



REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS

USOS ALTERNATIVOS DE LODOS DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO

INSTITUIÇÕES PARTICIPANTES
SANEPAR, UFCG, UFRN, EMBRAPA-MA



Cleverson Andreoli
(coordenador)

Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento

Curitiba - PR
2006

Copyright © 2006 ABES RJ

1ª Edição tiragem: 1000 exemplares

Projeto Gráfico, editoração eletrônica e fotolitos

SERMOGRAF Artes Gráficas e Editora Ltda:

Rua São Sebastião, 199

CEP 25645-045 São Sebastião Petrópolis - RJ

TEL: (0xx24) 2237 3769 Fax: (0xx24) 2237-3709

sermograf@sermograf.com.br

Coordenador

Cleverson V. Andreoli

Alternativas de Uso de resíduos do saneamento.

/ Cleverson V. Andreoli (coordenador).

Rio de Janeiro: ABES, 2006

417 p. : il

Projeto PROSAB

ISBN

85-7022-151-7

978-85-7022-151-3

1. Lodo de esgoto,. 2. Biossólido, 3. Lodo de ETA, 4. Reciclagem, 5. Resíduos sólidos, I. Andreoli , Cleverson V.



Autores

CLEVERSON V. ANDREOLI (COORDENADOR DA REDE)

Engenheiro Agrônomo, mestre em ciência do solo e doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimentos (UFPR). Professor da UniFAE Centro Universitário. Gerente de pesquisa da SANEPAR.

ADRIANUS C. VAN HAANDEL

Professor da UFCG, Doutor pela Universidade da Cidade do Cabo África do Sul.

LADISLAU ARAÚJO SKORUPA

Engenheiro Florestal, Doutor em Botânica, Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente.

MARÍA DEL PILAR DURANTE INGUNZA

Geóloga, UCM/Espanha, Mestre em Meio Ambiente/UPM, Madrid/Espanha, Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental/ UPM, Madrid/Espanha, Professora Adjunta da UFRN/Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária.

EDUARDO SABINO PEGORINI

Engenheiro Agrônomo, mestre em Ciência do Solo. Engenheiro de pesquisa e desenvolvimento da Sanepar. Professor da Faculdades Camões.
E-mail: epegorini@sanepar.com.br

PEDRO ALÉM SOBRINHO

Professor da USP- Escola Politécnica, doutor Universidade de Newcastle Upon Tyne-RU.
E-mail: palem@usp.br

CINTHYA HOPPEN

Engenheira Química (PUC-PR), Especialista em MBA em SGA (PUC-PR), Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR), Pesquisadora bolsista do CNPq pelo PROSAB / FINEP / SANEPAR
E-mail: cinthyah@uol.com.br

CRISTINA R. TAMANINI

Engenheira Agrônoma pela UFPR e mestre em Ciência do Solo. Integrante do grupo de pesquisa sobre disposição final de lodo de esgoto da APD/SANEPAR, como bolsista do PROSAB/CNPq.

E-mail: crtamanini@yahoo.com

PAULO S. NEVES

Biólogo pela PUC-PR especialista em MBA em SGA. Integrante do grupo de pesquisa sobre disposição final de lodo de esgoto da APD/SANEPAR, como bolsista do PROSAB/CNPq.

E-mail: pneves@uol.com.br

MARCELO KENJI MIKI

Engenheiro civil e mestre em engenharia pela Escola Politécnica da USP.
Engenheiro da SABESP.

E-mail: mmiki@sabesp.com.br

EDUARDO DA CUNHA LIMA PEDROZA

Mestre em Saneamento Ambiental pela UEPb, pesquisador do PROSAB,
Engenheiro da CETREL.

E-mail: pedroza@cetrel.com.br

EUDES ALVES MOREIRA

Mestre em Engenharia sanitária e Ambiental pela UFCG,
Pesquisador do PROSAB

E-mail: eudesmoreira@yahoo.com.br

PAULA F. F. CAVALCANTI

Professora da UFCG, doutora pela Universidade de Wageningen-Hol

E-mail: pffcavalcanti@ig.com.br

FÁBIO POGGIANI

Bacharel em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Doutorado em Ecologia Vegetal pela Universidade de São Paulo. Pós-Doutorado em Ecologia Florestal pela Michigan State University (USA). Professor Titular do departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. Piracicaba SP.

E-mail: fpoggian@esalq.usp.br

PAULO HENRIQUE MÜLLER DA SILVA

Engenheiro Florestal formado pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais da ESALQ/USP. Assistente Técnico da Diretoria do IPEF Instituto de Pesquisas e estudos Florestais. Piracicaba SP

E-mail: paulohenrique@ipef.br

MARCELINO CARNEIRO GUEDES

Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre e Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais da ESALQ/USP. Pesquisador da Embrapa Amapá Solos, Resíduos e Recursos Florestais.

E-mail: mcguedes@cpafap.embrapa.br

MANOEL DORNELAS DE SOUZA

Eng. Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: dornelas@cnpma.embrapa.br.

ADRIANA MARLENE MORENO PIRES

Eng. Agrônoma, Doutora em Fertilidade do Solo, Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: adriana@cnpma.embrapa.br.

HELOÍZA FILIZOLA

Geógrafa, Doutora em Pedologia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: filizola@cnpma.embrapa.br

WAGNER BETTIOL

Eng. Agrônomo, Doutor em Fitopatologia, Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: bettiol@cnpma.embrapa.br

RAQUEL GHINI

Eng. Agrônoma, Doutora em Fitopatologia, Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: raquel@cnpma.embrapa.br

MARCO ANTONIO VIEIRA LIGO

Ecólogo, Doutor em Biogeoquímica de Agroecossistemas, Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente.

E-mail: ligo@cnpma.embrapa.br

RUBENS MARIBONDO DO NASCIMENTO

Engenheiro Mecânico pela UFRN/ Mestre em Engenharia Mecânica pela UFSC /Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais pela UFSC/Rheinisch-Westfalischen Technischen Hochschule/Aachen, R.W.T.H.A., Alemanha. Professor Adjunto da UFRN/Departamento de Engenharia Mecânica.

JULIANA DELGADO TINOCO

Engenheira Civil pela Universidade Potiguar/Natal- Rio Grande do Norte. Mestre em Engenharia Sanitária pela UFRN. Pesquisadora bolsista da UFRN/FINEP-CNPq.

E-mail: juliana@ct.ufrn.br

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE

Engenheira de Alimentos (PUC-PR), Mestre em Tecnologia Química (UFPR), integrante da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da SANEPAR como pesquisadora bolsista do CNPq pelo PROSAB.

