilizado e do tipo de condicionamento para desidratação empregado (cloreto férrico e cal ou polímeros). Alguns tratamentos reduzem sua massa (ex. digestão) enquanto outros aumentam (adição de cal para controle de patógenos). Assim, no resíduo podem ser encontrados também produtos químicos utilizados no próprio tratamento, como cloreto férrico, sulfato de alumínio, cal, polímeros etc. Mesmo na mesma ETE, sob o mesmo tratamento as características do resíduo podem variar anualmente, sazonalmente, ou mesmo diariamente, devido à variação no esgoto coletado e no processo de tratamento (ESTADOS UNIDOS, 1999). O autor afirma ainda que quanto maior o grau do tratamento tanto maior será a quantidade de resíduo produzida e menor a concentração de contaminantes no efluente produzido. Certamente a SABESP realizou as devidas considerações para elaborar as projeções futuras de produção de biossólido que foram utilizadas nos cenários elaborados.

A taxa mais adequada de aplicação de biossólido em eucaliptos depende de diversos fatores, os mais importantes são as características edáficas e de clima dos sítios florestais e a composição química e biológica do biossólido. O conhecimento da composição do biossólido é imprescindível para a determinação de taxas de aplicação que atendam as necessidades nutricionais das plantas, especialmente em relação ao nitrogênio, e que não causem efeitos prejudiciais ao homem e ao ambiente. Embora tenha encontrado uma taxa de 28 Mg ha⁻¹ em base seca, Faria (2000) alerta que, quando utilizados critérios econômicos, taxas dessa magnitude dificilmente seriam operacionais. Com base em avaliações experimentais e testes operacionais

em uma empresa florestal, espera-se que a taxa de aplicação de biofóssido em eucaliptos não supere 10 Mg ha^{-1} , em base seca (GAVA; OLIVEIRA, 2006; VAZ; GONÇALVES, 2002). Outro aspecto contrário ao uso de altas taxas de aplicação de biofóssido é que os acréscimos de produção necessários para viabilização econômica não seriam realísticos, principalmente devido ao elevado custo de transporte do biofóssido até as áreas florestais ocasionado pela sua elevada taxa de umidade (Faria, 2000). Por exemplo, considerando o teor médio de sólidos no biofóssido da RMSF de 29% (Tabela 3.3), a dose de 28 Mg ha^{-1} em base seca obtida por Faria (2000) equivaleria a 97 Mg de massa que teriam que ser transportados em um hectare. Nesse caso, provavelmente o custo do transporte em distâncias longas seria anti-econômico, independentemente de quem pagasse por ele, ETEs ou produtores. Na Suécia são aplicadas biofóssidos em taxas médias equivalentes a 15 kg de P por hectare (LUNDIN et al., 2004). Na Nova Zelândia o biofóssido vem sendo aplicado em povoamento de pinus após o desbaste e desrama, aos 8 anos de idade, repetindo-se a aplicação a cada 3 anos (KIMBERLEYA et al., 2004). Nos EUA, quando a taxa de aplicação do biofóssido excede a necessidade da cultura ela é considerada como disposição superficial, caso contrário é como utilização agrícola (ESTADOS UNIDOS, 1999). A título de padronização de denominações, seria recomendável que essa consideração também fosse adotada no Brasil.

O nível de redução na área com eucaliptos anualmente disponível para uso do biofóssido dependerá, de acordo com a resolução do CONAMA, de aspectos relacionados aos sítios florestais, como por exemplo declividade do terreno e proximidade de corpos d'água. Infelizmente a base de dados não permitiu a quantificação exata desse percentual. Os cenários elaborados neste estudo apresentam diferentes condições de uso, desde muito favoráveis (onde 100% das áreas poderiam ser utilizadas) até muito desfavoráveis (onde apenas 25% das áreas poderiam ser utilizadas). Entretanto, é importante salientar que o efetivo uso do biofóssido não está condicionado a disponibilidade de áreas de eucalipto para sua utilização, mas sim do interesse dos produtores. Certamente ocorrerão situações em que mesmo tendo áreas disponíveis e aptas ao uso do biofóssido, simplesmente o produtor não deseje utilizá-lo por diversas razões. Uma possibilidade seria o receio de empresas florestais que possuem certificação ambiental, visto que o biofóssido ainda sofre preconceito devido a sua origem, os dejetos humanos. Nesse aspecto, Dunn (2000) afirma que a despeito das normas regulatórias para a utilização do biofóssido, a aceitação pública pode ser uma fonte de regulação mais restritiva ainda. Por isso, é sempre

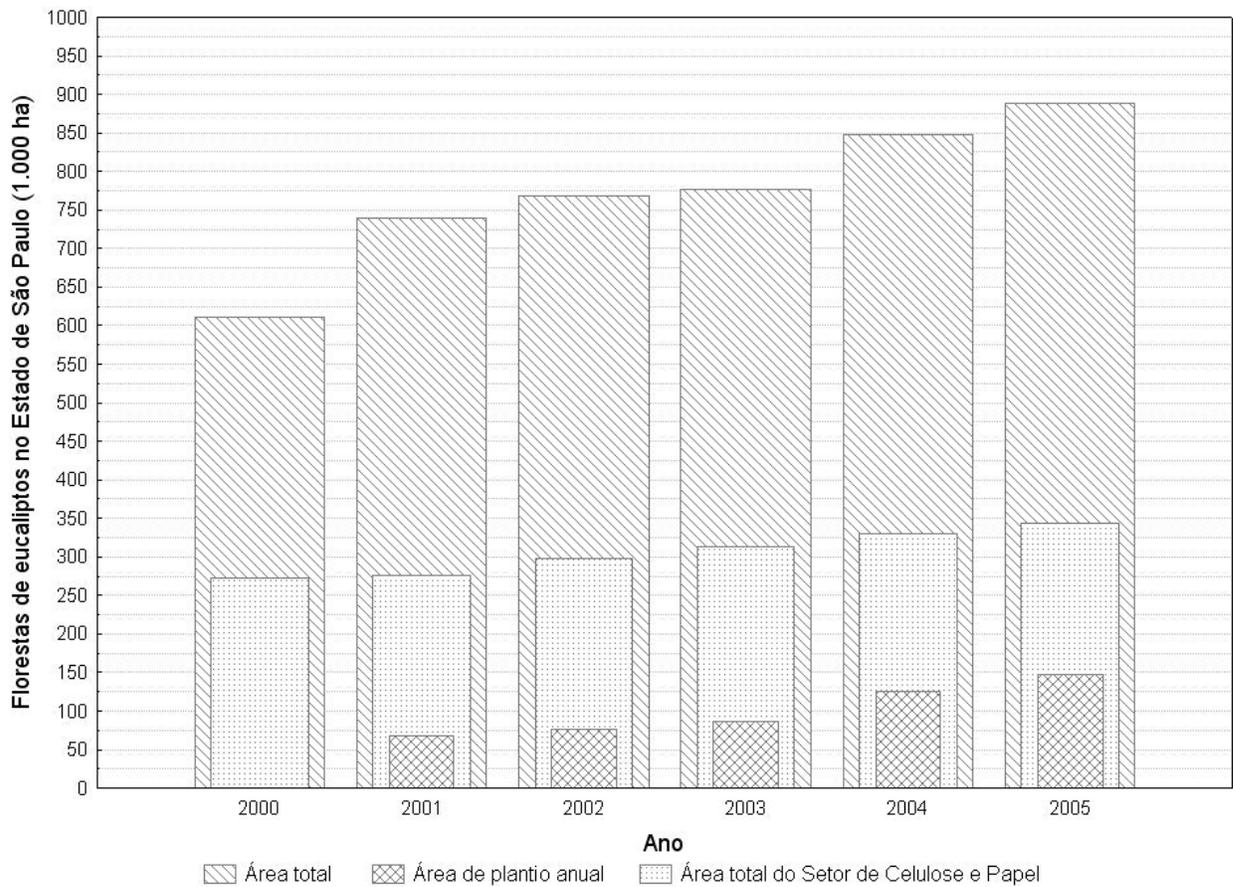
importante considerar os impactos negativos do projeto do ponto de vista da vizinhança. A maioria das reclamações se refere ao tráfego de caminhões nas áreas, ao odor e ao impacto visual. Minimizando esses aspectos o projeto terá grandes chances de aceitação pública (ESTADOS UNIDOS, 2000). Riekerk (2000) e Estados Unidos (2000) afirmam que a aversão dos produtores e consumidores das culturas fertilizadas com biofóssido pode inviabilizar sua adoção em escala comercial. Afirmam ainda que programas de esclarecimento dos proprietários rurais e demais atores envolvidos é a única forma de contornar o problema. Segundo Estados Unidos (1999) a percepção social do reuso do biofóssido quase nunca é baseada em critérios científicos e geralmente não é associada ao grau de risco aos seres humanos ou ao ambiente que essa prática pode proporcionar. Segundo o autor, a rejeição pública ao uso agrícola do biofóssido pode ser reduzida pela combinação de manejo adequado e investimento em programas informativos e de marketing.

No caso do Estado de São Paulo, deve-se considerar ainda que a maior parte das florestas de eucaliptos pertence a empresas que praticam a silvicultura intensiva. Nesse caso, a gestão do uso do biofóssido (escolhas das áreas aptas, monitoramento da atividade, contratos entre gerador e usuário, etc) poderia ser mais simples do que trabalhar com um grande número de pequenos produtores.

Fundação Florestal e Fundo Florestar (2006), utilizando informações de diversas origens, estimam que foram implantados (reforma e plantio de novas áreas) 146.515 ha de eucaliptos no Estado de São Paulo, somente no ano de 2005. Para a Sociedade Brasileira de Silvicultura (2006) o valor seria de 79.500 ha somente entre seus associados. De qualquer forma, em ambos os casos os valores ainda são maiores do que o estimado nesse estudo para a área anualmente disponível ao uso do biofóssido (vide Tabela 3.2). Outro ponto a considerar é que as informações referentes às áreas de eucaliptos que satisfaziam aos objetivos e foram utilizadas neste estudo referem-se ao ano base de 2000. Todavia tem-se observado um crescente aumento nas áreas implantadas (reforma e plantio) dessa cultura no Estado de São Paulo (Figura 3.3).

Considerando apenas as áreas de plantio anual, observou-se um aumento médio anual de 19.850 ha no período de 2001 a 2005. Dessa forma, pode-se considerar que a demanda potencial apresentada neste estudo, apesar de promissora para o uso de biofóssido em eucaliptos, provavelmente ainda está subestimada. Segundo Castanho Filho (2006), o investimento em plantio de florestas de eucalipto tende a se intensificar ainda com mais intensidade no Estado de

São Paulo, aproveitando-se das condições tanto ecológicas como econômicas que se apresentam aos produtores rurais.



Fonte: Adaptado de Fundação Florestal e Fundo Florestar (2006); IEA/Cati⁵ apud Fundação Florestal e Fundo Florestar (2006) e Kronka et al. (2002).

Obs.: Para o ano de 2000 não existe valor para a “Área de plantio anual” e a “Área total” baseia-se em Kronka et al. (2002), mesma base de dados deste estudo.

Figura 3.3 - Evolução da área com florestas de eucaliptos no Estado de São Paulo no período de 2000 a 2005

3.4 Conclusões

Nesse estudo conclui-se que existe uma elevada demanda potencial pelo biossólido gerado nas ETEs da RMSP nos povoamentos de eucaliptos do seu entorno em distâncias curtas de transporte rodoviário, mesmo considerando que a maior parte das áreas apresentam algum tipo de restrição ao uso.

⁵ IEA = Instituto de Economia Agrícola; Cati = Coordenadoria de Assistência Técnica Integral.

Referências

- ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap. 2, p. 7-40.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**. Brasília, ABRAF, 2006. 80p.
- BESIGNANO, R.; POKOCKY, K. Using a GIS-based Model to Determine Agricultural Lands Suitable for Biosolid Application in Whiteside County, Illinois. University of Guelph, Department of Geography. Canada, Winter 2004. 1v.
Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2004/Group03>.
Acesso em: 30 ago. 2005.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **DOU**, Brasília, 30 de ago. 2006, 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2006>>. Acesso em: 22 abr. 2007.
- CASTANHO FILHO, E.P. Eucalipto: demanda crescente. *Florestar Estatístico*. Fundo Florestar; São Paulo, v.9, n.18, p.9-13, nov. 2006.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano diretor de uso e disposição dos lodos das ETEs da RMSP - Aterro Exclusivo**. 2005.
Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/a_sabesp/tecnologia/apresentacao/plano_diretor_aterro_exclusivo.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2006.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual Técnico P 4.230 jan./99. Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação. São Paulo, CETESB, 1999. 33p.
- DUNN, J.A. **Reclamation Using Biosolids: a primer on economics and other concerns**. In: MINING, FOREST AND LAND SYMPOSIUM, July, 2000. [s.l.:s.n.] 1v.. Disponível em: <http://www.rmwea.org/tech_papers/mine_forest_land_2000/Dunn.pdf>. Acesso em: 25 out. 2005.
- EDITORA ABRIL S.A.; MAPLINK. CD-ROM Guia Quatro Rodas Rodoviário 2004. Versão 1.0. São Paulo, 2003. 1 CD-ROM
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Municipal and Industrial Solid Waste Division, Office of Solid Waste. **Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States**. EPA530-R-99-009. Washington, D.C. September, 1999. 81p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/compost/biosolid.pdf>> Acesso em: 10 out. 2005.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Water. **Biosolids Technology Fact Sheet: Land Application of Biosolids**. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C.: September, 2000. 1v. Disponível em: <http://www.epa.gov/owm/mtb/land_application.pdf> Acesso em: 25 out. 2005.

FARIA, L. C. de **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 Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FUNDAÇÃO FLORESTAL; FUNDO FLORESTAR. **Florestar Estatístico**. São Paulo, v.9, n.18, 98p., nov. 2006.

GAVA, J.L.; OLIVEIRA, F.C. A experiência da Suzano Papel e Celulose com o uso do biossólido em plantios de eucalipto. In: SIMPÓSIO SOBRE O USO DO BISSÓLIDO EM PLANTACÕES FLORESTAIS. IPEF: Piracicaba, 24 e 25 de maio de 2006. 1v. Disponível em: <http://www.ipef.br/eventos/2006/biossolidos/Simposio_Biossolidos_07.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2006.

KAYS, J.S.; FLAMINO, E.J., FELTON, G.; FLAMINO, P.D. Use of deep-row biosolids applications to grow forest trees: a case study. In: HENRY, C.L.; HARRISON, R.B.; BASTIAN, R.K. **The forest alternative**: principles and practice of residuals use. Seattle, WA: University of Washington College of Forest Resources, 2000. chap.1, p.105-110. Disponível em: <http://www.naturalresources.umd.edu/Pages/Biosolids_Paper_1.html>. Acesso em: 13 out. 2005.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

KIMBERLEYA, M.O., WANG, H., WILKSB, P.J., FISHERB, C.R., MAGESANA, G.N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.189, p. 345-351, 2004.

KRONKA, F.J.N.; NALON, M.A.; MATSUKUMA, C.K.; PAVÃO, M.; YWANE, M.S.S.; KANASHIRO, M.M.; LIMA, L.M.P.R.; PIRES, A.S.; SHID, C.N.; FUKUDA, J.C.; GUILLAUMON, J.R. **Inventário florestal das áreas reflorestadas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2002. 183p.

LUNDIN M.; OLOFSSON M., PETTERSSON; G.J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.41, p. 255-278, 2004.

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

MUCHOVEJ, R.M.; OBREZA; T.A. **Biosolids**: Are These Residuals All the Same? SS-AGR-167, Series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published June 2001. Reviewed April 2004. 3p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/AG114>>. Acesso em: 3 set. 2005.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo**: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo: Nobel, 1979. 549p.

RAIJ, B. van Uso agrícola de bio-sólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.147-151.

RIEKERK, H. Waste Utilization in Forest Lands of Florida. Circular 734, Series of the Department of Forest Resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Date reviewed; March 2000. 1v. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/FR028#copy>>. Acesso em: 5 set. 2005.

SILVÉRIO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto, da matéria orgânica do lixo urbano e de resíduos industriais. **O Agrônomo**, Campinas, v. 1, n. 56, p. 5-8, 2004.

SOARES, M.T.S.; GONÇALVES, J.L.M.; ALVAREZ, L.; MELFI, A.J.; TEIXEIRA, C. M.; FEIGL, B.J. Uso de bio-sólido em povoamentos de eucalipto em solos degradados e não degradados: transferência de nitrogênio. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2002, Belo Horizontes. **Anais...** Belo Horizonte: SOBRADE, 2002. p. 221-223.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo: SBS, 2006. 106p.