E-mail: barbarazani@hotmail.com

Capítulo 6

Uso do Lodo de Esgoto em Plantações Florestais

*Fábio Poggiani, Paulo Henrique Müller da Silva,
Marcelino Carneiro Guedes*

Introdução

A reciclagem dos dejetos humanos nos agroecossistemas tem uma tradição milenar tanto no oriente como no ocidente. Segundo Tsutiya (2001), países fortemente desenvolvidos e industrializados destinam atualmente uma grande proporção dos resíduos resultantes do tratamento do esgoto para as áreas agrícolas e florestais. Pode-se citar como exemplo a França (58%), a Itália (33%), a Suíça (45%) e a Noruega (58%). Apesar disso, a maior parte do lodo gerado no Brasil ainda é destinada aos aterros sanitários, os quais, além de perpetuar a geração de poluentes, representam elevados custos operacionais. Portanto, uma alternativa viável e promissora para o uso do lodo de esgoto tratado (biossólido) seria sua aplicação em plantações florestais, que se destinam apenas à produção de madeira e que não afetaria a cadeia alimentar humana. O estudo aqui apresentado sobre a aplicabilidade do lodo de esgoto em plantações florestais abrange três vertentes básicas, que o tornam relevante pela necessidade da integração de diferentes áreas, envolvendo pesquisas de caráter multidisciplinar. A primeira vertente está relacionada com problemas inerentes ao saneamento básico e visa contribuir com a solução do grave problema do destino do lodo de esgoto produzido nas estações de tratamento (ETEs), visando sua aplicabilidade nos agroecossistemas florestais. A segunda vertente está voltada para os aspectos silviculturais e avalia o efeito do lodo de esgoto sobre o incremento da produção de madeira e sobre a distribuição dos diferentes componentes da biomassa arbórea nas plantações florestais. Os estudos econômicos relacionados podem fornecer os dados necessários para a

análise do custo/benefício, indispensável para a tomada de decisões por parte do município gerador do lodo e silvicultor. Finalmente, no campo da ecologia florestal, uma terceira vertente estuda de forma abrangente o processo de ciclagem dos nutrientes no ecossistema das plantações de eucaliptos, as quais podem ser beneficiadas com a adição deste resíduo devidamente tratado que é rico em matéria orgânica e nutrientes. Todavia, outros estudos são necessários, visando esclarecer principalmente a dinâmica do nitrogênio e demais elementos adicionados ao solo das plantações florestais através do lodo de esgoto, bem como o destino de metais pesados eventualmente presentes neste resíduo.

Histórico

Guedes (2005) relata que a utilização de dejetos humanos na agricultura para melhorar a fertilidade do solo remonta à China antiga, quando os orientais os utilizavam “in natura” e praticamente sem nenhum tratamento. No ocidente, a aplicação de efluentes sanitários em áreas agrícolas teve seu início no século XIX, quando a Inglaterra passou a trabalhar esta questão para combater uma epidemia de Cólera. O caráter mais científico do uso agrícola do lodo de esgoto começou no século XX, sendo que, no exterior, as pesquisas com este resíduo vêm sendo realizadas há muito tempo. Na década de setenta intensificaram-se essas pesquisas, expandindo-se os conhecimentos científicos sobre o lodo e sobre os diferentes processos de tratamento. Segundo Henry & Cole (1997), nos primeiros anos da década de setenta, muitos aspectos do uso do lodo de esgoto em florestas, tais como técnicas de aplicação, práticas de manejo e operação e monitoramento dos impactos ambientais, foram investigados.

No exterior, vários países já utilizam, rotineiramente, a aplicação de lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais como um efetivo método de disposição final do lodo de esgoto. A cidade de Bremerton, no Estado de Washington, vem aplicando lodo de esgoto em florestas desde o início da década de setenta, sendo que no ano de 1997, 100% deste resíduo foi destinado às florestas do próprio município (LEONARD & MCKINNEY, 1997). Harrison et al. (2003), em recente revisão sobre o tema, assinalam que nos últimos trinta anos vários estudos realizados com diferentes resíduos orgânicos nos Estados Unidos têm confirmado o potencial destes materiais em aumentar a produtividade das áreas florestais.

Um fato que incentivou o uso benéfico do lodo de esgoto foi a redução de sua disposição em águas marítimas. Segundo Tsutiya (2001), essa alternativa, antigamente muito comum em países e cidades costeiras, já está em desuso e, provavelmente, em um futuro bem próximo não haverá mais a disposição oceânica de lodos. O autor cita a assinatura de uma lei pelo Congresso dos Estados Unidos, em 1988, proibindo o lançamento de lodo no mar a partir de 1992 e um acordo, assinado em Helsinque pela maioria dos países, para eliminar a disposição oceânica até 1998.

No Brasil, a experimentação sobre o uso de lodo de esgoto na agricultura acontece desde a década de oitenta. Bettiol & Carvalho (1982) foram os primeiros pesquisadores brasileiros a publicarem sobre a utilização de lodo de esgoto na agricultura. O surgimento das pesquisas na área florestal ainda é fato mais recente. Em 1998, um grupo de pesquisadores da ESALQ/USP iniciou as primeiras pesquisas em campo sobre a aplicação de lodo de esgoto (biossólidos) em culturas florestais no Brasil. O trabalho de Poggiani & Benedetti (1999) resume o programa de pesquisa desse grupo e mostra os vários subprojetos desenvolvidos para verificar a viabilidade ecológica, silvicultural e econômica da utilização do biossólido em cultura de eucalipto. Antes de 1998, foi encontrado na literatura apenas o registro de um trabalho com produção de mudas (Morais et al., 1997). Mais recentemente, Vieira (2005) desenvolveu tese, estudando o efeito de biossólido seco (granulado) produzido pela ETE de Barueri da SABESP-SP sobre o crescimento inicial de quatro espécies arbóreas nativas pertencentes a diferentes categorias ecológicas dentro do processo sucessional.

Segundo Smith & Carnus (1997), a aceitação internacional da utilização de lodo de esgoto em florestas aumentou ao longo das últimas décadas devido aos numerosos estudos de campo que viabilizaram o desenvolvimento de uma forte base teórica e prática para sistemas de aplicação ambientalmente aceitáveis e devido às várias publicações que permitiram a organização do planejamento e “design” da aplicação. Especificamente, em relação à cultura de eucalipto, foram encontradas poucas referências na literatura internacional, publicadas em países como Austrália, Nova Zelândia e Egito. No Egito, Ei-Baha (2001) encontrou efeito positivo do biossólido sobre o crescimento de *Eucalyptus camaldulensis*. No Brasil, o grupo de pesquisadores da ESALQ/USP (ANDRADE, 1999; ANDRADE & MATTIAZZO, 2000; FARIA, 2000; FARIA & RODRIGUEZ, 2000; FORTES NETO, 2000; POGGIANI et al.,

2000; VAZ, 2000; VAZ & GONÇALVES, 2002; GUEDES, 2000; MARTINS, 2002; ROCHA, 2002; GUEDES & POGGIANI, 2003; ANDRADE, 2005; VELASCO-MOLINA, 2004), publicaram resultados sobre a utilização de biossólido em plantios de eucalipto. Segundo Faria & Rodrigues (2000), o potencial de uso do biossólido da ETE de Barueri (SABESP) em áreas reflorestadas próximas à estação é muito grande. Os autores concluíram também que existe demanda para o uso de biossólido como fertilizante e condicionador de solo em plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* no Estado de São Paulo, baseados no levantamento da BRACELPA (1999), que indicava a existência de uma área reflorestada aproximada de 321.000 ha. Em trabalho mais recente, realizado pelo Instituto Florestal do Estado (KRONKA et al., 2003), pode-se observar que a área plantada aumentou nos últimos anos e que existe um total de 770 mil hectares de reflorestamentos com *Pinus* e *Eucalyptus* em São Paulo. Constatou-se, portanto, uma elevada potencialidade dos reflorestamentos em consumir o lodo de esgoto produzido nas estações de tratamento (ETEs).

De maneira geral, tanto na Europa quanto na América do Norte e na Austrália, existem diversas pesquisas que constataram um maior incremento volumétrico das espécies florestais, principalmente do gênero *Pinus*, tratadas com lodo de esgoto (MCNAB & BERRY, 1985; PHILLIPS et al., 1986; HART et al., 1988; WEETMAN et al., 1993; POLGLASE & MYERS, 1995, KAPOSTS et al., 2000).

Henry et al. (1993) conduziram estudos ao longo de vinte anos em uma floresta experimental localizada em Washington (EUA), confirmando a grande potencialidade de biossólidos para aumentar a produtividade de muitas áreas florestais. Esses estudos mostraram claramente que a aplicação de lodo de esgoto tratado, em quantidades ambientalmente aceitáveis, resulta em elevadas taxas de resposta de crescimento, tanto para plantios jovens, como para áreas já estabelecidas. A resposta do crescimento à aplicação do lodo de esgoto é, tipicamente, maior e mais duradoura quando comparada com fertilização mineral. Diversos experimentos realizados nesse estado assinalam que a aplicação do lodo beneficia os sítios florestais através de um resultado imediato que pôde ser constatado pelo crescimento das árvores e da vegetação do sub-bosque e, em longo prazo, pelo aumento da produtividade do sítio (HENRY et al., 1994).

Labrecque et al. (1995) aplicaram doses crescentes de lodo estabilizado, desidratado e granulado a plantas de duas espécies do gênero *Salix* e observaram que a maior dose testada provocou o melhor desenvolvimento de ambas as espécies. Estes autores consideram que um conteúdo elevado de metais em culturas agrícolas não é desejável, além de ser potencialmente perigoso. No entanto, para árvores isso é aceitável, desde que a atividade fisiológica não seja afetada. Assim, as plantações florestais podem ser usadas como filtros biológicos, através da captura, acúmulo e armazenamento de elementos poluentes dentro da biomassa, podendo contribuir para o processo de fitoremediação.

No Brasil, poucos trabalhos são encontrados na literatura relatando o efeito da aplicação de lodo de esgoto sobre a ciclagem de nutrientes em plantações florestais. Guedes (2005) estudou em condições de campo o efeito do biossólido produzido na ETE de Barueri (SP) sobre o crescimento das árvores e a produção de fitomassa em plantações de eucaliptos e acompanhou também a ciclagem de nutrientes no ecossistema. Ao longo de quatro anos verificou aumento nos teores de nutrientes das folhas das árvores que receberam o produto, nas taxas de retorno de nutrientes ao solo através da deposição de folheto e também na velocidade de decomposição da serapilheira acumulada sobre o solo.

Aplicabilidade do lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais

A aplicabilidade do lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais está diretamente relacionada às suas características físico-químicas e biológicas.

De maneira geral, nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), o esgoto que chega através dos coletores urbanos é submetido a um tratamento primário no qual, através de telas coletoras e de tanques de sedimentação, pode-se remover cerca de 60% dos sólidos maiores, mas apenas um terço dos componentes orgânicos relacionados à demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O tratamento secundário constitui-se no segundo estágio da purificação das águas servidas. Nesse estágio, as bactérias decompõem os sólidos que permanecem após o tratamento primário. Para tanto, nos tratamentos aeróbios, o oxigênio é assoprado no efluente para suprir as bactérias que atuam no processo de decomposição

de modo que a maior quantidade possível de sólidos possa ser dissolvida. No processo de lodo ativado, os sólidos em suspensão, a DBO e os coliformes podem sofrer uma redução entre 80 e 95%. Entretanto, os tratamentos primários e secundários deixam ainda entre 10 e 15% da DBO, 10% de sólidos suspensos, 50% do nitrogênio (principalmente na forma de nitratos), 70% do fósforo na forma de fosfatos e 95% de sais dissolvidos, podendo incluir os metais pesados, além de substâncias orgânicas persistentes e potencialmente perniciosas ao ambiente. As características finais do lodo de esgoto podem variar significativamente com os diferentes tratamentos aplicados para seu condicionamento. Mas, de qualquer maneira, a maioria dos lodos de esgoto contém mais de 95% de água (SEWELL, 1978) e isto encarece seu transporte.

Finalmente, o tratamento terciário constitui-se no tratamento da água do esgoto residual, podendo incluir filtragem, tratamento químico ou bioquímico. Este tratamento visa devolver novamente a água purificada para o seu reuso em diversas finalidades.