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

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

4 PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DO *Eucalyptus grandis* FERTILIZADOS COM BIOSSÓLIDO

Resumo

Avaliou-se, aos 99 meses de idade, a produção de madeira em um ensaio de *Eucalyptus grandis*, conduzido em um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico, fertilizado com doses de biossólido variando de 5 a 40 Mg ha⁻¹, com e sem a complementação de fósforo e potássio minerais no plantio, e a fertilização mineral convencional para essa cultura. Num inventário prévio foram medidos os DAP e as alturas das árvores e posteriormente, por meio da cubagem rigorosa, foram determinados o volume de madeira produzido e o fator de forma das árvores. O uso do biossólido complementado com K e P resultou em aumentos significativos no DAP e na altura total das árvores de *E. grandis*, sendo que o melhor resultado foi observado quando houve associação do biossólido com os dois nutrientes. O tratamento envolvendo uma dose de 10 Mg ha⁻¹ complementado com potássio e fósforo minerais no plantio proporcionou um aumento de 52% no volume total de madeira com casca, quando comparado com a testemunha, resultado semelhante ao observado na adubação mineral. Doses maiores de biossólido não melhoraram os resultados, e a ausência de complementação mineral impediu também a expressão de bons resultados nas variáveis analisadas. A forma das árvores não se alterou significativamente entre tratamentos. O estudo conclui (i) que o uso de biossólido complementado com K ou P separadamente resulta em aumentos de produção de madeira em *E. grandis*, sendo melhores ainda os resultados quando se associaram simultaneamente esses dois nutrientes; (ii) que o biossólido pode substituir parcialmente adubos químicos na adubação de base e integralmente os fertilizantes usados convencionalmente na adubação de cobertura em plantios de *E. grandis*, sem prejuízo da produtividade; (iii) que o biossólido e fertilizantes minerais não afetam a forma do fuste das árvores de *E. grandis*, sendo as diferenças volumétricas observadas atribuídas ao aumento nas suas dimensões.

Palavras-chave: Biossólido; Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; *Eucalyptus* spp; Produção de madeira; Fertilizante orgânico

Abstract

The wood production of *Eucalyptus grandis* stands at age 99 months was evaluated. The soil of the experimental area was characterized as a Dystrophic Red-Yellow Latosol. These specie were submitted to different dosages of biosolids produced in sewage treatment plants. Dosages varied from 5 to 40 Mg ha⁻¹ and in some treatments were complemented with mineral fertilizers. The evaluation consisted of measuring height, diameter at breast height (DBH) and trees' taper (shape factor). The use of biosolids supplemented with K and P resulted in substantial increases in DBH and total height. The treatment involving a dosage of 10 Mg ha⁻¹ complemented with phosphorus and potassium resulted in an increase of 52% in relation to the control treatment, similar to the results observed in the plots fertilized only with mineral nutrients. Higher dosages of biosolids did not produce better results and the absence of mineral

supplementation reflected no significant effect on the variables evaluated. The tree taper factor was not significantly affected by any treatments. It was concluded that (i) the use of biosolids supplemented with either K or P increased the wood production of *E. grandis*, although the best result is provided with the simultaneous association of these two nutrients; (ii) biosolids can partially replace mineral fertilizers at the planting phase and can totally substitute mineral fertilizers on post planting fertilizations without affecting productivity in *E. grandis* plantations; (iii) the taper factor of the *E. grandis* trees was not affected by any biosolids or combination of biosolids with mineral fertilizers, the differences in volumes being attributed only to the variation on trees' dimensions.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Eucalypts stands; *Eucalyptus* spp; Wood production

4.1 Introdução

A gestão de resíduos é um dos grandes desafios nas grandes cidades contemporâneas, dentre os quais se destaca o produzido no tratamento de esgoto doméstico. Denominado de lodo de esgoto ou, mais recentemente, de biossólido, ele apresenta em sua composição predominantemente orgânica teores razoáveis de nutrientes para as plantas. Por isso tem sido utilizado em vários países como fertilizante orgânico e condicionador de solos em culturas florestais. Para Corrêa e Corrêa (2003), essa forma de utilização é importante porque retorna ao solo parte da matéria orgânica e dos nutrientes transferidos dos solos agrícolas para os resíduos urbanos. Deve-se considerar ainda que o retorno do biossólido para essas áreas é importante também para a redução da pressão sobre as fontes naturais de nutrientes químicos. Além de nutriente para as plantas, o biossólido possui um teor significativo de matéria orgânica, cujos efeitos positivos no solo têm sido comprovados por diversos autores (BESIGNANO e POKOCKY, 2004; ESTADOS UNIDOS, 2000; KIEHL, 1985; MUCHOVEJ e OBREZA, 2004). A matéria orgânica aumenta a atividade microbiana, melhora a circulação de água e a aeração, sendo a principal responsável pela estruturação física do solo, o que resulta em condições mais favoráveis para o crescimento das plantas (PRIMAVESI, 1979; RAIJ van, 1998).

O aumento de produção de espécies florestais devido ao uso do biossólido tem sido comprovado por diversos pesquisadores, em diferentes países, sendo sua magnitude dependente da espécie utilizada, das características do resíduo e das condições ambientais locais. Kimberleya et al. (2004), avaliaram a aplicação de biossólido em *P. radiata* com 6 anos de idade, estabelecido em um solo arenoso de baixa fertilidade. A aplicação foi realizada em outubro de 1997 com reaplicação em novembro de 2000. Após 5 anos de aplicação foram obtidos os

volumes de madeira de 75,4 m³ ha⁻¹ para o controle, 99,3 e 112,0 m³ ha⁻¹ para as taxas de aplicação equivalentes a 300 e 600 kg de N por hectare, respectivamente. McNab e Berry (1985) aplicando 34 Mg ha⁻¹ de biossólido, base seca, em uma área degradada no Estado da Geórgia (EUA) verificaram, após 5 anos do plantio, aumento de 92 e 300% na produção de biomassa total em *P. echinata* e *P. taeda*, respectivamente, em comparação com a fertilização mineral (896 Mg ha⁻¹ de NPK 10-10-10 + 1.417 Mg ha⁻¹ de CaO). Em condições brasileiras o assunto é ainda pouco estudado, resultados preliminares indicam ganhos de produtividades das espécies com efeitos adversos dentro de limites legalmente aceitáveis. Mesmo assim, Besignano e Pokocky (2004) recomendam que a aplicação do biossólido deva ser controlada de modo a se evitar certo nível de risco ao ambiente devido aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na matrix do solo. Deve-se considerar, ainda, que a aplicação inadequada ou excessiva de biossólido pode levar a redução da produção vegetal devido à deficiência ou desbalanço nutricional nas plantas e resultar na contaminação de águas subterrâneas por nitratos. Por isso é de extrema importância a implantação de experimentos de campo que indiquem a melhor taxa de aplicação para as diferentes culturas, em termos técnicos, econômicos e ambientais.

Este estudo objetiva avaliar a resposta volumétrica de plantas de *Eucalyptus grandis* quando fertilizadas com diferentes doses de biossólido, em comparação com a fertilização mineral convencional para essa cultura.

4.2 Materiais e Métodos

O presente trabalho é parte de um projeto multi-disciplinar que avaliou vários aspectos da aplicação de biossólido em povoamentos de eucaliptos. Dentre os quais citam-se os estudos conduzidos por Andrade (1999, 2004), Barreiros (2005), Faria (2000), Fortes Neto (2000), Guedes (2000, 2005), Martins (2002), Rezende (2005), Rocha (2002) e Vaz (2000), dentre outros.

O experimento foi conduzido no Município de Itatinga, SP, situado entre os paralelos 23° 02' 01" e 23° 02' 30" latitude sul e os meridianos 48° 37' 30" e 48° 38' 34" longitude oeste de Greenwich, cerca de 220 km da cidade de São Paulo, com altitude média de 830 metros. De acordo com Guedes (2005), o clima local é do tipo mesotérmico úmido, segundo classificação de Köppen, com precipitação média mensal do 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%, com precipitação média anual é de 1.635mm. O balanço hídrico apresenta um excedente de 762 mm, e déficit de 3 mm nos meses de julho e agosto, com uma evapotranspiração potencial de 877 mm, e capacidade de armazenamento do solo de 150 mm.

O biossólido utilizado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), localizada em Barueri, SP. O sistema de tratamento utilizado na época foi o de lodos ativados convencionais com aeração por ar difuso e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários e posterior estabilização do lodo com cal hidratada e cloreto férrico. Entretanto a partir de setembro de 2000 a SABESP utiliza polímero catiônico para o condicionamento do lodo em substituição a cal hidratada e o do cloreto férrico. A caracterização química do biossólido pode ser observada na Tabela 4.1. Na época ele foi caracterizado como biossólido tipo B, de acordo com as normas da CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1999).

Tabela 4.1 - Caracterização química do biossólido aplicado na área de estudo. Valores totais expressos em base seca

N	P	K	C org.	Ca	Mg	SO₄⁻	pH (CaCl₂)
----- (g kg ⁻¹) -----							
19	9	2	172	86	4	7	10,6
Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb
----- (mg kg ⁻¹) -----							
55.056	900	258	1.632	ND	258	222	82

Fonte: Adaptado de Guedes (2005)

ND = abaixo do limite de detecção do método utilizado.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 4.2). Esse tipo de solo é representativo das áreas onde, hoje, se pratica a silvicultura intensiva do eucalipto no Estado de São Paulo.

O experimento foi instalado em março de 1998 com mudas de *Eucalyptus grandis* originadas de sementes e foi conduzido sob o sistema de cultivo mínimo. A aplicação do biossólido foi realizada em julho de 1998 com umidade natural aproximada de 60% (base úmida), entretanto, as taxas de aplicação foram calculadas em base seca. A aplicação superficial foi realizada entre as linhas de plantio (faixa de 2 m), deixando, aproximadamente, meio metro de

distância das mudas. O experimento foi implantado em quatro blocos casualizados, distribuídos em função da declividade existente na área. O espaçamento de plantio utilizado foi de 3 m entre linhas e 2 m entre plantas, com um total de 36 plantas úteis em cada parcela.

Tabela 4.2 - Características químicas, granulometria e teores de óxidos de ferro, alumínio e silício do solo da área experimental

Características químicas												
Prof.	pH _{CaCl2}	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V%	m%
cm	g dm ⁻³			mmol dm ⁻³								
0 - 30	4,0	16	1	1,2	1	1	34,4	7	3	37	9	69
30 - 60	4,0	15	1	0,5	1	1	31,0	6	3	34	7	71
60 - 90	4,1	14	1	0,3	1	1	28,0	5	2	30	8	68

Granulometria e teores de óxidos de ferro, alumínio e silício							
Prof.	Argila	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
cm	g kg ⁻¹						
0 - 30	168	532	241	59	25,0	64,0	45,0
30 - 60	190	495	266	49	27,4	64,0	47,0
60 - 90	197	496	278	29	28,8	76,0	48,0

Fonte: Adaptado de Andrade (1999)

Prof. = Profundidade

Os tratamentos utilizados foram os seguintes: testemunha absoluta (**T**), doses de 5, 10, 15, 20 e 40 Mg ha⁻¹ de biofósforo complementado com K no plantio, (**5t+K**, **10t+K**, **15t+K**, **20t+K** e **40t+K**, respectivamente); 10 Mg ha⁻¹ de biofósforo (**10t**); 10 Mg ha⁻¹ de biofósforo complementado com K e P no plantio (**10t+KP**) e adubação mineral (**AM**). A adubação mineral foi realizada da seguinte forma: 1,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total); 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (sulco de plantio); 80 kg ha⁻¹ de NPK 20-0-20 (45 dias pós-plantio); 180 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% B + 0,5% de Zn (6 meses pós-plantio) e 240 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% B + 0,5% de Zn (12 meses pós-plantio). Para a complementação com P foram adicionados 80 kg ha⁻¹ NPK 0-45-0 no plantio. Para a complementação com K foi adicionado KCl (60% de K₂O) até igualar a quantidade de K colocada no tratamento com adubação mineral (137 kg ha⁻¹).

Aos 99 meses após o plantio foi realizada a medição das alturas totais (HT) e dos diâmetros das árvores a 1,30 m do solo (DAP), estes foram distribuídos em classes com amplitude de 2 cm, sendo abatidas e cubadas três árvores em cada classe. Nas árvores abatidas foram medidos os diâmetros na base e a cada dois metros ao longo do seu fuste, até um limite definido como cinco centímetros (diâmetro comercial). Foram medidas também a espessura de casca em cada

diâmetro, a altura total (HT) e a altura comercial do tronco (HC). O volume total das árvores foi obtido pela soma dos volumes de cada seção do tronco até a HT e o volume comercial até a HC. O volume de cada seção do tronco (torete) foi calculado utilizando a metodologia de Smalian e a forma da ponta foi considerada como cilíndrica. O volume por parcela foi obtido pelo produto do volume médio pelo número de árvores em cada classe de DAP, o qual foi convertido em volume por hectare. O fator de forma de cada árvore foi calculado dividindo-se seu volume cilíndrico pelo volume real, obtido na cubagem. O volume cilíndrico foi calculado pela seguinte fórmula:

$$V_{cil} = \left(\frac{\pi}{40000} \right) \times DAP^2 \times HT \quad (1)$$

em que:

V_{cil} = Volume cilíndrico de madeira (m³ por árvore);

DAP = diâmetro a 1,30 m (cm); e

HT = altura total da árvore (m).

4.3 Resultados e discussão

A Tabela 4.3 apresenta os resultados do inventário realizado antes da cubagem das árvores. Verifica-se que o número de arvores remanescentes não foi igual para todos os tratamentos. Entretanto os valores para a mortalidade ainda são semelhantes aos estimados por Díaz e Couto (1999) em povoamentos florestais de *E. grandis* de algumas regiões do Estado de São Paulo. Os autores estimaram valores de 9,6 a 14,4% para a mortalidade da primeira talhadia.

No caso de árvores originadas de sementes, como as do experimento, os potenciais genéticos são diferentes e por isso a competição entre elas não ocorre de forma igualitária. A mais vigorosa domina as menores e suprimidas, fazendo com que luz, nutrientes e água sejam fornecidos em quantidades aquém da necessária para seu perfeito metabolismo (FINGER; SCHNEIDER; KLEIN, 1993; SCOLFORO, 1998). Conseqüentemente, as árvores suprimidas passam a realizar a fotossíntese apenas para equilibrar o gasto energético da respiração não ocorrendo, assim, taxa de crescimento. Prevalendo essa situação a árvore suprimida acaba morrendo, o que leva a redução da população e, conseqüente, a redução do volume total produzido.

Tabela 4.3 - Número de árvores, altura total, DAP e volume cilíndrico das árvores do experimento com o uso de bio sólido em *Eucalyptus grandis*, aos 8 anos e 3 meses de idade

Árvores (n° trat. ⁻¹)			DAP (cm)		Altura Total (m)		Volume cilíndrico (m ³ árvore ⁻¹)		
Trat.	R	M	Total	Trat.	Média	Trat.	Média	Trat.	Média
10t	138	6	144	10t	12,6 a	10t	18,8 a	10t	0,2823 a
15t+K	135	9	144	T	12,7 a	T	19,4 a	T	0,3053 a
5t+K	133	11	144	20t+K	14,3 b	20t+K	20,9 b	20t+K	0,3884 b
T	131	13	144	5t+K	14,7 bc	40t+K	21,4 bc	40t+K	0,4228 bc
AM	130	14	144	40t+K	14,8 bc	5t+K	21,6 bcd	5t+K	0,4230 bc
10t+KP	129	15	144	15t+K	15,0 bc	15t+K	21,9 cd	15t+K	0,4370 bc
20t+K	128	16	144	AM	15,1 bc	10t+K	22,1 cd	10t+K	0,4511 c
10t+K	125	19	144	10t+K	15,1 bc	10t+KP	22,1 cd	AM	0,4545 c
40t+K	123	21	144	10t+KP	15,5 c	AM	22,5 d	10t+KP	0,4574 c
Geral	1.172	124	1.296						

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Fisher, a 5% de probabilidade.

Trat.=Tratamento; R=Remanescentes e M=Mortas

O uso do bio sólido, completado com K e P, resultou em aumentos significativos no DAP, altura total e volume cilíndrico das árvores de *E. grandis*, sendo melhor resultado obtido pela associação dos dois nutrientes. Os aumentos foram semelhantes, inclusive, a da adubação mineral convencional. Na ausência da complementação, entretanto, não houve aumento em nenhuma das variáveis avaliadas. Tal resultado evidencia a necessidade de complementação do bio sólido com fertilizantes minerais para a obtenção das maiores produtividades e que os conteúdos de K e P, adicionados via bio sólido, não foram capazes de suprir as necessidades das plantas por esses nutrientes. Deve-se considerar que os solos brasileiros em que concentram-se os reflorestamentos no Estado de São Paulo caracterizam-se pela baixa reserva de nutrientes, acidez elevada e altos teores de Al. Segundo Silveira e Gava (2003), nesses solos a deficiência de fósforo tem sido freqüentemente menos encontrada do que a de potássio e boro. Tendo em vista que o bio sólido apresenta teores razoáveis de N, P e K, e outros nutrientes na forma orgânica, sua aplicação contínua nas áreas florestais poderia contribuir para a manutenção da fertilidade nesses locais.

Na Tabela 4.3 verifica-se também que as maiores doses de bio sólido não foram as repensáveis pelas maiores produções. Resultado semelhante foi obtido por Vaz e Gonçalves (2002) analisando o mesmo experimento aos 6 e 13 meses pós-aplicação do bio sólido. Esses

autores verificaram também a redução dos teores de matéria orgânica (MO) com a elevação das doses de bio sólido. As maiores reduções foram observadas aos seis meses pós-aplicação para as maiores doses (20 e 40 Mg ha⁻¹). Esse aumento foi atribuído ao efeito “priming”, em que a presença de compostos facilmente degradáveis aumenta a atividade microbiana do solo. Avaliando o mesmo experimento, Andrade (2004), afirma ainda que após a exaustão da MO facilmente degradável em um curto período, pode ter sido induzida a degradação da MO orgânica original do solo. Segundo o autor, essa degradação foi a forma de manutenção da elevada atividade microbiana, tendo em vista que sua maior proporção é **recalcitrante**¹. Vaz e Gonçalves (2002) afirmam ainda que como a aplicação do bio sólido foi superficial, distante das raízes (0,5 m das linhas de plantio), a absorção do resíduo por parte da plantas pode ter sido dificultada. Em espécies de eucaliptos as raízes finas, que apresentam maior habilidade de absorção de água e nutrientes, concentram-se nos primeiros 30 cm, principalmente nos solos menos produtivos (GONÇALVES, 1994).

Apesar de a literatura sugerir que o fator de forma das árvores de eucaliptos pode ser alterados pelas intervenções silviculturais como a fertilização, por exemplo, ele não foi influenciado pelos tratamentos do experimento (Tabela 4.4). Assim, as diferenças volumétricas encontradas nos tratamentos se deram exclusivamente as alterações nas dimensões do fuste das árvores e não a mudança de seu formato.

Tabela 4.4 - Fator de forma para as árvores do experimento com *Eucalyptus grandis*

Trat.	Fator de Forma Total (adimensional)		Fator de Forma Comercial (adimensional)	
	Média	EP	Média	EP
T	0,47 a	0,008	0,43 a	0,014
AM	0,48 a	0,006	0,46 a	0,006
5t+K	0,47 a	0,006	0,44 a	0,007
10t+K	0,47 a	0,008	0,46 a	0,009
10t	0,47a	0,006	0,42 a	0,023
10t+KP	0,47 a	0,007	0,45 a	0,014
15t+K	0,46 a	0,006	0,44 a	0,010
20t+K	0,47 a	0,005	0,44 a	0,012
40t+K	0,47 a	0,007	0,44 a	0,014
Geral	0,47	0,002	0,44	0,004

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Fisher, a 5% de probabilidade.

¹ De difícil decomposição por micro-organismos.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado da cubagem das árvores do experimento. Nesse caso não seria adequado o uso de testes estatísticos de médias, uma vez que pela metodologia utilizada as diferenças de volume por hectare são atribuídas ao diferente número de árvores em cada classe de DAP, de cada tratamento, e não as diferenças volumétricas de cada árvore individualmente. No entanto, os resultados são semelhantes aos obtidos para o DAP, HT e volume cilíndrico obtidos no inventário prévio realizado, indicando que o método de amostragem foi adequado.

Tabela 4.5 - Volume de madeira produzido no experimento com o uso de biofósforo em *Eucalyptus grandis*, aos 8 anos e 3 meses de idades

Tratamento	Volume Total		Volume Comercial	
	Com casca	Sem casca	Com casca	Sem casca
----- (m ³ ha ⁻¹) -----				
10t	243,3 (-2)	218,1 (-5)	238,5 (-2)	214,2 (-5)
T	247,3	228,6	242,6	224,5
20t+K	307,1 (24)	281,2 (23)	302,8 (25)	277,7 (24)
40t+K	316,5 (28)	287,9 (26)	312,6 (29)	284,7 (27)
5t+K	325,3 (32)	296,2 (30)	321,0 (32)	292,7 (30)
10t+K	330,2 (33)	303,0 (33)	326,5 (35)	300,0 (34)
15t+K	349,1 (41)	317,1 (39)	345,1 (42)	313,9 (40)
AM	366,1 (48)	340,3 (49)	362,2 (49)	337,0 (50)
10t+KP	375,0 (52)	343,6 (50)	371,4 (53)	340,6 (52)

Obs.: Valores entre parênteses representam à diferença percentual de produção em relação ao tratamento Testemunha.

Os resultados da Tabela 4.5 permitem verificar que o biofósforo teve um efeito positivo sobre a produção de madeira em *E. grandis*. O melhor tratamento com biofósforo e complementação com potássio (15t+K) proporcionou aumento de 41%, em relação a testemunha, com valor semelhante ao da adubação mineral. Em valores absolutos, a complementação do biofósforo com potássio e fósforo (10t+KP) resultou, inclusive, em produção maior do que a fertilização mineral. Isto indica que o biofósforo pode não só substituir parte da adubação mineral convencional de plantio, como também todas as adubações de manutenção subsequentes. Certamente essa redução no nível de uso de insumos, mantendo-se o mesmo nível de produção, é um aspecto favorável ao uso econômico do biofósforo como insumo na produção florestal. Se considerado que o custo do uso florestal do biofósforo seria arcado, pelo menos em parte, pelas ETEs, o resultado é especialmente importante para pequenos produtores de madeira que, normalmente, possuem pouco recurso financeiro para compra de insumos. As ETEs poderiam

inclusive utilizar-se dessa estratégia como marketing social da empresa. É necessário, entretanto, um estudo econômico mais detalhado para que recomendações econômicas responsáveis possam ser propostas, tanto para os silvicultores quanto para os gestores das ETEs.

Verifica-se também na Tabela 4.5 que o aumento das doses não resultou em aumentos de produção de madeira. Vaz e Gonçalves (2002), analisando o mesmo experimento aos 6 e 13 meses de idade, também verificaram a redução no crescimento volumétrico de plantas de eucalipto com o aumento das doses de biofósforo. Esses resultados indicam que a dose que resultaria na maior produção de madeira, na idade de avaliação, se encontra em um nível intermediário dentre as que foram avaliadas no experimento.

4.4 Conclusões

Para as condições do estudo conclui-se (i) que o uso de biofósforo complementado com K e P minerais no plantio resulta em aumentos de produção de madeira em *Eucalyptus grandis*. O melhor resultado foi obtido pela associação do K e P, com níveis de produção semelhantes a fertilização mineral convencional para essa cultura; (ii) que o biofósforo pode substituir parte da adubação de base e toda a adubação de cobertura em plantios de *E. grandis*, sem prejuízo da produtividade; (iii) que a fertilização com biofósforo e fertilizantes minerais não afeta a forma das árvores de *E. grandis*, sendo as diferenças volumétricas observadas atribuídas ao aumento nas dimensões do fuste das árvores.

Referências

ANDRADE, C.A. **Fração orgânica de biofósforos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com eucalipto**. 2004. 121p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ANDRADE, C.A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de biofósforo da ETE de Barueri**. 1999. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BARREIROS, R. M. **Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado**. 2005. 111p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BESIGNANO, R.; POKOCKY, K. Using a GIS-based Model to Determine Agricultural Lands Suitable for Biosolid Application in Whiteside County, Illinois. University of Guelph, Department of Geography. Canada, Winter 2004. 1v.

Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2004/Group03>.

Acesso em: 30 ago. 2005.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação**. São Paulo: CETESB, 1999. 33p. (Manual Técnico P 4.230 jan./99)

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Eficiência agrônômica e produção vegetal de cinco biossólidos aplicados a dois solos tropicais. **Sanare**, Curitiba, v.20, n.20, p. 49-57, jul./dez. 2003.

DÍAZ, M. del P.; COUTO, H. T. Z. do Modelos generalizados para a mortalidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.56, p.101-111, dez. 1999.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Water. **Biosolids Technology Fact Sheet: Land Application of Biosolids**. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C.:

September, 2000. 1v. Disponível em: <http://www.epa.gov/owm/mtb/land_application.pdf>

Acesso em: 25 out. 2005.

FARIA, L. C. de **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 Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P.R. ; KLEIN, J. E.M. Produção de florestas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em segunda rotação, conduzidas com um broto por touça e submetidas a interplântio. **Ciência Florestal Santa Maria**, Santa Maria, v.3, n.1, p. 185-201, 1993.

FORTES NETO, P. **Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas**. 2000. 113p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GONÇALVES, J.L.M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84p. Tese (Livre Docência em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto.** 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciências 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. 168p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos.** São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

KIMBERLEYA, M.O., WANG, H., WILKSB, P.J., FISHERB, C.R., MAGESANA, G.N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.189, p. 345-351, 2004.

MARTINS, L. F. da S. **Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido.** 2002. 73p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

MUCHOVEJ, R.M.; OBREZA; T.A. **Biosolids: Are These Residuals All the Same?** SS-AGR-167, Series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published June 2001. Reviewed April 2004. 3p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/AG114>>. Acesso em: 3 set. 2005.

PRIMAVERESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais.** São Paulo: Nobel, 1979. 549p.

RAIJ, B. van Uso agrícola de biossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.147-151.

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

ROCHA, G. N. da **Monitoramento da fertilidade do solos, 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.

SCOLFORO, J.R. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 441 p.

SILVEIRA, R.L. V. de A.; GAVA, J.L. Nutrição e adubação fosfatada em *Eucalyptus*. Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira, 2003. Piracicaba. **Palestra...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. p.1- 20. Disponível em: < <http://www.rragroflorestal.com.br/divulgacao/pdf/fosforo.pdf> >. Acesso em: 20 jan. 2007.

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

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

5 CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO DE *Eucalyptus grandis* FERTILIZADOS COM BIOSSÓLIDO

Resumo

O tratamento de esgotos urbanos gera uma grande quantidade de um resíduo orgânico, denominado lodo de esgoto ou biossólido, que pode ser reutilizado como fertilizante orgânico e condicionador de solos em culturas florestais. Este trabalho avaliou o efeito de diferentes dosagens de biossólido, com e sem complementação com fertilizantes minerais, e da fertilização mineral convencional sobre o ritmo de crescimento de plantas de *Eucalyptus grandis* através do ajuste de modelos não-lineares de crescimento. Verificou-se que os modelos de Chapman-Richards, Gompertz e Logístico apresentaram bom ajuste, com resultados estatísticos semelhantes. O uso do biossólido complementado com fertilizantes minerais resultou em aumento de produtividade e redução do ciclo produtivo de plantas de *E. grandis*, semelhantemente à fertilização convencional para essa cultura. A utilização de 10 Mg ha⁻¹ de biossólido complementado com K e P no plantio antecipou a rotação volumetricamente ótima em 15 meses com uma produtividade média 29% maior quando comparado com a testemunha. O estudo conclui (i) que o uso de biossólido complementado com fertilizantes minerais no plantio acelera o ritmo de crescimento das plantas de *E. grandis*, proporcionando rotação volumetricamente ótimas de colheita mais curtas com produtividades médias maiores, semelhantemente à da fertilização química convencional para essa espécie e (ii) que o biossólido pode ser utilizado como substituto de parte da fertilização química de plantios e de toda a fertilização de cobertura para povoamentos de eucaliptos, sem prejuízo da produtividade em relação à fertilização química convencional.

Palavras-chave: Biossólido; Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; *Eucalyptus*, Análise do crescimento; Modelos não-lineares; Fertilizante orgânico

Abstract

The treatment of urban sewage generates a large amount of an organic residue called sewage sludge or biosolids, which has been reutilized as organic fertilizer and soil conditioner in forest plantations. In this work the effect on the growth of a *Eucalyptus grandis* stand of different dosages of biosolids, complemented with mineral fertilizers, and the conventional mineral fertilizer is evaluated and biometrically adjusted with nonlinear models. The Chapman-Richards, Gompertz and Logistic models adjusted well with similar statistical results. The use biosolids complemented with mineral nutrients increased wood production and reduced the volumetrically optimal harvesting age, in a similar way when compared to the conventional fertilization. The use of 10 Mg ha⁻¹ of biosolids complemented with K and P anticipated the volumetric optimum rotation in 15 months and incremented wood production in 29% when compared to the control stand. The study concludes (i) that the use of biosolids complemented with mineral fertilizers accelerated tree growth, decreased rotation length and increased wood production in a pattern

similar to the results observed in the sample plot chemically fertilized; and (ii) that the biosolids can partially substitute the use of chemical fertilizers in eucalyptus plantations.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Eucalypts stands; *Eucalyptus* spp; Wood production; Analysis of the growth; Nonlinear models

5.1 Introdução

No Brasil o aumento na coleta e tratamento de esgotos sanitários, associado ao aumento populacional dos centros urbanos, tem elevado de forma preocupante a geração de um resíduo produzido em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), genericamente denominado de lodo de esgoto ou biossólido. Recentemente tem-se intensificado os esforços para desenvolver tecnologias e estratégias de reuso capazes de tirar proveito do conteúdo de nutrientes ou da energia contida nesse material. Uma das alternativas que vem sendo adotada com sucesso em muitos países é seu uso como condicionador de solos e fertilizante orgânico em cultuvas florestais. Para as condições brasileiras, os resultados iniciais das pesquisas indicam que quando a prática é realizada de forma adequada pode resultar em ganhos de produtividades das culturas com efeitos adversos dentro de limites legalmente aceitáveis. A base conceitual da utilização do biossólido como fertilizante orgânico e condicionador de solos é a de retornar ao solo, e aos respectivos ciclos naturais, os nutrientes e a matéria orgânica removida com a produção vegetal (CORRÊA; CORRÊA, 2003). Essa estratégia é importante não só para equilibrar parte desses ciclos, como também pode reduzir a pressão sobre as fontes naturais de nutrientes utilizadas na produção dos fertilizantes químicos. Além de nutriente para as plantas, o biossólido possui um teor significativo de matéria orgânica, cujos efeitos positivos no solo têm sido comprovados por diversos autores. A matéria orgânica aumenta a atividade microbiana, melhora a circulação de água e a aeração, sendo a principal responsável pela estruturação física do solo (BESIGNANO; POKOCKY, 2004; KIEHL, 1985; MUCHOVEJ; OBREZA, 2004; PRIMAVESI, 1979; RAIJ van, 1998). O aumento da produtividade florestal devido ao uso do biossólido tem sido comprovado por vários autores. Kimberleya et al. (2004), avaliaram a aplicação de biossólido em *P. radiata* com 6 anos de idade, estabelecido em um solo arenoso de baixa fertilidade. Após 5 anos da aplicação foram obtidos volumes de madeira de 75,4 m³ ha⁻¹ para o controle, 99,3 e 112,0 m³ ha⁻¹, para as taxas de aplicação equivalentes a 300 e 600 kg de N por hectare, respectivamente. McNab e Berry (1985) aplicando 34 Mg ha⁻¹ de biossólido, base seca, em uma

área degradada no Estado da Geórgia (EUA) verificaram após 5 anos do plantio aumentos de 92 e 300% na produção de biomassa total em *P. echinata* e *P. taeda*, respectivamente, em comparação com a fertilização mineral.

No Brasil os plantios de eucaliptos são potenciais candidatos ao uso do biossólido, principalmente devido ao seu curto ciclo produtivo e a sua grande área plantada. Apenas o Estado de São Paulo conta hoje com aproximadamente 798.522 ha de florestas de eucaliptos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2006). Em um estudo de caso envolvendo a maior ETE da América Latina, a de Barueri (SP), Faria e Rodriguez (2001) concluíram que existe uma grande demanda potencial por biossólido em povoamentos de biossólido do seu entorno, mesmo considerando que a maior parte das áreas reflorestadas apresenta alguma restrições ao uso. Entretanto ainda são poucas as informações que possam subsidiar estratégias de uso florestal do biossólido, principalmente quanto ao efeito do biossólido sobre o ritmo de crescimento das plantas ao longo de seu ciclo produtivo.

Entender como o manejo florestal afeta o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a produção de madeira é uma importante informação para o gestor florestal. O crescimento se refere ao acréscimo nas dimensões (altura, diâmetro, área basal, volume) ou no valor de um sistema orgânico (árvores individuais ou povoamentos) enquanto a produção é relacionada ao seu tamanho final após um período definido de observação. Zeide (1993) afirma que o crescimento de organismos (sobretudo árvores), em longo prazo, segue um padrão comparável e estável. Os modelos não-lineares são mais adequados para avaliar esse crescimento das plantas por representar melhor as relações esperadas, modelando dois fatores opostos que influenciam o crescimento das árvores: a tendência intrínseca de crescimento ilimitado (potencial biótico) e as restrições impostas pelo ambiente e a idade (ZEIDE, 1993). A tendência de expansão prevalece no começo da vida das árvores, enquanto que o declínio do crescimento predomina no final. Uma grande vantagem do uso de modelos não-lineares na área florestal é a compatibilidade entre a função de crescimento acumulado, a de Incremento Corrente Anual (ICA) e a de Incremento Médio Anual (IMA). A função do ICA é obtida pela primeira derivada da função de crescimento e a função do IMA pela divisão da função de crescimento pela idade, obtendo assim o crescimento médio anual. As funções de ICA e IMA fornecem importantes informações para o manejo florestal, podendo ser utilizadas para o planejamento da melhor época para as intervenções no povoamento florestal. O cruzamento das curvas de ICA e IMA, por exemplo,

define a idade volumetricamente ótima de colheita do povoamento. Florestas manejadas por esse critério produzem o maior volume médio de madeira por hectare. Deve-se considerar ainda que a resposta das plantas ao uso do biossólido depende do tempo entre a aplicação e da produtividade inicial do solo. A resposta é proporcionalmente maior em solos mais pobres e deficientes em nitrogênio (HENRY; COLE, 1997; KIMBERLEYA et al., 2004). Para os autores, em povoamentos jovens a resposta é maior nos primeiros anos da aplicação e nos mais velhos ela tende a ser constante e prolongada. Nos EUA as aplicações de biossólido em áreas florestais normalmente são realizadas na fase juvenil das plantas (ESTADOS UNIDOS, 2000).

Com base em um experimento de campo, este estudo objetiva avaliar o efeito do biossólido na dinâmica de crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* através de modelos não-lineares.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Caracterização do experimento

O presente trabalho é parte de um projeto multidisciplinar que avaliou vários aspectos da aplicação de biossólido em povoamentos de eucaliptos. Dentre os quais citam-se os estudos conduzidos por Andrade (1999, 2004), Barreiros (2005), Faria (2000), Fortes Neto (2000), Guedes (2000, 2005), Martins (2002), Rezende (2005), Rocha (2002) e Vaz (2000), dentre outros.