Na região metropolitana de São Paulo, atualmente, pelas suas próprias características qualitativas e quantitativas, a disposição final do lodo de esgoto é um dos principais problemas que envolvem as estações de tratamento de esgoto. De forma geral, no Brasil, os resíduos do processo de tratamento do esgoto doméstico têm tido uma disposição final baseada no conceito de resíduo a ser descartado, e não como subprodutos de interesse comercial. Desta forma, o efluente final tratado é lançado nos rios, ao passo que o lodo remanescente é disposto em aterros sanitários. Segundo Tsutiya (2001), há muito tempo se sabe que a adição de produtos químicos alcalinos tem efeito estabilizante sobre o lodo de esgoto e geralmente a cal virgem tem sido utilizada para esta finalidade e principalmente para a higienização. Todavia, o lodo tratado com cal sofre alterações significativas na sua composição físico-química, com a elevação do pH e temperatura e aumento na concentração de amônia. Quimicamente, além da fixação dos metais pesados, pode ocorrer certa redução na solubilização do fósforo e perdas consideráveis de nitrogênio por volatilização da amônia. Devido à sua simplicidade e baixo custo, este tratamento com cal tem sido escolhido pelas estações de tratamento de esgoto, visando sua reciclagem na agricultura. Por outro lado, o condicionamento do lodo pode ser feito também com o uso de polímeros, que atuam como agregantes das partículas. Porém, este processo não é comum no Brasil, sendo mais utilizado em países europeus como a

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

De acordo com Ludovice (2000), o potencial agrônômico do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa, de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor. Selivanovskaya et al. (2003) sugerem que um dos métodos para melhorar a qualidade do solo seria a adição de matéria orgânica e estimulam o uso de lodo de esgoto com este propósito e, conseqüentemente, para favorecer o crescimento das plantas, além de ser uma excelente alternativa para a disposição deste resíduo urbano.

Harrison et al. (2003), em ampla revisão sobre o uso de biossólidos em sistema agroflorestais, assinalam que diversas pesquisas foram realizadas nos Estados Unidos e no Canadá sobre o crescimento das plantas em resposta à aplicação de lodo de esgoto.

O aumento na produtividade das espécies florestais tem sido relatado em trabalhos realizados tanto no Brasil como no exterior. Principalmente no estado de Washington (EUA), bons resultados foram obtidos em plantios de coníferas (HARRISON et al., 1994; HENRY et al., 1993). Fjällborg et al. (2005) consideram que o lodo é uma fonte orgânica de nutrientes, entretanto os metais pesados, eventualmente presentes, podem acumular-se no solo depois de repetidas aplicações e, dependendo das concentrações, podem gerar impactos indesejáveis sobre os microrganismos, as plantas e os animais.

Guedes (2005) estudou a aplicação de biossólido, tratado com cal e cloreto férrico, aplicado nas entrelinhas de plantio em uma área experimental de *Eucalyptus grandis* em Itatinga SP e observou efeitos positivos no crescimento devido à aplicação do lodo que serviu como fonte de nutrientes. Mas assinalou que, por ter sido o lodo aplicado nas entrelinhas de plantio, a resposta sobre o crescimento das árvores foi detectada apenas um ano após o plantio. Segundo Poggiani et. al. (2000), o lodo de esgoto, em relação à adubação mineral, apresenta a vantagem de liberar lentamente os nutrientes para o sistema radicular das árvores. Desta forma, para as culturas de ciclo longo, plantadas sobre solos arenosos e de baixa fertilidade, a lenta liberação dos nutrientes poderia otimizar sua absorção e minimizar perdas por lixiviação.

Para aprimorar o tratamento do lodo de esgoto e viabilizar sua disposição na agricultura bem como em aterros sanitários, a SABESP, a partir de 2002, deu início ao procedimento de secagem térmica do lodo produzido na ETE Barueri, que vem sendo fornecido experimentalmente sob forma granulada. A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e do volume dos lodos, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerado também um processo de melhoria da qualidade do lodo, visto que pode reduzir e até eliminar os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preservar a matéria orgânica presente no lodo, aspectos de fundamental importância para lodos com aplicação em sistemas agroflorestais (DAVID, 2002). Todavia, como não existem pesquisas a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente sobre o crescimento dos eucaliptos, foi objetivo desse trabalho avaliar comparativamente a influência da aplicação, nas linhas de plantio, de doses crescentes de lodo úmido (torta) e de lodo seco (granulado) sobre o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* e também sobre a ciclagem dos nutrientes no sistema solo-planta-serapilheira. Para tanto, o lodo úmido (torta) foi produzido na ETE de Barueri da SABESP, que trata parte do esgoto coletado na região metropolitana de São Paulo. A partir do lodo úmido, foi produzido por secagem térmica também o lodo seco, visando sua aplicabilidade em plantios florestais. Para a secagem do lodo foi utilizado um secador existente na ETE São Miguel da SABESP-SP, construído pela SEGHERS - Better Technology em que, através do aquecimento de serpentinas utilizando óleo térmico, promove a secagem do lodo, elevando sua temperatura acima de 100 °C.

Nesta experimentação de campo, os tratamentos consistiram da adição ao solo de doses crescentes de lodo de esgoto, sempre calculadas em base seca a partir das concentrações observadas nos respectivos lodos úmido (torta) e seco (granulado), conforme expresso na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Análise química dos lodos úmido (torta) e seco (granulado) produzidos na ETE de Barueri da SABESP SP

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl ₂ 0,01 M	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Mat. Org. resistente à compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	3,27 %	3,47 %
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,27 %	3,84 %
Potássio (K ₂ O) total	0,27 %	0,27 %
Cálcio (Ca) Total	2,52 %	2,46 %
Magnésio (Mg) Total	0,49 %	0,39 %
Enxofre (S) Total	0,66 %	0,68 %
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	0,13 %	0,07%
Manganês (Mn) Total	0,044 %	0,030%
Zinco (Zn) Total	0,54 %	0,32%
Ferro (Fe) Total	8,90 %	4,52%
Boro (B) Total	0,0002 %	0,0002%
Sódio (Na) Total	0,13 %	0,09%

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

De maneira geral, os lodos podem suprir elevadas quantidades de nitrogênio e fósforo, além de macro e micronutrientes, com exceção de potássio e boro (TSUTYA et al. 2001).

O experimento foi implantado em blocos casualizados (Figura 6.1). Foram aplicados 11 tratamentos com 3 repetições (blocos), totalizando 33

parcelas. Cada parcela possui 384 m² (24x16 m) e é constituída por 8 linhas. O espaçamento utilizado foi 2 m na linha e 3m na entrelinha, totalizando 64 plantas por parcela (Figura 6.2). A área útil da parcela considerou as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m² (Figura 6.3).