O experimento foi conduzido no Município de Itatinga, SP, situado entre os paralelos 23° 02' 01" e 23° 02' 30" latitude sul e os meridianos 48° 37' 30" e 48° 38' 34" longitude oeste de Greenwich, cerca de 220 km da cidade de São Paulo, com altitude média de 830 metros

De acordo com Guedes (2005), o clima local é do tipo mesotérmico úmido, segundo classificação de Köppen, com precipitação média mensal do 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%, com precipitação média anual é de 1.635mm. O balanço hídrico apresenta um excedente de 762 mm, e déficit de 3 mm nos meses de julho e agosto, com uma evapotranspiração potencial de 877 mm, e capacidade de armazenamento do solo de 150 mm.

O biossólido utilizado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), localizada em Barueri,

SP. O sistema de tratamento utilizado na época foi o de lodos ativados convencionais com aeração por ar difuso e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários e posterior estabilização do lodo com cal hidratada e cloreto férrico. Entretanto a partir de setembro de 2000 a SABESP utiliza polímero catiônico para o condicionamento do lodo em substituição a cal hidratada e o do cloreto férrico. A caracterização química do bio sólido pode ser observada na Tabela 5.1. Na época ele foi caracterizado como bio sólido tipo B, de acordo com as normas da CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1999).

Tabela 5.1 - Caracterização química do bio sólido aplicado na área de estudo. Valores totais expressos em base seca

N	P	K	C org.	Ca	Mg	SO₄⁻	pH (CaCl₂)
----- (g kg ⁻¹) -----							
19	9	2	172	86	4	7	10,6
Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb
----- (mg kg ⁻¹) -----							
55.056	900	258	1.632	ND	258	222	82

Fonte: Adaptado de Guedes (2005)

ND=abaixo do limite de detecção do método utilizado.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 5.2). Esse tipo de solo é representativo das áreas onde, hoje, se pratica a silvicultura intensiva do eucalipto no Estado de São Paulo.

O experimento foi instalado em março de 1998 com mudas de *Eucalyptus grandis* originadas de sementes e foi conduzido sob o sistema de cultivo mínimo. A aplicação do bio sólido foi realizada em julho de 1998 com umidade natural aproximada de 60% (base úmida), entretanto, as taxas de aplicação foram calculadas em base seca. A aplicação superficial foi realizada entre as linhas de plantio (faixa de 2 m), deixando, aproximadamente, meio metro de distância das mudas. O experimento foi implantado em quatro blocos casualizados, distribuídos em função da declividade existente na área. O espaçamento de plantio utilizado foi de 3 m entre linhas e 2 m entre plantas, com um total de 36 plantas úteis em cada parcela.

Tabela 5.2 - Características químicas, granulometria e teores de óxidos de ferro, alumínio e silício do solo da área experimental

Características químicas												
Prof.	pH _{CaCl2}	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V%	m%
cm	g dm ⁻³			mmol dm ⁻³								
0 - 30	4,0	16	1	1,2	1	1	34,4	7	3	37	9	69
30 - 60	4,0	15	1	0,5	1	1	31,0	6	3	34	7	71
60 - 90	4,1	14	1	0,3	1	1	28,0	5	2	30	8	68

Granulometria e teores de óxidos de ferro, alumínio e silício							
Prof.	Argila	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
cm	g kg ⁻¹						
0 - 30	168	532	241	59	25,0	64,0	45,0
30 - 60	190	495	266	49	27,4	64,0	47,0
60 - 90	197	496	278	29	28,8	76,0	48,0

Fonte: Adaptado de Andrade (1999)

Prof. = Profundidade

Os tratamentos utilizados foram os seguintes: testemunha absoluta (**T**), doses de 5, 10, 15, 20 e 40 Mg ha⁻¹ de biofóssido complementado com K no plantio, (**5t+K**, **10t+K**, **15t+K**, **20t+K** e **40t+K**, respectivamente); 10 Mg ha⁻¹ de biofóssido (**10t**); 10 Mg ha⁻¹ de biofóssido complementado com K e P no plantio (**10t+KP**) e adubação mineral (**AM**). A adubação mineral foi realizada da seguinte forma: 1,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total); 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (sulco de plantio); 80 kg ha⁻¹ de NPK 20-0-20 (45 dias pós-plantio); 180 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% B + 0,5% de Zn (6 meses pós-plantio) e 240 kg ha⁻¹ de NPK 16-0-32 + 0,3% B + 0,5% de Zn (12 meses pós-plantio). Para a complementação com P foram adicionados 80 kg ha⁻¹ NPK 0-45-0 no plantio. Para a complementação com K foi adicionado KCl (60% de K₂O) até igualar a quantidade de K colocada no tratamento com adubação mineral (137 kg ha⁻¹).

5.2.2 Análise do Crescimento

A partir dos 26 meses de idade o diâmetro do tronco a altura de 1,30 m do solo (DAP) e a altura total das árvores (HT) do experimento foram medidas periodicamente. A HT foi medida de forma indireta através de aparelhos hipsométricos desenvolvidos para esse fim. As idades de mensuração utilizadas neste estudo foram 26, 31, 38, 59, 65, 71, 81 e 99 meses após o plantio das mudas.

A partir dos dados de DAP e HT foi calculado o volume cilíndrico com casca de cada árvore na parcela utilizando-se a expressão a seguir:

$$V_{cil} = \left(\frac{\pi}{40000} \right) \times DAP^2 \times HT \quad (1)$$

em que:

V_{cil} = Volume cilíndrico de madeira com casca (m^3 por árvore);

DAP = diâmetro a 1,30 m (cm); e

HT = altura total da árvore (m).

A soma dos volumes cilíndricos individuais de cada árvore resultou no volume de madeira produzida por parcela em cada tratamento, o qual foi transformado em volume cilíndrico por hectare nas diferentes épocas de medição. O volume cilíndrico por hectare foi a variável resposta utilizada no ajuste dos modelos não-lineares de crescimento, tendo a idade como variável independente e cada bloco como repetição. A Tabela 5.3 apresenta os modelos não-lineares que foram selecionados para análise neste estudo.

Tabela 5.3 - Modelos não-lineares de crescimento biológicos avaliados

Modelo	Expressão
Chapman-Richards	$V = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 I} \right)^{\beta_2} + \varepsilon$
Gompertz	$V = \beta_0 e^{-\beta_1 e^{-\beta_2 I}} + \varepsilon$
Logístico	$V = \frac{\beta_0}{\left(1 + \beta_2 \cdot e^{-\beta_1 I} \right)} + \varepsilon$
Weibull	$V = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right) + \varepsilon$

Fonte: Adaptado de Zeide (1993)

V = Volume cilíndrico de madeira com casca ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); I = Idade; β_0, β_1 e β_2 = Parâmetros a serem estimados e ε = Erro aleatório Gaussiano.

Os modelos foram ajustados empregando-se o módulo de ajuste de equações não-lineares do programa “Statistica”. O método utilizado foi o de quadrados mínimos ponderados, ajustados de forma iterativa pelo método de Gauss-Newton. Para avaliar qualidade de ajuste dos modelos

foram utilizados os seguintes critérios: análise gráfica da dispersão dos resíduos; soma do quadrado do resíduo; coeficiente de determinação (R^2); nível de significância das estimativas dos parâmetros e Erro Padrão da Estimativa (EPE). A partir do modelo que apresentou o melhor ajuste foram calculados o ICA e o IMA de cada tratamento.

A comparação pareada entre tratamentos, a partir do modelo que apresentou melhor ajuste geral, foi realizada considerando a hipótese nula de que apenas uma curva se ajustaria melhor aos dados dos tratamentos comparados (modelo unificado), contra a hipótese alternativa de que as curvas são distintas (modelos separados). A estatística utilizada para avaliar as hipóteses foi o Teste F, adaptado segundo Motulsky e Christopoulos (2003) da seguinte forma:

$$F = \frac{(SQR_U - SQR_S) / SQR_S}{(GL_U - GL_S) / GL_S} \quad (2)$$

em que:

SQR = Soma do Quadrado do Resíduo; e

GL = Graus de Liberdade

Obs.: os índices “U” e “S” referem-se ao modelo unificado e modelos separados, respectivamente.

5.3 Resultados e Discussão

A Tabela 5.4 apresenta os resultados estatísticos do ajuste dos modelos escolhidos para avaliar o efeito do biossólido da ETE de Barueri no crescimento de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 5.4 - Resultados estatísticos do ajuste dos modelos não-lineares aos dados de crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* fertilizados com o bioossólido da ETE de Barueri

Trat.	M	SQR (m ³ ha ⁻¹)	R ² (%)	EPE (m ³ ha ⁻¹)	Trat.	M	SQR (m ³ ha ⁻¹)	R ² (%)	EPE (m ³ ha ⁻¹)
T	CH	1637,12	85,66	59,43	10t+KP	CH	1493,23	91,14	59,44
	G	1644,70	85,60	59,56		G	1521,36	91,00	59,89
	L	1701,78	85,21	60,37		L	1630,37	90,58	61,28
	W	1656,91	85,52	59,73		W	1523,45	91,03	59,81
AM	CH	528,03	97,26	35,03	15t+K	CH	1182,49	93,84	51,70
	G	547,81	97,16	35,62		G	1204,06	93,76	52,06
	L	687,35	96,63	38,80		L	1310,61	93,39	53,56
	W	586,79	97,03	36,43		W	1212,45	93,74	52,13
5t+K	CH	1267,91	93,38	53,51	20t+K	CH	1342,90	90,41	55,23
	G	1283,27	93,31	53,81		G	1354,67	90,33	55,47
	L	1392,11	92,88	55,51		L	1431,48	89,92	56,63
	W	1305,10	93,23	54,13		W	1367,91	90,27	55,62
10t+K	CH	414,66	97,83	28,77	40t+K	CH	594,05	95,57	36,54
	G	436,40	97,71	29,59		G	621,99	95,40	37,22
	L	564,08	97,12	33,14		L	725,17	94,90	39,20
	W	466,03	97,60	30,24		W	625,91	95,43	37,10
10t	CH	2226,56	78,37	70,51					
	G	2228,57	78,36	70,53					
	L	2254,88	78,19	70,81					
	W	2230,34	78,35	70,56					

Trat.=Tratamento; M=Modelo; SQR=Soma do Quadrado do Resíduo; R²=Coeficiente de determinação e EPE = Erro Padrão de Estimativa.

CH=Chapman-Richards; G=Gompertz; W=Weibull e L=Logístico.

Para todos os modelos foram obtidos coeficientes de determinação elevados, em todos os tratamentos, indicando um bom ajuste. A SQR, o R² e o EPE foram semelhantes para todos os modelos. Entretanto, quando considerado apenas o nível de significância para as estimativas dos parâmetros, o modelo de Weibull foi inferior aos demais. Para esse modelo, a estimativa para o parâmetro β_1 não foi significativa para nenhum tratamento (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Estimativas dos coeficientes dos parâmetros e resultados estatísticos para os modelos estudados

Trat.	M	Parâmetro								
		β_0			β_1			β_2		
		Coef.	EP	p	Coef.	EP	p	Coef.	EP	p
T	CH	561,29	123,13	<0,001	0,0318	0,0116	0,010	4,4520	1,8312	0,021
	G	529,87	87,72	<0,001	6,7353	1,8363	0,001	0,0388	0,0093	<0,001
	L	469,93	51,67	<0,001	48,4361	21,6454	0,033	0,0697	0,0118	<0,001
	W	486,88	76,53	<0,001	0,0000	0,0000	0,460*	2,4747	0,3769	<0,001
AM	CH	765,98	51,82	<0,001	0,0361	0,0048	<0,001	4,4515	0,7268	<0,001
	G	735,89	40,37	<0,001	6,4840	0,7492	<0,001	0,0427	0,0041	<0,001
	L	676,42	29,84	<0,001	37,2666	6,9988	<0,001	0,0709	0,0056	<0,001
	W	696,13	37,78	<0,001	0,0001	0,0000	0,051*	2,3497	0,1419	<0,001
5t+K	CH	776,18	100,99	<0,001	0,0321	0,0075	<0,001	4,0979	1,0514	<0,001
	G	735,50	72,76	<0,001	6,2077	1,0532	<0,001	0,0392	0,0061	<0,001
	L	662,60	46,19	<0,001	37,8691	10,1528	0,001	0,0680	0,0076	<0,001
	W	687,18	67,20	<0,001	0,0001	0,0000	0,207*	2,3319	0,2241	<0,001
10t+K	CH	733,73	49,70	<0,001	0,0342	0,0046	<0,001	3,9612	0,6110	<0,001
	G	700,85	37,69	<0,001	5,9141	0,6312	<0,001	0,0413	0,0039	<0,001
	L	644,39	28,41	<0,001	30,7536	5,3053	<0,001	0,0681	0,0054	<0,001
	W	669,78	37,83	<0,001	0,0001	0,0001	0,032	2,2158	0,1314	<0,001
10t	CH	543,93	140,10	0,001	0,0300	0,0145	0,048	3,4048	1,6463	0,048
	G	513,64	96,81	<0,001	5,3054	1,6011	0,002	0,0376	0,0115	0,003
	L	465,61	59,90	<0,001	26,8638	11,8855	0,031	0,0636	0,0136	<0,001
	W	483,10	94,11	<0,001	0,0002	0,0002	0,461*	2,1285	0,4013	<0,001
10t+KP	CH	803,08	117,95	<0,001	0,0291	0,0089	0,003	2,8551	0,8078	0,001
	G	755,44	79,52	<0,001	4,5590	0,7909	<0,001	0,0374	0,0071	<0,001
	L	698,28	54,74	<0,001	18,2483	4,3620	<0,001	0,0597	0,0084	<0,001
	W	739,57	92,62	<0,001	0,0004	0,0003	0,155*	1,8815	0,2186	<0,001
15t+K	CH	820,74	108,07	<0,001	0,0296	0,0072	<0,001	3,4150	0,8142	<0,001
	G	771,30	74,13	<0,001	5,3610	0,8015	<0,001	0,0374	0,0057	<0,001
	L	699,17	47,65	<0,001	27,3526	6,1613	<0,001	0,0632	0,0069	<0,001
	W	732,44	75,55	<0,001	0,0002	0,0001	0,140*	2,1212	0,1991	<0,001
20t+K	CH	660,99	93,93	<0,001	0,0328	0,0093	0,001	3,6422	1,1224	0,003
	G	629,80	68,32	<0,001	5,5205	1,1198	<0,001	0,0400	0,0076	<0,001
	L	578,84	46,08	<0,001	27,0570	7,9392	0,002	0,0658	0,0093	<0,001
	W	600,69	67,44	<0,001	0,0002	0,0001	0,239*	2,1428	0,2487	<0,001
40t+K	CH	701,07	71,85	<0,001	0,0300	0,0063	<0,001	3,0269	0,6140	<0,001
	G	661,00	50,09	<0,001	4,7786	0,6160	<0,001	0,0381	0,0052	<0,001
	L	612,32	36,21	<0,001	19,8025	3,6521	<0,001	0,0608	0,0064	<0,001
	W	647,14	57,26	<0,001	0,0004	0,0002	0,057*	1,9313	0,1591	<0,001

Trat.=Tratamento; M=Modelo Coef.=Coeficiente estimado para o parâmetro; EP=Erro Padrão Assintótico e p=Valor da estatística p ao nível de 5% de significância.

CH = Chapman-Richards; G = Gompertz; W = Weibull; e L = Logístico.

* Não significativo.

Os modelos de Chapman-Richards, Gompertz e Logístico apresentaram resultados bastante semelhantes, em termos de nível de significância para as estimativas dos parâmetros. Como o modelo de Chapman-Richards é o mais utilizado na área florestal para estudo de crescimento ele será utilizado preferencialmente nas análises posteriores.

Na Figura 5.1 são apresentadas as curvas de crescimento acumulado, curvas de ICA e de IMA para o modelo de Chapman-Richards.

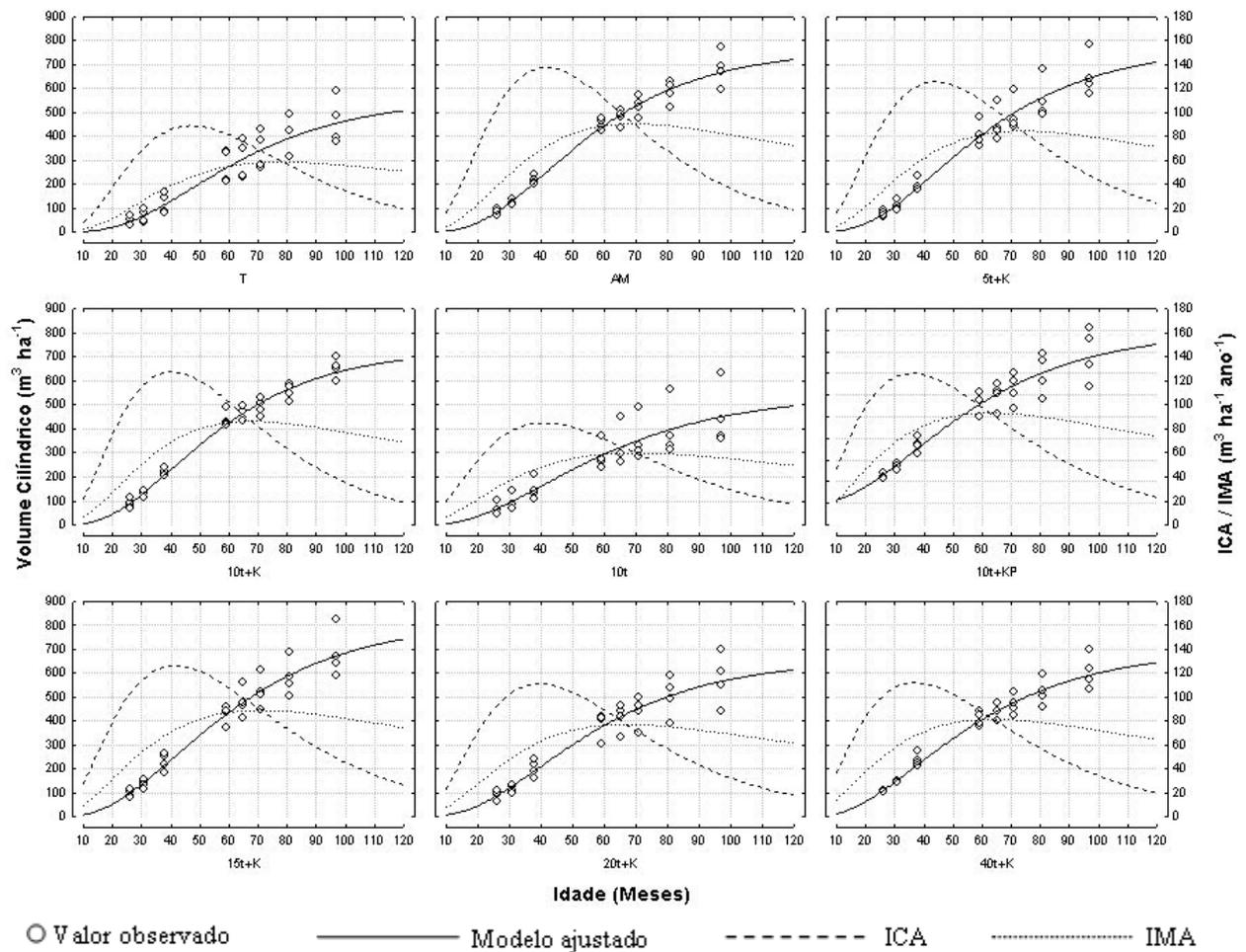


Figura 5.1 - Curvas de crescimento acumulado do volume, do Incremento Corrente Anual (ICA) e do Incremento Médio Anual (IMA) em talhões de *Eucalyptus grandis* fertilizados com diferentes dosagens do bio-sólido da ETE de Barueri, utilizando-se o Modelo de Chapman-Richards

Complementarmente, a Tabela 5.6 apresenta a matriz de comparação pareada entre os tratamentos.

Tabela 5.6 - Resultados do teste F para comparação pareada do modelo de Chapman-Richards ajustado aos diferentes tratamentos

Trat.	Tratamento							
	AM	5t+K	10t+K	10t	10t+KP	15t+K	20t+K	40t+K
	p							
T	<0,001	<0,001	<0,001	0,454*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
AM		0,096*	0,127*	<0,001	0,005	0,733*	<0,001	<0,001
5t+K			0,370*	<0,001	<0,001	0,140*	0,062*	0,020
10t+K				<0,001	0,001	0,451*	0,005	0,018
10t					<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
10t+KP						0,082*	<0,001	<0,001
15t+K							0,001	0,009
20t+K								0,124*

Trat.=Tratamento

p=Estatística do teste F a 5% de significância para a hipótese de o modelo unificado estar correto.

* Não significativo.

Verifica-se que os tratamentos que receberam biofóssido e complementação com nutrientes minerais no plantio foram afetados positivamente em crescimento volumétrico, resultando em produções volumétricas equivalentes a da fertilização mineral convencional. Isso indica que o biofóssido pode substituir parte da adubação de plantio e toda a de cobertura, sem prejuízo da produtividade. Entretanto, na ausência da complementação mineral de plantio não houve ganho de produtividade em relação à testemunha. Além disso, a adição do biofóssido antecipou a idade ótima de colheita, semelhantemente à fertilização mineral (Tabela 5.7).

É oportuno lembrar que a redução no nível de utilização de fertilizantes minerais pode não necessariamente implicar em custos totais de fertilização menores. Como já comprovado por Faria (2000), o custo de uso do biofóssido em eucaliptos é alto e não econômico em longas distâncias de transporte. Isso ocorre, principalmente, devido à elevada taxa de umidade no biofóssido.

Tabela 5.7 - Valores de produção, ICA e IMA máximos para o experimento de *Eucalyptus grandis* fertilizados com diferentes dosagens do biossólido da ETE de Barueri, considerando o modelo de Chapman-Richards

Produção Máxima (m ³ ha ⁻¹)			ICA Máximo (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)			IMA Máximo (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
Trat.	Valor	Idade (meses)	Trat.	Valor	Idade (meses)	Trat.	Valor	Idade (meses)
10t	543,93	482	10t	84,98	41	T	58,50	78
T	561,29	392	T	88,99	47	10t	59,85	70
20t+K	660,99	388	20t+K	111,29	39	20t+K	77,03	67
40t+K	701,07	456	40t+K	112,03	37	40t+K	81,41	64
10t+K	733,73	392	5t+K	125,83	44	5t+K	84,48	74
AM	765,98	361	10t+KP	126,12	36	10t+K	86,25	68
5t+K	776,18	400	15t+K	126,41	41	15t+K	88,98	71
10t+KP	803,08	425	10t+K	127,35	40	AM	90,54	69
15t+K	820,74	428	AM	137,70	41	10t+KP	93,09	63

Trat.=Tratamento; ICA=Incremento Corrente Anual; IMA=Incremento Médio Anual.

O nível de produção do tratamento 10t, que recebeu apenas biossólido, assemelha-se ao do tratamento testemunha. O resultado indica que o K contido apenas no biossólido não foi capaz de suprir a necessidade das plantas por esse nutriente. Sendo necessária, dessa forma, a complementação com fertilizantes minerais de rápida solubilização. Um dos fatores que pode ter levado a baixa produtividade pela ausência do K é que esse elemento é importante no controle da abertura e do fechamento dos estômatos das árvores, aumento assim a eficiência de uso de água e, conseqüentemente, a produção de biomassa. Gava (1997), observou resposta significativa da adubação potássica em povoamentos de *E. grandis*, em segunda rotação, para um teor de K no solo de 1,4 g Kg⁻¹. Por isso autor justifica a adição desse nutriente via fertilizantes solúveis como forma de aumento de produtividade. Faria et al. (2002), avaliaram a aplicação de doses crescentes de K₂O, na forma de KCl, em um povoamentos de *Eucalyptus citriodora* em segunda rotação, aos 80 meses de idade. Os autores encontraram respostas significativas no aumento da produção volumétrica de madeira, na biomassa da copa e de raízes com aumento da dose. Os autores justificam os resultados pela adubação potássica contribuir, de um lado, para a exploração de maiores volumes de solo, aumentando a possibilidade de maior absorção de água e de nutrientes, e, por outro, para a maior absorção de energia solar pela maior quantidade de copa.

É possível também observar na Tabela 5.7 que o uso do biossólido complementado com fertilizantes minerais acelerou o ritmo de crescimento (associado ao ICA) e aumentou a

produtividade média de *E. grandis*, em valores semelhantes ao nível da fertilização mineral. A rotação volumetricamente ótima para o tratamento 10t+KP, por exemplo, seria antecipada em 15 meses em relação a testemunha, com uma produtividade média 29% maior (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Produção na colheita e diferença da produção da rotação na colheita para o experimento de *Eucalyptus grandis* fertilizados com diferentes dosagens do bio sólido da ETE de Barueri, considerando o modelo de Chapman-Richards

Tratamento	Produção na Colheita ¹ (m ³ ha ⁻¹)	Diferença da rotação ² (meses)	Diferença da Produção na Colheita ² (m ³ ha ⁻¹)
10t	349,13	-8	-31,13
T	380,25	0	0
20t+K	430,08	-11	49,83
40t+K	434,19	-14	53,94
10t+KP	488,72	-15	108,47
10t+K	488,75	-10	108,50
AM	520,61	-9	140,36
5t+K	520,96	-4	140,71
15t+K	526,47	-7	146,22

¹ Considerando colheita na idade de máximo IMA

² Considerando colheita na idade de máximo IMA e em relação ao tratamento T

Essa possibilidade de redução do ciclo com aumento de produtividade é um ponto favorável do uso de bio sólido como fertilizante em eucaliptos. Ciclos mais curtos implicam em menores custos de manutenção do povoamento florestal e menores custos de oportunidade do capital investido, o que favoreceriam o uso econômico desse resíduo. Entretanto, a correta interpretação econômica deve contemplar, além da redução do ciclo e aumento de produtividade, também os demais custos e receitas envolvidas no uso florestal do bio sólido.

Considerando que o bio sólido é uma fonte de nutrientes para as árvores de eucalipto, poder-se-ia esperar que a resposta ao aumento nas suas taxas de aplicação seguisse a “Lei dos Rendimentos Decrescente”. Segundo ela, a taxa de resposta ao aumento dos níveis de utilização é crescente para níveis iniciais, decrescente em seguida, nula no ponto de máxima produção e eventualmente negativa para níveis mais altos (BERGER, 1975; RODRIGUEZ, 1991). Para os resultados do presente estudo, entretanto, esse efeito apresentou-se como uma tendência geral. Isso pode ter ocorrido porque a amplitude das doses de bio sólido utilizadas no experimento pode se encontrar na fase inicial, onde os rendimentos ainda são crescentes. Embora inexistam referências sobre a resposta de eucalipto a utilização de altas doses de bio sólido, o uso de doses

acima de 100 Mg ha⁻¹, base seca, ainda não resultaram em redução da produção de biomassa em espécies de como pinus e álamo (KAYS et al., 2000, GRADECKAS; KUBERTAVICIENE, GRADECKAS; 1998; HENRY; COLE; HINCKLEY, 1993; LUTRICK; RIEKERK; CORNELL, 1986). Apesar disso, Vaz e Gonçalves (2002), analisando o mesmo experimento aos 6 e 13 meses de idade, e Faria e Rodriguez (2007)¹ aos 99 meses de idade, verificaram redução no crescimento volumétrico de plantas de eucalipto com o aumento da doses de bio sólido. Esse comportamento, aparentemente inconsistente, evidencia que recomendações baseadas em avaliações pontuais dever ser realizadas com cautela. Deve-se considerar também que a aplicação de bio sólido em povoamentos florestais, além das respostas volumétricas das árvores e dos efeitos ambientais, envolve a logística e gestão dessa pratica frente a restrições regulamentares dos diferentes órgãos públicos. Além das limitações financeiras de cada situação.

Andrade (2004), analisando o mesmo experimento, afirma ainda que após a exaustão da MO facilmente degradável do bio sólido em um curto período, pode ter sido induzida a degradação da MO orgânica original do solo. Segundo o autor, essa degradação foi a forma de manutenção da elevada atividade microbiana, tendo em vista que a maior proporção da MO do bio sólido é recalcitrante (de difícil decomposição por micro-organismos). Vaz e Gonçalves (2002) associaram o efeito adverso das maiores doses a redução dos teores de Matéria Orgânica (MO) no solo com a elevação das doses de bio sólido. As maiores reduções da MO foram observadas aos seis meses pós-aplicação para as maiores doses (20 e 40 Mg ha⁻¹), sendo atribuídas ao efeito “priming”, em que a presença de compostos facilmente degradáveis aumenta a atividade microbiana do solo. Para Guedes (2005), avaliando resultados experimentais da mesma área, mesmo após cinco anos de contato do bio sólido com a serapilheira e com as raízes das plantas, submetido a todas as condições de intempéries e variações climáticas, o material apresentou taxa de perda de massa relativamente baixa, mostrando que o bio sólido utilizado no experimento é um material de lenta decomposição. Vaz e Gonçalves (2002) verificaram ainda que a maior produção de madeira no experimento, aos 13 meses de idade, foi obtida para o tratamento 10t+KP, maior inclusive do que para a adubação mineral. O resultado foi justificado por esses autores pela ausência da disponibilidade de P do bio sólido, até um ano após aplicação, o que fez com que as árvores do tratamento que receberam P mineral na base se desenvolvessem

¹ FARIA, L.C. de RODRIGUES, L.C.E. Wood Production of *E. grandis* Fertilized with Biosolid. **Scientia Agricola**. Piracicaba, 2007 (Enviado para publicação).

melhor após o plantio, com maiores taxas de crescimento em diâmetro e altura. Afirmam ainda os autores anteriores que como a aplicação do bio-sólido foi superficial e distante das raízes (nas entrelinhas, a 0,5 m das linhas de plantio) a absorção do resíduo por parte da plantas pode ter sido dificultada.

5.4 Conclusões

O crescimento volumétrico de povoamentos de eucaliptos fertilizados com bio-sólido pode ser explicado através de modelos não-lineares de crescimento. Para os dados deste estudo os modelos de Chapman-Richards, Gompertz e Logístico apresentaram bons ajustes com resultados estatísticos semelhantes.

O uso de bio-sólido complementado com fertilizantes minerais no plantio acelera o ritmo de crescimento das plantas de *Eucalyptus grandis*, proporcionando rotações volumetricamente ótimas de colheita mais curtas com produtividade média maiores, semelhantes a da fertilização química convencional para essa cultura.

O bio-sólido pode ser utilizado como substituto de parte da fertilização química de plantios e de toda a de cobertura para povoamentos de eucaliptos, sem prejuízo da produtividade, em relação a fertilização química convencional.

Referências

ANDRADE, C.A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de bio-sólido da ETE de Barueri.** 1999. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

ANDRADE, C.A. **Fração orgânica de bio-sólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com eucalipto.** 2004. 121p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

BARREIROS, R. M. **Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado.** 2005. 111p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BERGER, R. Métodos para determinação da quantidade econômica de adubo para plantios de eucaliptos. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, v.3, n.9, p.14-16, fev. 1975.

BESIGNANO, R.; POKOCKY, K. Using a GIS-based Model to Determine Agricultural Lands Suitable for Biosolid Application in Whiteside County, Illinois. University of Guelph, Department of Geography. Canada, Winter 2004. 1v.
Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2004/Group03>.
Acesso em: 30 ago. 2005.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação**. São Paulo: CETESB, 1999. 33p. (Manual Técnico P 4.230 jan./99)

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Eficiência agrônômica e produção vegetal de cinco biossólidos aplicados a dois solos tropicais. **Sanare**, Curitiba, v.20, n.20, p. 49-57, jul./dez. 2003.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Water. **Biosolids Technology Fact Sheet: Land Application of Biosolids**. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C.: September, 2000. 1v. Disponível em: <http://www.epa.gov/owm/mtb/land_application.pdf>
Acesso em: 25 out. 2005

FARIA, G.E. DE; BARROS, N. F. DE; NOVAIS, R.F. DE; LIMA, J.C.; TEIXEIRA, J.L. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.5, p.577-584, 2002.

FARIA, L. C. de **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 Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FARIA, L.C. de; RODRIGUEZ, L.C.E. Demanda potencial por biossólido em povoamentos de eucalipto no entorno da ETE de Barueri, SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Curitiba, v. 6, n.3, p.123-130, jul/set 2001 e n.4, out/dez 2001.

FORTES NETO, P. **Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas**. 2000. 113p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, n.30, p.89-93, Abr. 1997.

GRADECKAS, A.; KUBERTAVICIENE, L.; GRADECKAS, A. Utilization of wastewater sludge as a fertilizer in short rotation forests on cut away peatlands. **Baltic Forestry**, Girionys, v.2, n.4, p.7-13, 1998.

GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto.** 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciências 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, 168p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

HENRY C.L.; COLE D.W.; HINCKLEY, T.M.; et al. The use of municipal and pulp and paper sludges to increase production in forestry. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v.1, n.3, p. 41-55, 1993.

HENRY, C.L.; COLE, D.W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, n. 45, p. 269-217, 1997.

KAYS, J.S.; FLAMINO, E.J., FELTON, G.; FLAMINO, P.D. Use of deep-row biosolids applications to grow forest trees: a case study. In: HENRY, C.L.; HARRISON, R.B.; BASTIAN, R.K. **The forest alternative: principles and practice of residuals use.** Seattle, WA: University of Washington College of Forest Resources, 2000. chap.1, p.105-110. Disponível em: <http://www.naturalresources.umd.edu/Pages/Biosolids_Paper_1.html>. Acesso em: 13 out. 2005.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos.** São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

KIMBERLEYA, M.O., WANG, H., WILKSB, P.J., FISHERB, C.R., MAGESANA, G.N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.189, p. 345-351, 2004.

LUTRICK, M.C.; RIEKERK, H.; CORNELL, J.A. Soil and slash pine response to sludge applications in Florida. **Soil Science Society of America Journal**, Palo Alto, v.2, n.50, p.447-451, 1986.

MARTINS, L. F. da S. **Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido.** 2002. 73p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000

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

MOTULSKY, H.J.; CHRISTOPOULOS, A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression : practical guide to curve fitting San Diego, CA: GraphPad Software, 2003. 351 p. : ill. Disponível em: <<http://graphpad.com/manuals/Prism4/RegressionBook.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2006.

MUCHOVEJ, R.M.; OBREZA; T.A. **Biosolids: Are These Residuals All the Same?** SS-AGR-167, Series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published June 2001. Reviewed April 2004. 3p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/AG114>>. Acesso em: 3 set. 2005.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 1979. 549p.

RAIJ, B. van Uso agrícola de biossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.147-151.

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

ROCHA, G. N. da **Monitoramento da fertilidade do solos, 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.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo: SBS, 2006. 106p.

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

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

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science**, Maryland, v.30, n.3, p.594-616, 1993.