Os tratamentos aplicados para os dois tipos de lodo de esgoto tratados e higienizados, seguindo as determinações da norma CETESB (1999), foram:

- 1) Testemunha absoluta (sem adubação e sem aplicação de lodo de esgoto);
- 2) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido;
- 3) Adubação mineral (utilizada por empresas florestais na região de Itatinga);
- 4) 5 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 5) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido incorporado + complementação;
- 6) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 7) 20 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 8) 30 t ha⁻¹ lodo de esgoto úmido + complementação;
- 9) 10 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação;
- 10) 20 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação;
- 11) 30 t ha⁻¹ lodo de esgoto seco + complementação.



Figura 6.1 Transporte e distribuição no campo do lodo de esgoto úmido.



Figura 6.2 Lodo de esgoto distribuído nas linhas de plantio dos eucaliptos na dose de 30 toneladas por hectare (base seca).

A complementação foi realizada, nos tratamentos com aplicação de lodo, de modo a igualar a quantidade total de potássio e boro adicionada no tratamento com a adubação mineral convencional (Tabela 6.2). A complementação de cloreto de potássio foi realizada simultaneamente com as adubações de base e de cobertura do tratamento com adubação mineral. A dosagem do lodo nos tratamentos foi calculada sempre em base seca e para a sua cuidadosa aplicação foram utilizados recipientes especialmente calibrados.

Tabela 6.2 Quantidade de nutrientes adicionados ao solo (kg ha^{-1}) nos diferentes tratamentos através da distribuição dos lodos úmido e seco e da adubação mineral

Tratamentos	Insumo (por árvore)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Zn
		kg ha ⁻¹							
1 (Testemunha)	sem adubação	-	-	-	-	-	-	-	-
	TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	-
2 (10 t/ha úmido, sem complementação.)	26 kg de lodo úmido	32 0	320	26	24 8	48	66	0, 1	2 4
	TOTAL	32 0	320	26	24 8	48	66	0 1	2 4
3 (Adubação Mineral Convencional)	1,2 kg de calcário dolomítico	-	-	-	44 0	16 0	-	-	-
	160 g NPK 6:30:6 + 2% S + 0,5% Zn	16	80	16	-	-	5	-	1, 5
	70 g de Nitrato de Amônio	39	-	-	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	8 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	1, 5	-
	180 g de NPK 20:0:20+0,5% B	60	-	60	-	-	-	1, 5	-
	TOTAL	11 5	80	126	44 0	16 0	5	3	2
4 (5 t/ha úmido)	13 kg de lodo úmido	16 0	160	13	12 4	24	33	0, 1	2 1
	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	47 g de Cloreto de Potássio	-	-	47	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2, 9	-
	TOTAL	16 0	160	126	12 4	24	33	3	1 2
5 (10 t/ha úmido incorporado)	26 kg de lodo úmido	32 0	320	26	24 8	48	66	0, 1	2 4
	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	34 g de Cloreto de Potássio	-	-	34	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2, 9	-
	TOTAL	32 0	320	126	24 8	48	66	3	2 4
6 (10 t/ha úmido)	26 kg de lodo úmido	32 0	320	26	24 8	48	66	0, 1	2 4
	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	50 g de Cloreto de Potássio	-	-	50	-	-	-	-	-
	34 g de Cloreto de Potássio	-	-	34	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2, 9	-
	TOTAL	32 0	320	126	24 8	48	66	3	2 4
7 (20 t/ha úmido)	52 kg de lodo úmido	64 0	640	52	49 6	96	13 2	0, 1	4 8
	16 g de Cloreto de Potássio	-	-	16	-	-	-	-	-
	43 g de Cloreto de Potássio	-	-	43	-	-	-	-	-
	15 g de Cloreto de Potássio	-	-	15	-	-	-	-	-
	15 g de Bórax	-	-	-	-	-	-	2, 9	-

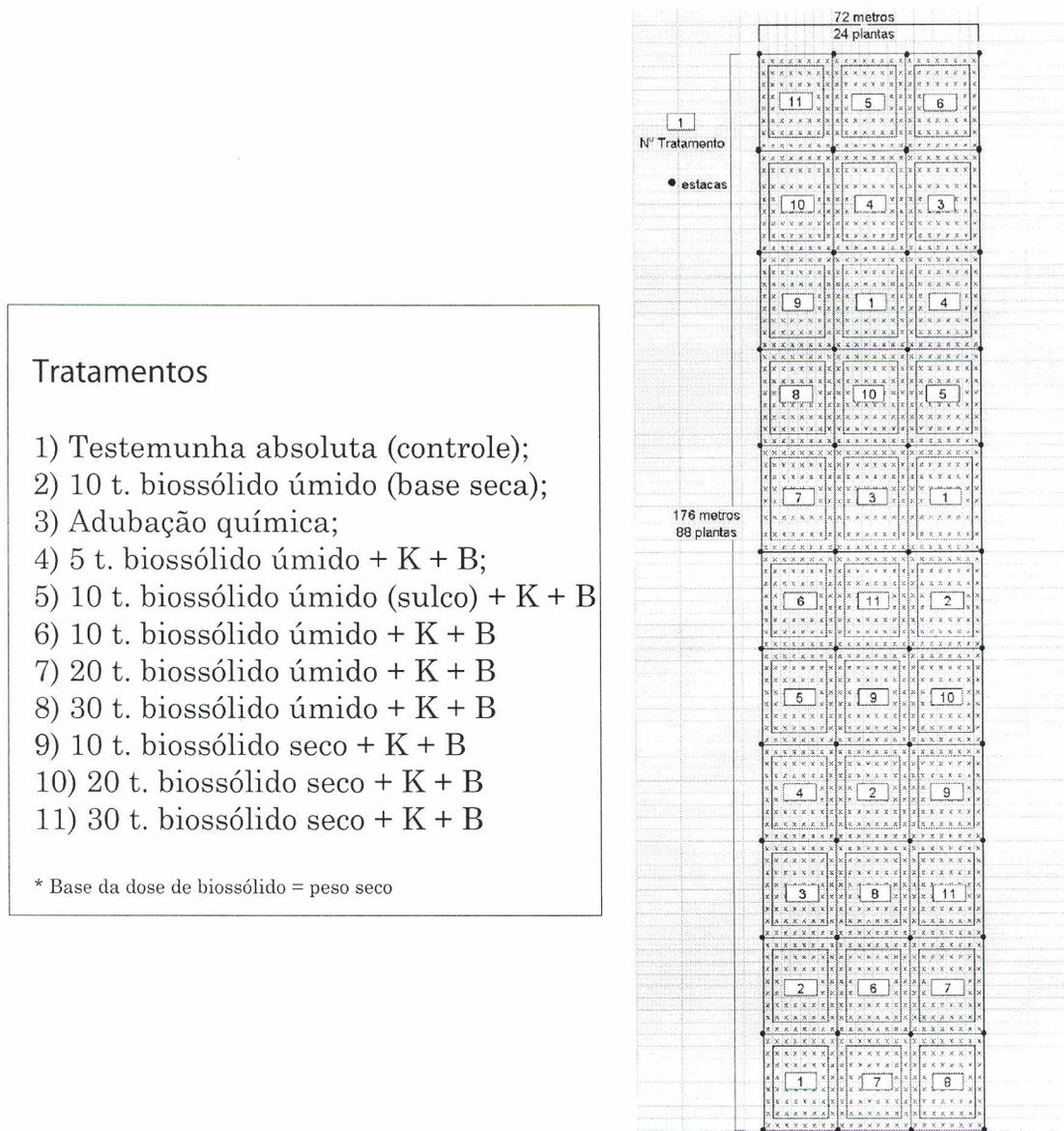


Figura 6.3. Croquis, representando a distribuição dos blocos e dos tratamentos com a aplicação de doses crescentes de lodos de esgoto (biossólidos) implantados na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga - SP.

Efeito sobre o crescimento das árvores e produção da biomassa lenhosa

A partir dos três meses de idade foram realizadas as medições de altura dos eucaliptos nas áreas úteis de todas as parcelas dos três blocos do

experimento (Figuras 6.4 e 6.5). As Figuras 6.6 e 6.7 representam a evolução do crescimento em altura dos eucaliptos tratados com doses crescentes dos lodos úmido e seco respectivamente.



Figura 6.4. Parcela de *Eucalyptus grandis* do tratamento testemunha, aos três meses de idade.



Figura 6.5 Parcela de *Eucalyptus grandis* do tratamento com 10 toneladas de lodo de esgoto por hectare, aos três meses de idade.

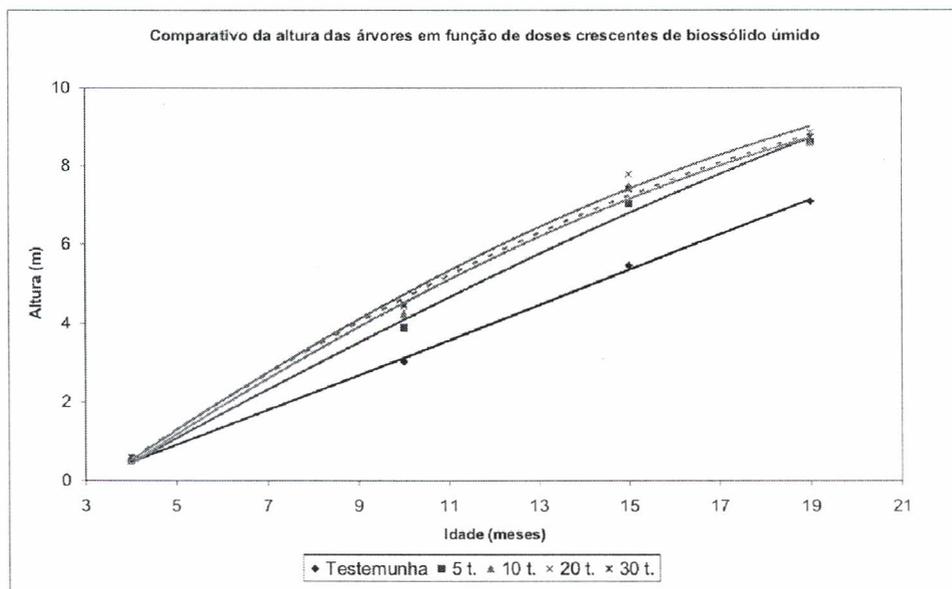


Figura 6.6 Crescimento em altura das árvores de *Eucalyptus grandis* tratadas com doses crescentes de lodo úmido (torta).

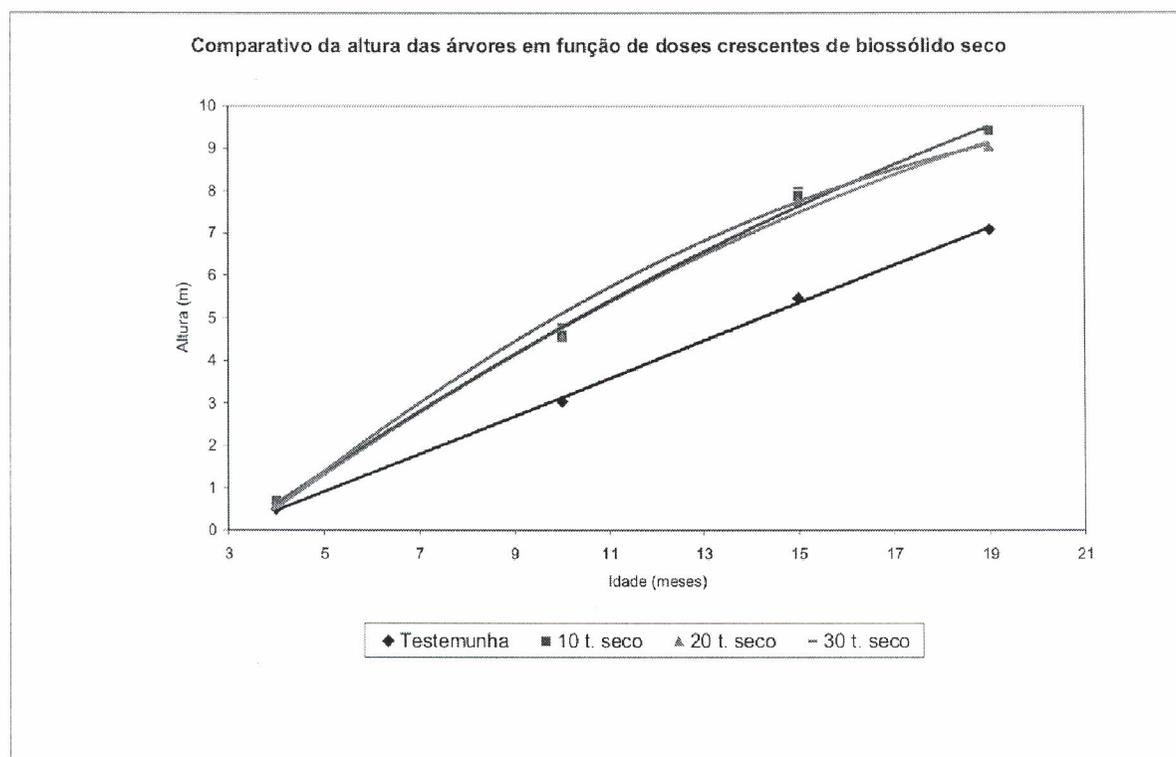


Figura 6.7 Crescimento em altura das árvores de *Eucalyptus grandis* tratadas com doses crescentes de lodo seco.