6 VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE BIOSSÓLIDO COMO FERTILIZANTE EM EUCALIPTOS

Resumo

Este trabalho analisou economicamente o efeito de diferentes doses de biossólido aplicadas em um ensaio com *Eucalyptus grandis*. As doses utilizadas foram: 5, 10, 15, 20 e 40 Mg ha⁻¹, com e sem complementação com K e P minerais no plantio. O custo de transporte do biossólido até o local de aplicação foi o mais significativo e é muito influenciado pelo respectivo teor de umidade. A utilização do Valor Presente Líquido Atualizado (VPLA) como critério de decisão com taxa de juros de 12% ao ano mostrou que a aplicação conjunta de 40 Mg ha⁻¹ com potássio mineral e a dose única de 10 Mg ha⁻¹ não são economicamente viáveis. A dose de 20 Mg ha⁻¹ com potássio mineral no plantio foi viável apenas em distâncias inferiores a 5 km da ETE. O estudo conclui que (i) o alto custo de transporte inviabiliza o uso de doses de biossólido iguais ou superiores a 20 Mg ha⁻¹ mesmo para plantios de eucaliptos localizados a pequenas distâncias; (ii) doses de biossólido inferiores a 20 Mg ha⁻¹ e em raios de transporte de até 365 km são viáveis economicamente se complementadas com as doses de potássio e fósforo testadas; (iii) considerados os custos levantados neste estudo, a disposição do biossólido como fertilizante florestal apresenta custo total inferior ao custo observado quando disposto em aterros sanitários particulares; (iv) considerados os custos e o crescimento das árvores em resposta à fertilização com biossólido observados neste estudo, a dose de 5 Mg ha⁻¹ complementada com potássio é a mais recomendável.

Palavras-chave: Lodo de esgoto; Florestas de eucaliptos; *Eucalyptus* spp; Avaliação econômica; Viabilidade econômica; Custos e recitas

Abstract

This work analyzed economically the effect of different dosages of biosolid applied in an experiment with *Eucalyptus grandis*. The dosages considered were: 5, 10, 15, 20 e 40 Mg ha⁻¹. The transportation cost to the local of application is the most significant and is strongly affected by its moisture content. The utilization of the Annualized Net Present Value as the decision method with an annual interest rate of 12% showed that the application of 40 Mg ha⁻¹ complemented with mineral potassium and the single dosage of 10 Mg ha⁻¹ are not viable economically. The dosage of 20 Mg ha⁻¹ complemented with mineral potassium is economically viable at places located less than 5 km from the source of the biosolid. Conclusions are: (i) transportation costs turn impractical the application of biosolid dosages equal or higher than 20 Mg ha⁻¹ even for eucalyptus plantations located at short distances; (ii) biosolid applied at dosages of less than 20 Mg ha⁻¹ and at close distances (less than 350 km) are viable economically if complemented by mineral fertilizers; (iii) if observed the costs used in this work, the disposal of biosolids as a fertilizer for eucalypts results less expensive than disposing it in particular landfills;

(iv) if observed the costs and the growth response observed in this work, the 5 Mg ha⁻¹ dosage of biosolid complemented with potassium would result as the most recommended.

Keywords: Biosolids; Sewage sludge; Eucalypts stands; *Eucalyptus* spp; Economic evaluation; Costs and incomes

6.1 Introdução

No tratamento de esgotos sanitários é gerado um resíduo denominado lodo de esgoto ou biossólido, que pode ser destinado de diferentes formas. Os das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) têm os aterros sanitários próximos como destino final mais comum. O custo dessa opção pode alcançar até 50% do custo operacional total de tratamento (ALEM SOBRINHO, 2001), contribui ainda para a diminuição da vida útil dos atuais aterros e desperdiça um material rico em matéria orgânica e nutrientes que poderia ser re-utilizado como insumo na produção florestal. Besignano e Pokocky (2004) afirmam que a reciclagem agrícola do biossólido como fertilizante orgânico pode reduzir os custos ambientais e econômicos de sua disposição em aterros sanitários. Para Kidder (2003), a utilização do biossólido como insumo na produção vegetal é economicamente viável quando considerados todos os custos e benefícios sociais das alternativas à esse método de disposição.

A maioria das áreas onde hoje se pratica a silvicultura intensiva no Brasil apresenta solos de baixa fertilidade. Nesses locais, a aplicação periódica de biossólido pode não só aumentar a produção em curto prazo (num ciclo florestal) como também a produtividade do sítio em longo prazo (HENRY; COLE, 1997). Para esses autores, inicialmente há uma resposta rápida em crescimento das árvores devido à imediata absorção dos nutrientes prontamente disponíveis no biossólido, similar a fertilização química. Posteriormente, os nutrientes são liberados lentamente pela decomposição da matéria orgânica do biossólido, o que é desejável em florestas devido a seu longo ciclo de produção. Para alguns nutrientes, o biossólido é comparável aos fertilizantes químicos e pode ser utilizado parcialmente como substituto (MUCHOVEJ; OBREZA, 2004). O biossólido, entretanto, não apresenta o balanceamento nutricional idealmente exigido pela maioria das culturas, e raramente substitui totalmente a fertilização química convencional. Apesar do biossólido geralmente ser rico em matéria orgânica, N, P, Ca e micronutrientes, a proporção entre os nutrientes pode não ser a adequada para a espécie. O potássio é um elemento que sempre se encontra em baixos teores na composição do biossólido. O motivo é que ele é muito solúvel e

se perde com o efluente, sem ficar retido em sua massa orgânica. Assim, a complementação com fertilizante mineral para suprir a necessidade das plantas por K, e por outros nutrientes, é normalmente necessária. O balanceamento com fertilizantes minerais deve ser específico para cada cultura, local de aplicação e tipo de biossólido (MUCHOVEJ; OBREZA, 2004; TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005). Quanto ao fósforo, Ronaldo Berton do IAC apud Silvério (2004) afirma que o biossólido pode reduzir a sua adsorção e a energia de ligação no solo, mas não interfere na capacidade máxima de absorção desse nutriente.

Além de nutrientes para as plantas, o biossólido também possui um teor significativo de matéria orgânica, cujos efeitos positivos no solo têm sido comprovados por diversos autores. A matéria orgânica melhora as propriedades químicas pelo aumento do estoque de nutrientes; promove o aumento da CTC e do pH em solos ácidos; melhora suas propriedades físicas, como a estrutura, agregação de partículas, aeração, drenagem e retenção de água; melhora as suas propriedades biológicas pelo aumento da comunidade microbiana e da fauna edáfica. (BESIGNANO; POKOCKY, 2004; MUCHOVEJ E OBREZA (2004); KIEHL, 1985; MUCHOVEJ; OBREZA, 2004; PRIMAVESI, 1979; RAIJ van, 1998). Por outro lado, apesar do alto teor de matéria orgânica, a quantidade aplicada de biossólido necessária por hectare para se atingir a equivalência nutricional dos fertilizantes minerais teria que ser muito alta. Como consequência o custo com o transporte e aplicação torna-se o fator mais limitante para viabilizar economicamente o uso do biossólido como fertilizante (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005). Para Riekerk (2000), além do alto custo de transporte, também a estocagem temporária nas áreas florestais pode ser tornar um fator limitante. Na Suécia, Lundin et al. (2004) apresentam o custo de uso de biossólido na agricultura de US\$ 74,80 dólares por tonelada seca aplicada, considerando a pasteurização (aquecimento a 70°C por 1 hora), transporte (aproximadamente 80 km), aplicação semi-líquida e pagamento aos agricultores. Naquele país são aplicadas biossólidos em taxas médias equivalentes a 15 Kg de P por hectare, sendo que o custo de transporte das ETEs até as áreas agrícolas é o mais significativo, normalmente representando mais de 50% dos custos totais. O custo da pasteurização representa cerca de 22% e o valor pago aos produtores para o uso do biossólido na agricultura representa cerca de 20% do custo total dessa alternativa de destinação. Os autores ressaltam que o pagamento é necessário pelo pequeno interesse dos produtores em utilizar o biossólido e que esse custo poderia ser revertido em receita caso fosse considerado o valor dos nutrientes no biossólido. Para Canziani et al. (1999), a

organização de uma estrutura centralizada de comercialização (transporte e aplicação) de biofósforo pelos gestores das ETEs minimizaria os custos de disposição final de biofósforo como fertilizante. A utilização do biofósforo como fertilizante normalmente apresenta custos menores do que outras opções de disposição, como os aterros sanitários, por exemplo (ESTADOS UNIDOS, 2000). Nesse país, e de acordo com esse autor, os custos típicos do uso agrônômico do biofósforo variam de 60 a 290 dólares por tonelada seca aplicada, dependendo do tipo de manejo do biofósforo e do método de aplicação. Em todos os casos a maior parte desses custos refere-se ao transporte do biofósforo até as áreas de aplicação. Henry e Cole (1997) relatam custos inferiores para o Estado de Washington, cuja aplicação de biofósforo em florestas custa cerca de US\$ 20,00 por tonelada seca, sendo 50% desse valor relativo ao transporte a 50 km de distancia. O custo é um importante fator na escolha do método de processamento do biofósforo pelas ETEs. Apesar de Canziani, et al.(1999) não considerarem o critério econômico como único determinante da destinação final do biofósforo, esses autores destacam o custo como o mais importante indicador quando os recursos são escassos.

Uma grande questão envolvendo os gestores das ETEs, e possíveis usuários do biofósforo como fertilizante, é o valor de uso desse resíduo. Existem diversas formas para estimá-lo, dentre as quais: (i) baseado no seu conteúdo de nutrientes ou matéria orgânica; (ii) pelo valor de produtos semelhantes, como esterco animal ou compostos orgânicos; e (iii) pelo acréscimo de produção que ele pode proporcionar às diferentes culturas. Entretanto, Corrêa e Corrêa (2001) lembram oportunamente que o valor nutricional do biofósforo para cultivos agrícolas e florestais ainda não pode ser convertido em valor monetário, pois, tendo status de resíduo, esse material não pode ter preço e ser vendido. Para adquirir status de "produto ou matéria-prima", é preciso se ter a certeza de que o material não causará nenhum dano ao ambiente e à saúde humana e animal. A Agência de Proteção Ambiental americana (ESTADOS UNIDOS, 1999) afirma que apesar do uso agrícola ser uma das alternativas de manejo mais baratas para o biofósforo, o seu uso será bem limitado se os usuários tiverem que arcar com os custos totais de aplicação (transporte, aplicação, de monitoramento etc). Em parte porque o baixo custo por unidade nutriente dos fertilizantes minerais limita a disposição em pagar dos produtores pelo biofósforo. Mesmo assim o autor relata que em algumas cidades como Seattle e Washington, os produtores pagam pelo biofósforo enquanto que em outras os gestores das ETEs arcam com todo, ou parte, dos custos de uso. Corrêa e Corrêa (2001) estimaram a valor monetário do biofósforo com base no seu

conteúdo de Nitrogênio, Fósforo e matéria orgânica e nos valores de mercado desses insumos estimados pelos preços de mercado da uréia, superfosfato triplo, esterco e compostos, respectivamente. Os autores chegaram aos seguintes valores para a tonelada do resíduo: lodo fresco: R\$ 22,00; composto com biossólido: R\$ 31,20; biossólido caledo (com cal): R\$ 41,20; biossólido seco ao ar: R\$ 29,80 e biossólido seco termicamente: R\$ 158,60. Os autores concluem que a perda de água é o fator que mais contribui para o acréscimo de valor do biossólido porque concentra o seu conteúdo de matéria orgânica e nutrientes. Esse processo é tanto mais importante quanto maior a umidade inicial do biossólido. Entretanto, os autores ressaltam que o valor monetário do biossólido deve ser estimado em função da demanda e aceitação pelos produtores e não pelo valor intrínseco do produto, isto é, em função dos nutrientes nele contido.

Devido aos potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente que a utilização agroflorestal inadequada do biossólido pode representar, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) disciplinou nacionalmente essa prática através da Resolução N° 375 de 29 de Agosto de 2006. Dentre outras medidas, a resolução estipula a criação de Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) que serão responsáveis pelo “recebimento, processamento, caracterização, transporte, destinação do lodo de esgoto produzido por uma ou mais estações de tratamento de esgoto sanitário e monitoramento dos efeitos ambientais, agrônômicos e sanitários de sua aplicação em área agrícola” (BRASIL, 2006).

No Estado de São Paulo, as ETEs da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) localizadas na RMSP são atualmente as maiores produtoras de biossólido, sendo a de Barueri a responsável pelo maior volume individual (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Evolução da produção de biossólido nas ETEs da SABESP localizadas na RMSP

ETE	Teor de sólidos (%)	Ano			
		2005	2007	2010	2015
---- produção de biossólido em base seca (Mg ano ⁻¹) ----					
Barueri	24	20.586	34.865	38.001	92.733
ABC	41	4.490	6.360	6.734	19.829
Pq. Novo Mundo	38	5.548	5.825	6.380	13.870
São Miguel	36	3.942	6.675	7.884	18.199
Suzano	38	5.548	6.824	7.684	13.662
Geral	29*	40.114	60.549	66.683	158.293

Fonte: Adaptado de COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005)

* Média aritmética ponderada pela produção.

Atualmente, o destino final adotado para a totalidade do biossólido produzido na RMSP é a co-disposição com resíduos sólidos urbanos (lixo) nos Aterros Sanitários Municipais São João (Zona Leste) e Bandeirantes (Zona Oeste) da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2005). Segundo o Eng. Sacamoto¹, da SABESP, a PMSP não cobra pela disposição do biossólido, em contrapartida os Aterros Municipais encaminham o chorume gerado na decomposição do lixo para as ETEs, onde é encaminhado no processo de tratamento para redução de seu potencial poluidor. Nesse processo, viabilizado por meio de um Termo de Cooperação Técnica, cada parte arca com os seus respectivos custos de transporte.

6.2 Materiais e Métodos

A análise econômica foi baseada no fluxo de caixa (receitas e custos) da utilização do biossólido em florestas de eucaliptos. Os custos de utilização considerados neste estudo são os seguintes:

- a) elaboração do projeto técnico de aplicação;
- b) distribuição mecanizada nas áreas florestais;
- c) transporte do biossólido das ETEs até as áreas florestais; e
- d) monitoramento do biossólido nas ETEs e monitoramento do solo nas áreas de aplicação, considerando-se os ensaios e análises previstos na Resolução 375 do CONAMA e seus respectivos valores de mercado (Tabela 6.2).

Também foram computados os custos da complementação do biossólido com fertilizantes minerais, de acordo com a quantidade adicionada em cada tratamento do ensaio avaliado por Faria e Rodriguez² e o valor de mercado para os respectivos fertilizantes. Não foi atribuído um valor monetário ao biossólido, já que esse resíduo ainda não tem valor comercial pela inexistência de um mercado próprio.

¹ Informação pessoal.

² FARIA, L.C. RODRIGUEZ, L.C.E. Crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* fertilizados com biossólido. **Interciência**. Caracas, 2007 (Enviado para publicação)

Tabela 6.2 - Parâmetros utilizados para determinação do custo de monitoramento do bioestabilizado nas ETEs e das áreas de aplicação

Monitoramento nas ETEs			
Tipo de Análise	Número de amostras por análise	Frequência de monitoramento	
Substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas ¹	4	Mensal	
Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos ²	15		
Monitoramento das áreas de aplicação			
Tipo de Análise	Número de amostras por análise	Frequência de monitoramento	Intensidade de monitoramento
Substâncias inorgânicas	2	7 anos	20 ha
Fertilidade, sódio trocável e condutividade elétrica	1	3 anos	

Fonte: Adaptado de Brasil (2006)

¹ Se detectada substâncias orgânicas potencialmente tóxicas no bioestabilizado, estas também devem ser analisadas no solo das áreas de aplicação.

² Excluindo-se análise de vírus, prevista para caracterização do bioestabilizado como classe A.

Obs.: A resolução do CONAMA prevê a possibilidade de dispensa ou alteração da lista de substâncias a serem analisadas ou solicitação de análises de outros parâmetros não previstos.

Como receitas devido ao uso florestal do bioestabilizado foram considerados os acréscimos de produção de madeira calculados por Faria e Rodriguez (2007)³ e o preço para a venda da madeira de eucaliptos em pé constante no Informativo Cepea - Setor Florestal, divulgado pelo Departamento de Economia e Sociologia Rural da Esalq/USP.

O critério de avaliação econômica escolhido foi o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), obtido segundo a seguinte equação:

$$VPLA = \left(\sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \right) * \left(\frac{i(1+i)^t}{i(1+i)^t - 1} \right) \quad (1)$$

onde:

R_t = Receita no período t;

C_t = Custo no período t; e

i = taxa de juros.

³ FARIA, L.C. RODRIGUEZ, L.C.E. Crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* fertilizados com bioestabilizado. **Interciência**. Caracas, 2007 (Enviado para publicação)

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Custos de utilização do bio-sólido em florestas de eucaliptos

Para a obtenção da curva de custo de frete em função da distância de transporte foram coletados junto às empresas que operam as ETEs da RMSP e a ETE de Jundiaí (SABESP e Operan, respectivamente), valores de custo de transporte de bio-sólido até aterros sanitários ou até áreas agrícolas e florestais onde ele foi utilizado como fertilizante. Os valores se referem ao ano de 2006, não apresentando variação mensal nesse período. A visualização dos dados em um gráfico de dispersão permitiu detectar uma relação possível de ajuste de acordo com o modelo apresentado na Figura 6.1.