Observou-se, a partir das primeiras medições, que os biossólidos aplicados afetaram favoravelmente o crescimento dos eucaliptos em relação à testemunha e se igualam em relação ao adubo químico convencional. Entretanto, não se observaram diferenças significativas entre os efeitos das diferentes doses aplicadas dos lodos úmido e seco, variando de dez e trinta toneladas por hectare. Também, comparativamente, não se detectou diferença entre o efeito da aplicação dos lodos úmido e seco sobre o crescimento dos eucaliptos (Figura 6.8). Observou-se que a dose de 10 toneladas por hectare foi adequada, visto que resultou num crescimento equivalente ao proporcionado pelas maiores doses de 20 e 30 toneladas. Resultado semelhante foi obtido por Guedes (2005) em plantio experimental de eucaliptos, plantado em 1998, no qual o biossólido úmido produzido na ETE de Barueri e tratado com cal foi aplicado nas entrelinhas de plantio dos eucaliptos.

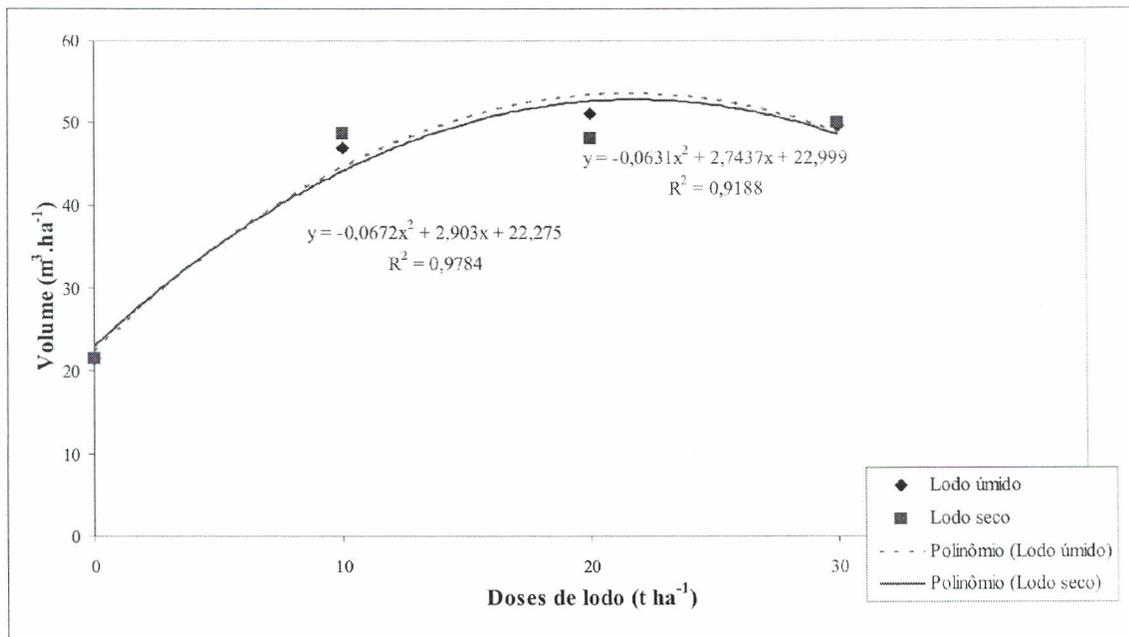


Figura 6.8 Volume de madeira produzido nas parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*, aos 19 meses de idade, em função das doses crescentes de lodo aplicadas, variando entre 5 e 30 toneladas por hectare (Poggiani, 2003).

Provavelmente, a quantidade de nutrientes supridos apenas com a adição de 10 toneladas por hectare de lodo, foi suficiente para estimular o crescimento. Portanto, a adição de doses mais elevadas seria supérflua, visto que outros fatores são limitantes para o crescimento das árvores em plantios florestais, tais como a disponibilidade de água no solo e a energia luminosa. Em plantações de eucaliptos, a competição por luz começa a afetar o crescimento a partir do fechamento das copas que, neste experimento, ocorreu aproximadamente aos 12 meses de idade. Esta resposta satisfatória dos eucaliptos à dose de 10 toneladas por hectare em relação à aplicação de doses mais elevadas é vantajosa também do ponto de visto econômico, visto que implica no transporte de uma menor quantidade de lodo da ETE para o local de aplicação, reduzindo os custos. Por outro lado, quanto menor a quantidade lodo aplicada, menor será o impacto sobre o solo, principalmente em relação à possível lixiviação dos nitratos. Corroborando este fato, resultados obtidos por Guedes (2000) evidenciaram que o eucalipto, se cortado entre cinco e seis anos de idade, exporta uma quantidade de nitrogênio equivalente à adicionada pela dose de 10 toneladas por hectare de bio-sólido aplicada ao solo.

Alteração da ciclagem dos nutrientes

a) Produção de folheto nos diferentes tratamentos

Para a quantificação do folheto produzido foram utilizados coletores (50x50 cm) construídos com tela de náilon (malha de 2 mm) e fixados sobre quatro piquetes, a 30 cm acima do solo (Figuras 6.9 e 6.10). As coletas foram realizadas mensalmente a partir do fechamento das copas, aos 12 meses de idade. Foram utilizados seis coletores por parcela, nos três blocos dos quatro tratamentos estudados, totalizando 72 coletores. Na Tabela 6.3, observa-se que a produção sazonal de folheto nos diferentes tratamentos teve um comportamento diferenciado, sendo que os tratamentos com aplicação de lodo propiciaram a deposição de uma quantidade de folhas 45% superior ao tratamento testemunha e muito semelhante ao tratamento com adubação mineral. O resultado indica que o lodo de esgoto estimulou o crescimento das árvores (Figuras 6.6 e 6.7) e a expansão da biomassa foliar em relação ao tratamento testemunha (Figuras 4 e 5 e Tabela 6.3).