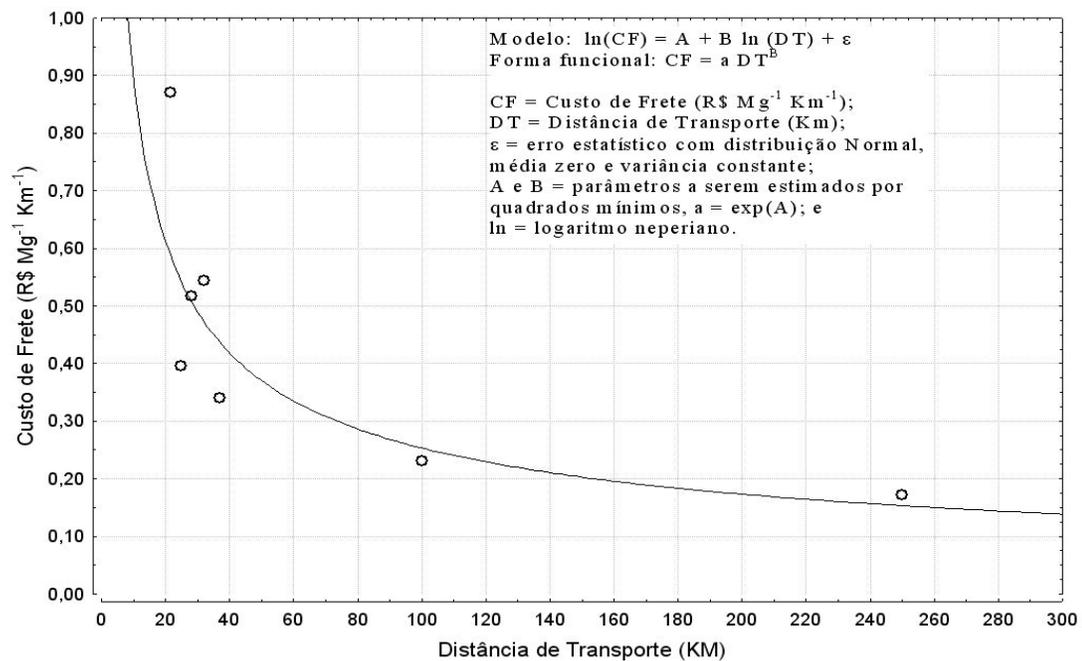


Figura 6.1 - Gráfico de dispersão do custo de frete do bio-sólido em função da distancia de transporte e linha representando o modelo de custo de frete escolhido para ajuste

Os resultados estatísticos da regressão são apresentados na Tabela 6.3 e revelam um bom ajuste. O coeficiente de determinação obtido foi de 80% e o erro padrão da estimativa de $0,2283 R\$ Mg^{-1} Km^{-1}$.

Tabela 6.3 - Resultados estatísticos para o ajuste do modelo de custo de frete (CF) em função da distância de transporte (DT)

ANOVA					
Fonte de Variação	SQR	GL	QM	F	p
Regressão	17,441	1	17,441	334,742	<0,001
Erro	4,272	82	0,0521		
Total	21,713				
AJUSTE					
Parâmetro	Coefficiente	Desvio Padrão	t (82)	p	
A	1,149352	0,117387	9,7912	<0,001	
B	-0,547738	0,029938	-18,2960	<0,001	

Deve-se considerar que, apesar da distância de transporte explicar grande parte da variação do custo de frete, outras variáveis podem estar envolvidas nesse processo. Dentre elas citam-se o volume transportado, a periodicidade do transporte, as características físico-químicas do produto, a rota percorrida e volume transportado, dentre outras. No caso do biossólido produzido nas ETEs da RMSP, a periodicidade de produção e o grande volume gerado podem ser aspectos favoráveis na negociação do custo de frete até as áreas de consumo.

Os custos de monitoramento do biossólido nas ETEs e nas áreas de aplicação foram determinados observando-se os parâmetros apresentados na Tabela 6.2 e a produção de biossólido na ETE de Barueri no ano de 2005 (vide Tabela 6.1)

Os valores para os custos das análises foram cedidos pelo representante da empresa que opera a ETE de Jundiaí, Fernando de Oliveira Carvalho, com base nos valores pagos pela empresa no ano de 2006.

A empresa Suzano Papel e Celulose, que já realiza testes operacionais com o uso do biossólido da ETE de Jundiaí em seus plantios de eucalipto, disponibilizou o valor do custo de distribuição mecanizada. Nas florestas de eucaliptos dessa empresa são adicionadas 5 Mg ha⁻¹ de biossólido, em base seca, utilizando-se de carreta de distribuição acoplada a um trator agrícola. O implemento realiza distribuição superficial em duas linhas de plantio simultaneamente (GAVA; OLIVEIRA, 2006).

A Resolução do CONAMA, que regula o uso do biossólido como fertilizante, preconiza a necessidade de um projeto de aplicação elaborado por profissional habilitado. Nesse estudo, o

custo de elaboração de projeto utilizado foi baseado nos honorários para engenheiros florestais recomendados pela Associação Paulista de Engenheiros Florestais (APAEF)⁴.

Considerando o exposto acima, a Figura 6.2 apresenta os valores obtidos para os custos de utilização de biossólido em florestas de eucalipto.

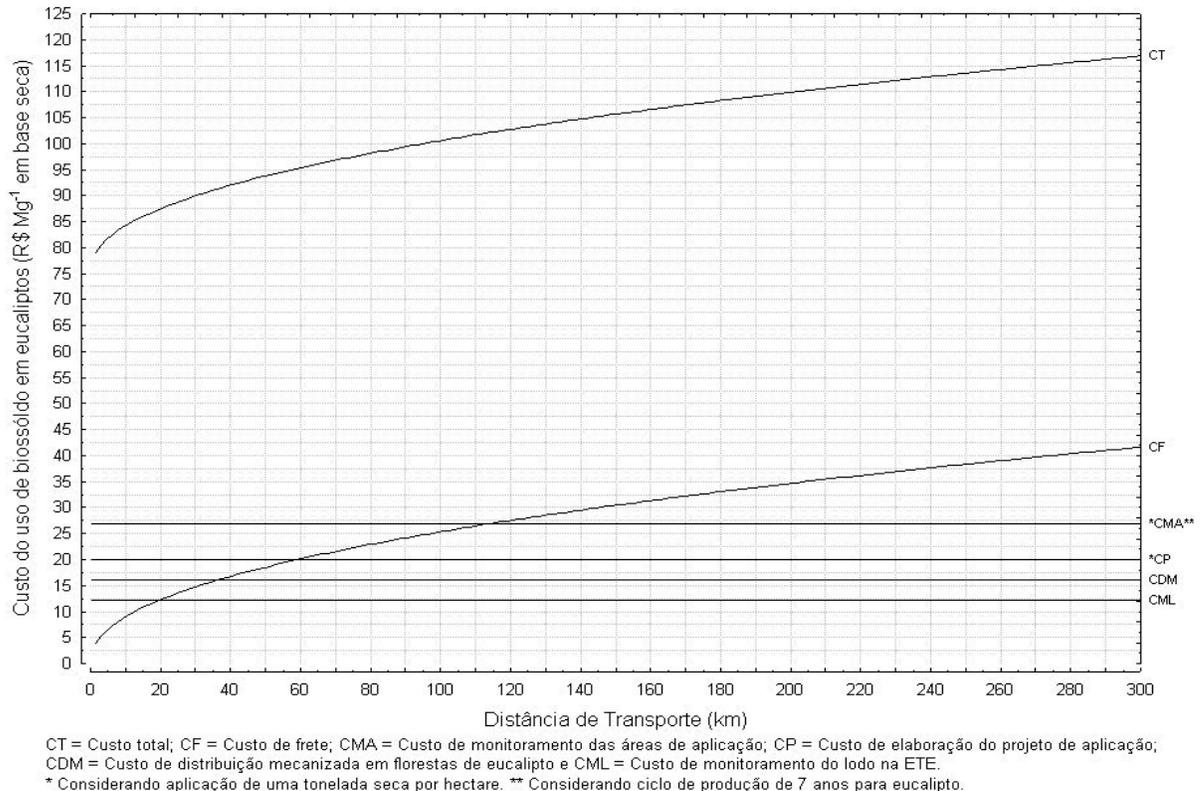


Figura 6.2 - Custos de utilização de biossólido em florestas de eucaliptos.

O biossólido gerado nas ETEs da RMSp é depositado em aterros sanitários da PMS (Prefeitura Municipal de São Paulo) sem custos à SABESP, excluindo-se o de frete. Entretanto, segundo Fernando Carvalho⁵, o custo médio de disposição em aterros sanitários particulares do Estado de São Paulo é de R\$110,00, para biossólidos com até 18% de sólidos. À medida que aumenta este teor de sólidos, diminuindo a umidade, o custo pode reduzir-se até R\$ 60,00 por tonelada. Assim, quando possível o uso agro-florestal do biossólido, além de ambientalmente mais adequada devido a re-ciclagem da matéria orgânica e nutrientes, o seu custo pode ser menor do que sua disposição em aterros sanitários particulares.

⁴ Disponível em <http://www.manejoflorestal.org/index3.cfm?cat_id=58&subcat_id=261> Acesso: 19 mar. 2007.

⁵ Representante da Opersan, empresa que opera a ETE de Jundiá. Informação pessoal.

O custo de elaboração do projeto de aplicação depende do profissional que irá elaborá-lo. Ainda segundo, Fernando Carvalho, da Opersan, esse custo pode ainda depender se a distância até o cliente será computada ou não, dentre outros fatores.

O custo de monitoramento do biossólido nas ETEs depende do seu nível de produção, que define a periodicidade das análises, e das características físico-químicas do próprio biossólido, que definem as análises que efetivamente serão realizadas. As características físico-químicas também determinam o custo de monitoramento nas áreas de aplicação, na medida em que os órgãos de controle ambiental têm a autonomia de solicitar análises adicionais. Os valores apresentados referem-se à alta taxa de geração da ETE Barueri, considerando as análises mínimas para um biossólido com características típicas dos oriundos de esgotos sanitários.

O custo de distribuição apresentado refere-se a condições operacionais típicas do setor florestal paulista. Entretanto, existem diferentes formas de aplicação do biossólido no campo em culturas agrícolas e povoamentos florestais. Eles dependem principalmente do equipamento ou conjunto mecanizado utilizado, das características geográficas do local, da consistência do biossólido e do tipo e idade da cultura. Biossólidos líquidos, que apresentam teores de sólidos entre 3 a 6%, podem ser injetados no solo ou distribuídos sob sua superfície por veículos especiais. No caso da aplicação superficial, o biossólido pode posteriormente ser incorporado por equipamentos agrícolas convencionais (ESTADOS UNIDOS, 2000). A opção pela aplicação líquida ou semi-líquida é na maioria das vezes escolhida em função do grande rendimento operacional dos equipamentos de aplicação em florestas maduras, onde as condições de tráfego são limitadas. Nos EUA, por exemplo, canhões de aplicação montados sobre caminhões tanque podem alcançar um raio de ação de 60 metros sobre um povoamento jovem, para teores de umidade entre 10 a 20% no biossólido (HENRY; COLE, 1997). Os autores afirmam que essa forma de aplicação só é viável economicamente em locais próximos as ETEs. Para Dunn (2000) uma vantagem da aplicação na forma semi-líquida (2 a 6% de sólidos) é que os mesmos caminhões tanques que retiram o biossólido das ETEs também realizam a aplicação no campo. Afirmam, entretanto, que o custo de transporte é proibitivo em distancias longas. O autor relata uma aplicação de 2.360 toneladas de biossólido na forma semi-líquida em uma área de 33 hectares nos EUA. Para uma distância de 13 quilômetros o custo total foi de US\$ 250.000, pagos pela ETE, resultando assim em um custo de aproximadamente US\$ 7.575,00 por hectare. Devido ao alto custo com o transporte, o autor afirma que a aplicação líquida do biossólido só econômica

nas proximidades das ETEs, tipicamente em distancias menores que 20 quilômetros. Sempre que possível é importante considerar a possibilidade de redução de certas operações relacionadas ao transporte do biossólido até as áreas de aplicação, como carga e descarga, porque essas etapas representam um custo adicional ao processo. Por exemplo, o acondicionamento do biossólido nas ETEs em "big bags", semelhantes aos utilizados para transporte de fertilizante mineral a granel, provavelmente reduziria o custo de distribuição na medida em que facilitaria as operações de carga e descarga. Além disso, a estocagem nas áreas de aplicação também seria mais fácil e segura.

O custo de frete é, evidentemente, o único que varia com a distância de transporte, sendo muito afetado pelo teor de sólidos no biossólido (Faria, 2000). Menores quantidades de umidade no biossólido reduzem o volume do produto a ser transportado e, conseqüentemente, o seu custo de transporte e aplicação. Uma possibilidade seria secar termicamente o biossólido, o que também aumentaria a capacidade de armazenamento nas ETEs. O biossólido seco termicamente normalmente se apresenta em forma de peletes, com teor de sólidos entre 90 a 95%. Não há perdas de matéria orgânica e nutrientes no processo de secagem térmica do biossólido, mas apenas perda de água, esterilização e concentração de sólidos (CORRÊA; CORRÊA, 2001). Outra vantagem da secagem é que o biossólido é praticamente esterilizado, permanecendo inodoros e inertes sob condições de armazenamento, enquanto os frescos, caleados e secos ao ar continuam putrescíveis sob condições ambientais. Todavia, a estabilidade dos peletes pode dificultar sua degradação quando aplicado em solos de baixo potencial de mineralização. Isso pode ser um fator limitante porque a mineralização é essencial para que os nutrientes sejam utilizados pelas plantas (CORRÊA; CORRÊA, 2003). Todavia, devido aos altos custos do processo de peletização, mesmo nos EUA esse produto não é facilmente encontrado (DUNN, 2000). O autor afirma que o custo total do tratamento de esgotos domésticos está intimamente relacionado aos custos de transporte de biossólido até seu destino final e que a redução de umidade no biossólido não é um processo barato. Entretanto, o transporte de água também não o é. O custo de transporte de biossólido líquido é proibitivo, o desaguamento pode resultar num biossólido com 25% de sólidos, mas ainda assim o transporte de 75% de água ainda é caro. Para Dunn (2000) tais considerações induzem a escolher a secagem térmica como uma opção lógica. Entretanto, o investimento em infra-estrutura para a secagem térmica do biossólido é cerca de dez vezes o necessário para usinas de compostagem, por exemplo. Um ponto

importante para a utilização florestal do biossólido é equacionar de uma maneira adequada os custos de secagem e a economia no custo do transporte, a fim de que uma decisão segura possa ser tomada.

Com base na curva de custo total de utilização, a Figura 6.3 apresenta uma simulação do efeito de diferentes taxas de aplicação e teores de sólidos no custo de transporte do biossólido.

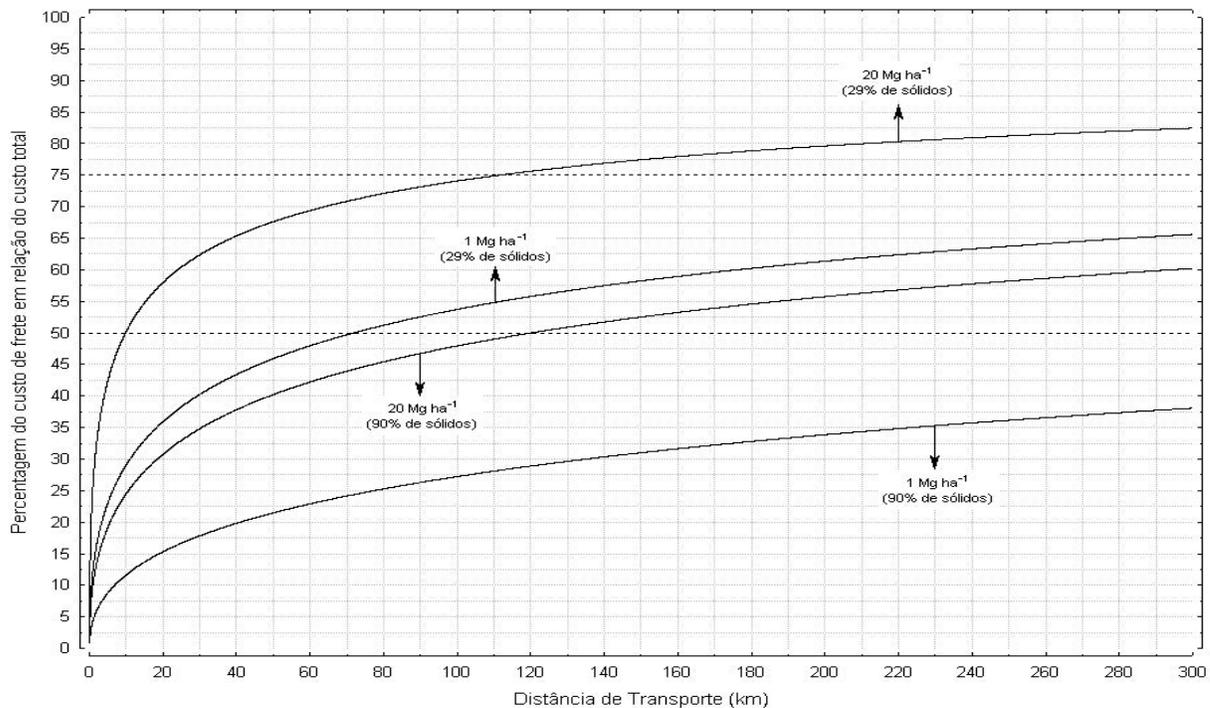


Figura 6.3 - Proporção do custo de frete em relação ao custo total de utilização de biossólido em florestas de eucaliptos, considerando duas taxas de aplicação e dois teores de sólidos no biossólido

Se considerarmos um biossólido com 90% de sólidos, semelhante ao obtido pela secagem térmica, o custo de frete representaria apenas 27% do custo total de aplicação para 1 Mg ha^{-1} , se transportado a 100 Km de distância. Entretanto, para um teor de sólidos de 29%, semelhante ao teor médio observado nos biossólidos da RMSP, esse percentual se elevaria para 54%. Para altas taxas de aplicação e baixos teores de sólido no biossólido o custo de frete se torna proibitivo e representa quase que a totalidade do custo total de utilização em distâncias longas de transporte. Por exemplo, se aplicadas 20 Mg ha^{-1} (recomendada em base seca) de um biossólido com 29% de sólidos, o custo de frete seria R\$ 2.390,00 por hectare e representaria 80% do custo total, para a distância de transporte de 200 quilômetros.

6.3.2 Análise econômica

A Tabela 6.4 apresenta as fontes de receitas obtidas com o uso de biofóssido em florestas de eucalipto e o custo da complementação com fertilizantes minerais que, juntamente com os custos anteriormente apresentados, compuseram a avaliação econômica realizada neste estudo. Os valores de produção e ciclos referem-se aos resultados da avaliação de um experimento com o uso do biofóssido da ETE de Barueri em *Eucalyptus grandis*, descrito por Faria e Rodrigues (2007)⁶.

Tabela 6.4 - Parâmetros silviculturais e financeiros de um experimento com o uso de biofóssido em eucaliptos

Trat. ¹	Ciclo ²	Produção ³	Diferença em relação ao T	Receita adicional ⁴	VPRA ⁵	Custo da complementação ⁶
	anos	----- (st ha ⁻¹) -----	-----	----- (R\$ ha ⁻¹) -----	-----	R\$ ha ⁻¹
T	6,5	479,12	0,00	0,00	0,00	0,00
AM	5,8	655,96	176,85	5.805,90	3.025,98	0,00
5t+K	6,2	656,41	177,29	5.820,58	2.893,71	322,65
10t+K	5,7	615,83	136,71	4.488,19	2.361,40	302,76
10t	5,8	439,90	-39,22	-1.287,51	-664,73	0,00
10t+KP	5,3	615,79	136,68	4.487,05	2.474,95	347,49
15t+K	5,9	663,35	184,23	6.048,30	3.093,33	282,86
20t+K	5,6	541,91	62,79	2.061,43	1.094,88	262,97
40t+K	5,3	547,08	67,96	2.231,13	1.219,07	183,39

Fonte: Adaptado de Faria e Rodrigues (2007)

¹ Tratamentos: T = Testemunha; AM = Adubação Mineral. Os números seguidos da letra “t” indicam as taxas de aplicação de biofóssido utilizadas, em Mg ha⁻¹ base seca. As letras “K” e “P” indicam complementação com potássio e fósforo minerais no plantio, respectivamente. ² Ciclo de produção baseado na Idade de Máximo Incremento Médio Anal (IMA). ³ Considerando o fator de empilhamento de 1,26 (COUTO; BASTOS, 1988). ⁴ Considerando a diferença em relação ao tratamento T e o valor para madeira de R\$ 32,83 st⁻¹ (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA, 2006). ⁵ Valor Presente da Receita Adicional à taxa de 12% a.a., considerando a duração do ciclo de produção. ⁶ Considerou-se R\$ 70,00 ha⁻¹ como custo de aplicação dos fertilizantes.

A Figura 6.4 apresenta os VPLAs para o uso de biofóssido na ETE de Barueri em florestas de eucaliptos do seu entorno, considerando os custos e receitas determinados neste estudo.

⁶ FARIA, L.C. de RODRIGUES, L.C.E. Crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* fertilizados com biofóssido. **Interciência**. Caracas, 2007 (Enviado para publicação)

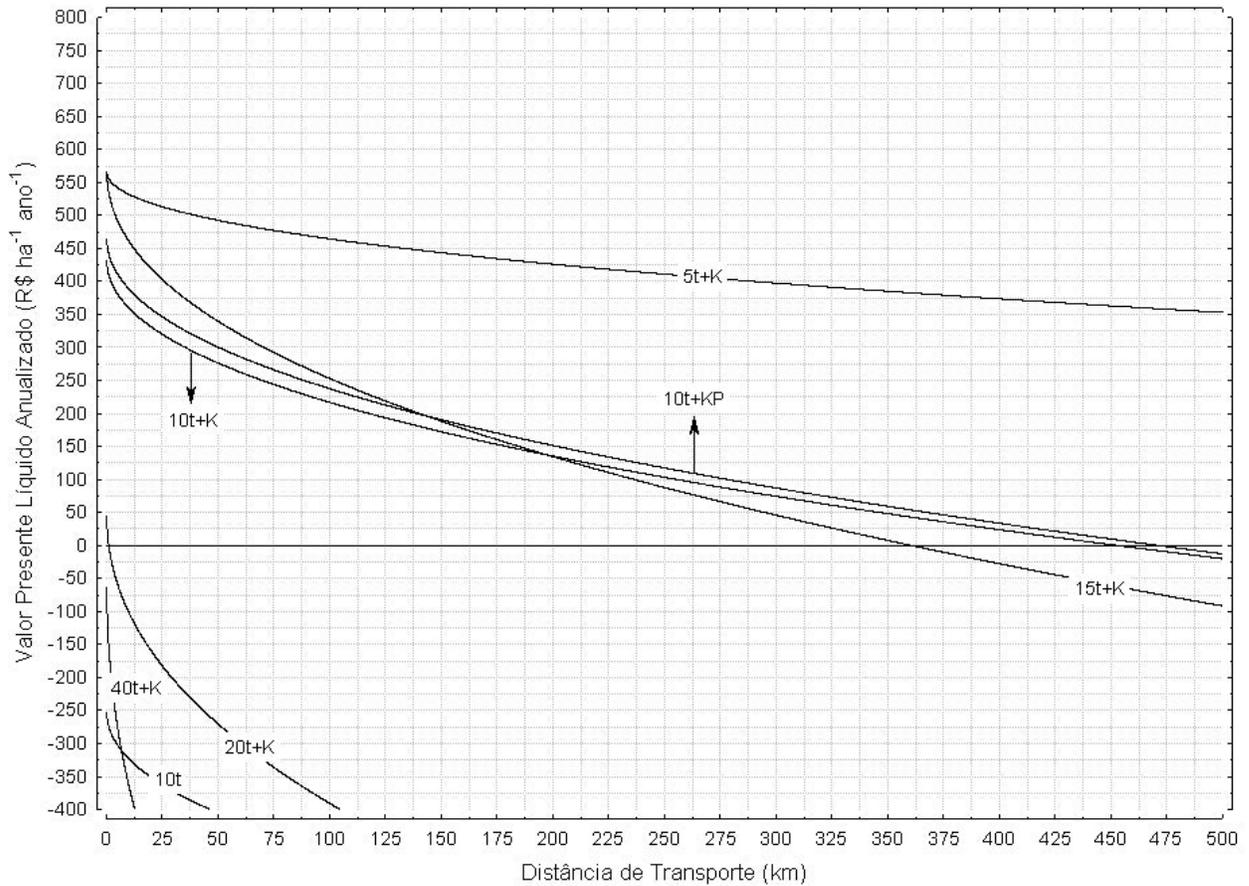


Figura 6.4 - Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA) em função da distância de transporte para a utilização de biossólido da ETE de Barueri, SP, em *E. grandis*

É oportuno salientar que um VPLA nulo significa que o investimento foi remunerado apenas pela taxa de juros utilizada nos cálculos, neste estudo de 12% a.a., e não que necessariamente ele seja inviável economicamente. Neste trabalho assumiu-se que o investidor deseja remuneração do capital maior do que a taxa de juros, assim quando o VPLA é nulo considerou-se que o investimento é inviável economicamente.

Na Figura 6.4 é possível verificar que a maior taxa de aplicação e a não complementação com potássio mineral no plantio não foram viáveis economicamente pelo critério utilizado. Já a taxa de 20 Mg ha⁻¹ só foi viável em distâncias muito curtas de transporte. Tal resultado é reflexo dos baixos ganhos de produção em relação à testemunha, ou nenhum no caso da não complementação, aliados ao alto custo de utilização do biossólido, devido às altas taxas utilizadas e a elevada umidade no biossólido. Isso indica que, sob o ponto de vista econômico, altas taxas de aplicação devem ser evitadas.

As taxas de aplicação intermediárias (10 e 15 Mg ha⁻¹) complementadas com K ou P foram economicamente viáveis até certas distâncias de transporte. Dentre essas, a dose de 15 t+K foi superior para distâncias curtas (até aproximadamente 130 km) e inferior para distâncias longas (após aproximadamente 190 km). Para a taxa de aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de biossólido em eucalipto, a complementação adicional com P (10t+KP) resultou em um pequeno aumento do raio econômico de transporte. Isso é reflexo apenas da diminuição do ciclo florestal desse tratamento, já que o ganho de produção é praticamente o mesmo quando complementado somente com potássio. Nesse aspecto, são necessários mais testes de campo que avaliem o efeito da complementação de forma mais abrangente, não só em termos de tipos de nutrientes minerais adicionados, mas também em suas quantidades. Pelo critério VPLA, a taxa de aplicação de biossólido que proporcionou o melhor resultado econômico foi a de 5 Mg ha⁻¹, mesmo tendo o maior ciclo de produção dentre os tratamentos que utilizaram biossólido. Nesse caso, o resultado pode ser atribuído ao elevado ganho de produção, semelhante ao da adubação mineral, aliado ao menor custo de utilização. Essa taxa de aplicação foi economicamente viável para distâncias de transporte superiores a 500 quilômetros e seria a recomendável economicamente, dentre as que foram utilizadas na análise.

Apesar das análises demonstrarem que o uso do biossólido é viável economicamente para certas taxas de aplicação, a certas distâncias de transporte, deve-se considerar que as comparações se deram em relação ao tratamento testemunha, sem nenhum tipo de fertilização. Entretanto, nenhuma taxa de aplicação de biossólido, complementado ou não, resultou em VPLA equivalente ao obtido pela fertilização convencional para eucaliptos (R\$ 758,38 anuais), mesmo considerando a economia com fertilizantes minerais representada pela complementação. Assim, produtores que já realizam a fertilização convencional dificilmente se sentiriam atraídos ao uso do biossólido caso não sejam incentivados a isso, como pagamento de parte dos custos de utilização, por exemplo. De fato, a Companhia Suzano Papel e Celulose já utiliza operacionalmente o biossólido oriundo da ETE de Jundiaí, SP, em suas florestas de eucalipto do Estado de São Paulo pagando apenas 20% do custo de transporte (GAVA; OLIVEIRA, 2006). Segundo Fernando Carvalho Oliveira⁷, representante da empresa que opera a ETE de Jundiaí, essa estratégia ainda é economicamente viável para a ETE quando consideradas outras opções de destino final para o biossólido, incluindo aterros sanitários particulares. Por outro lado, quando

⁷ Informação pessoal.

possível a redução dos custos de utilização aos produtores, os resultados econômicos seriam mais favoráveis ao uso do biofóssido. Se pagos os custos pelas ETEs, total ou parcialmente, seria socialmente mais justo se ele fosse distribuído aos pequenos produtores de florestas, os quais muitas vezes possuem pouco, ou nenhum, recurso financeiro para a compra de insumos. Deve-se considerar, entretanto, que essa opção pode ser gerencialmente mais cara para as ETEs. Deve-se considerar ainda que na utilização de biofóssido em florestas a posição dos produtores florestais e dos gestores da ETEs normalmente é antagônica. Ambos tentam maximizar os benefícios, ou minimizar custos, mas em situações opostas. A chave para viabilização dessa proposta é um ponto de equilíbrio em que as duas partes se sintam confortáveis com o uso do biofóssido. Um ponto a favor dos produtores é que as cidades estão gastando muitos recursos financeiros para tratar os esgotos e dispor o biofóssido.

Trannin; Siqueira e Moreira (2005), avaliando a aplicação de um biofóssido da indústria de fibras e resinas na cultura de milho, concluíram que o custo de transporte é o mais limitante economicamente e que as doses que resultaram nas maiores produtividades (22 e 23 toneladas secas por hectare, para o primeiro e segundo cultivo, respectivamente) não foram as mais econômicas. O raio econômico de uso para uma taxa de aplicação de 10 toneladas secas por hectare foi estimado em 66 quilômetros de distância da fonte geradora. Para a viabilização econômica do uso de biofóssido em culturas agrícolas os autores sugerem que o custo de transporte seja pago, parcial ou integralmente, pelas empresas geradoras. Segundo os autores, o subsídio ainda seria vantajoso para as empresas geradoras quando considerado os custos para se manter o biofóssido em lagoas de estabilização ou de incineração, por exemplo.

6.4 Conclusões

Conclui-se neste estudo (i) que o uso de altas taxas de aplicação de biofóssido em florestas de eucaliptos é inviável economicamente devido ao alto custo de transporte; (ii) que também não é econômico o uso de baixas taxas de aplicação sem complementação com fertilizantes minerais no plantio; (iii) que, considerando os custos de utilização estimados nesse estudo, o uso do biofóssido como fertilizante florestal apresenta menores custos que sua disposição em aterros sanitários particulares; (iii) que, de acordo com os custos e receitas estimados nesse estudo, a

melhor taxa de utilização de bioossólido em eucalipto é a de 5 Mg ha⁻¹, com complementação potássica no plantio.

Referências

- ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Bioossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap. 2, p. 7-40.
- BESIGNANO, R.; POKOCKY, K. Using a GIS-based Model to Determine Agricultural Lands Suitable for Biosolid Application in Whiteside County, Illinois. University of Guelph, Department of Geography. Canada, Winter 2004. 1v.
Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2004/Group03>. Acesso em: 30 ago. 2005.
- BIDONE, F.R.A. Alternativas de Disposição Final de Bioossólidos: Aterros, Landfarming e Incineração. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.131-135.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **DOU**, Brasília, 30 de ago. 2006, 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2006>>. Acesso em: 22 abr. 2007.
- CANZIANI, J.R. F., OSAKI, M., MASSARDO, M., PEGORINI, E. Análise econômica para reciclagem agrícola do lodo de esgoto da ETE Belém. **Sanare**, Curitiba, v.11, n.11. jul./ dez. 1999. 1v. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/weHP/HPTInternetSanepar-0010>>. Acesso em: 10 out. 2005.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Informativo Cepea - Setor Florestal**, Piracicaba, n. 58, 4p., out. 2006.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano diretor de uso e disposição dos lodos das ETES da RMSP - Aterro Exclusivo**. 2005. 1v.
Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/a_sabesp/tecnologia/apresentacao/plano_diretor_aterro_exclusivo.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2006.
- CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Eficiência agrônômica e produção vegetal de cinco bioossólidos aplicados a dois solos tropicais. **Sanare**, Curitiba, v.20, n.20, p. 49-57, jul./dez. 2003.

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **Sanare**, Curitiba, v.16, n.16. jul./dez. 2001. 1v. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/weHP/HPTInternetSanepar-0010>>. Acesso em: 10 out. 2005.

COUTO; H.T. do; BASTOS, N.L.M. Fator de empilhamento para plantações de eucalipto no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n.38, p.23-27, abr.1988.

DUNN, J.A. **Reclamation Using Biosolids**: a primer on economics and other concerns. In: MINING, FOREST AND LAND SYMPOSIUM, July, 2000. [s.l.:s.n.] 1v. Disponível em: <http://www.rmwea.org/tech_papers/mine_forest_land_2000/Dunn.pdf>. Acesso em: 25 out. 2005.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Municipal and Industrial Solid Waste Division, Office of Solid Waste. **Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States**. EPA530-R-99-009. Washington, D.C. September, 1999. 81p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/compost/biosolid.pdf>> Acesso em: 10 out. 2005.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Water. **Biosolids Technology Fact Sheet**: Land Application of Biosolids. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C.: September, 2000. 1v. Disponível em: <http://www.epa.gov/owm/mtb/land_application.pdf> Acesso em: 25 out. 2005.

GAVA, J.L.; OLIVEIRA, F.C. A experiência da Suzano Papel e Celulose com o uso do biossólido em plantios de eucalipto. In: SIMPÓSIO SOBRE O USO DO BIOSSÓLIDO EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS. 2006. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF,2006. 1v. Disponível em: <http://www.ipef.br/eventos/2006/biossolidos/Simposio_Biosolidos_07.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2006.

HENRY, C.L.; COLE, D.W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, n. 45, p. 269-217, 1997.

KIDDER, G. **Applying Non-Hazardous Wastes to Land**: Opportunities and Problems. Notes in Soil Science, SS-SOS-43. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. September 1993. Revised as SL-137, January 1998. Reviewed September 2003. 1v. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SS/SS16600.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2006.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

LUNDIN M.; OLOFSSON M., PETTERSSON; G.J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.41, p. 255-278, 2004.

MUCHOVEJ, R.M.; OBREZA; T.A. **Biosolids**: Are These Residuals All the Same? SS-AGR-167, Series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Published June 2001. Reviewed April 2004. 3p. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/AG114>>. Acesso em: 3 set. 2005.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 1979. 549p.

RAIJ, B. van Uso agrícola de biossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998. Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, ABES, 1998. p.147-151.

RIEKERK, H. Waste Utilization in Forest Lands of Florida. Circular 734, Series of the Department of Forest Resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Date reviewed; March 2000. 1v. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/FR028#copy>>. Acesso em: 5 set. 2005.

SILVÉRIO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto, da matéria orgânica do lixo urbano e de resíduos industriais. **O Agrônomo**, Campinas, v. 1, n. 56, p. 5-8, 2004.

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

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)