Tabela 6.3 Folheto produzido pelos eucaliptos ao longo de 18 meses nos diferentes tratamentos (t/ha)

Estação	2004			2005			Total	
	outono	inverno	primavera	verão	outono	inverno		
Test.	0,30	1,05	0,67	1,75	0,89	1,15	5,81	b
Ad. Mineral.	0,36	2,02	0,78	1,88	1,46	1,82	8,31	a
10 úmido	0,46	2,41	0,86	1,69	1,40	1,67	8,49	a
10 seco	0,56	2,69	0,70	1,63	1,43	1,68	8,68	a
						Valor de F	9,73 (*)	

As observações de campo possibilitaram estabelecer certa relação entre as variações das condições climáticas e a produção de folheto, pois nos períodos de déficit hídrico, foram observadas as maiores taxas de deposição de folheto. Esse fato pode estar relacionado com a “estratégia” do eucalipto, que mesmo não sendo uma espécie caducifolia, procura diminuir o consumo de água nas épocas de estresse hídrico.

b) Quantificação do retorno de nutrientes ao solo via folheto

O folheto depositado nos coletores permitiu estimar comparativamente a biomassa produzida mensalmente. Conhecendo-se, através das análises laboratoriais, a concentração de cada nutriente no

folhede, foi possível se estimar a transferência de nutrientes das copas dos eucaliptos para o solo (ciclagem).

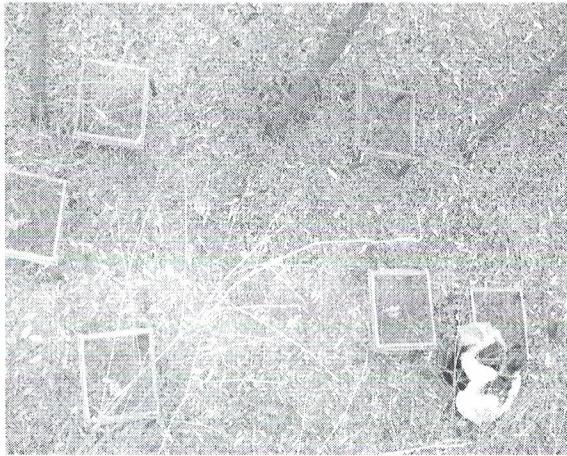


Figura 6.9 Distribuição dos coletores de folhede nas linhas e entrelinhas de plantio de *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idades.



Figura 6.10 Aspecto dos coletores de folhede colocados nas linhas e entrelinhas dos eucaliptos.

Observa-se na Tabela 6.4, que a quantidade de nitrogênio e de fósforo devolvida ao solo via folhede foi mais elevada nos tratamentos com a aplicação dos lodos, na proporção de 40% aproximadamente. O resultado pode ser atribuído, em grande parte, à maior quantidade de biomassa de folhas dos eucaliptos depositadas sobre o solo (Tabela 6.3). Nota-se que, nas parcelas dos tratamentos com a aplicação dos lodos úmido e seco, foram depositados via folhede respectivamente 76,2 e 75,2 kg de N por hectare, no período de dois anos. Trata-se de uma quantia bastante expressiva deste elemento reciclado no ecossistema, que corresponde aproximadamente a 24 % do nitrogênio aplicado via lodo e evidencia a sua mobilidade no solo e nas plantas. Para o fósforo, entretanto, esta proporção de retorno foi menor, devido principalmente à baixa movimentação deste elemento no solo.

No caso do potássio, ficou evidente o efeito do adubo mineral rico deste elemento e da própria complementação de potássio aos lodos aplicados. Neste caso, o potássio devolvido ao solo via folhede correspondeu a 14% do potássio adicionado ao solo via lodo de esgoto (Tabela 6.2). Com relação ao cálcio e magnésio, apesar destes elementos se apresentarem em concentrações relativamente baixas no lodo de esgoto, percebe-se nitidamente o efeito da calagem previamente efetuada no tratamento com adubo mineral, bem como o resultado da aplicação dos

lodos de esgoto. O estoque de enxofre apresentou-se praticamente igual em todos os tratamentos.

Tabela 6.4 Retorno de macronutrientes ao solo via folhede nos tratamentos testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ do lodo úmido e seco, no período de 2004 a 2005. (valores expressos em kg ha⁻¹).

	N	P	K	Ca	Mg	S
Test.	55,7	2,35	4,8	36,0	9,7	12,2
Ad. Mineral	70,6	2,35	18,5	67,1	23,0	13,2
10 úmido	76,2	3,31	17,6	57,6	14,3	12,9
10 seco	75,2	3,22	17,7	61,0	14,0	11,0

O retorno dos micronutrientes nos tratamentos: testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ do lodo úmido e seco no período de 2004 a 2005, é apresentado na Tabela 6.5. Observa-se que, com exceção do manganês, a adição dos lodos de esgoto às plantações florestais eleva de forma expressiva a quantidade de micronutrientes devolvidos via deposição do folhede. Isto vale principalmente para os elementos boro e zinco, sendo que o boro não provém do lodo de esgoto, mas da complementação deste elemento feita na implantação do experimento.

Tabela 6.5 Retorno de micronutrientes ao solo via folhede nos tratamentos testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ do lodo úmido e seco no período de 2004 a 2005. (valores expressos em g ha⁻¹)

	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Test.	153,4	141,8	1427,3	7046,0	73,8
Ad. Mineral	405,6	174,2	2076,5	6334,8	100,3
10 úmido	446,5	191,2	1945,9	7597,9	150,8
10 seco	503,8	260,8	2089,7	7473,8	128,7

c) Efeito dos lodos de esgoto úmido e seco sobre a decomposição do folhede

Para estudar a decomposição do folhede dos eucaliptos nos diferentes tratamentos foram utilizadas bolsas confeccionadas com telas de náilon (malha 0,5 cm), contendo 10 g de folhede seco e deixadas em

contato com o solo e a serapilheira nas parcelas experimentais, para simular a decomposição que ocorre naturalmente no campo (Figura 6.11). Um determinado número de bolsas foi coletado aos 45 e 90 dias, após o início do experimento e, posteriormente, a cada 3 meses. Após a coleta, o folheto em decomposição era cuidadosamente retirado das bolsas, limpo com o auxílio de um pincel e levado ao laboratório para secagem, pesagem e análise química.



a) na serapilheira;



b) no momento da coleta.

Figura 6.11 Bolsas de náilon destinadas ao estudo da decomposição do folheto em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* com doses crescentes de lodos.

Observa-se no gráfico da Figura 6.12, que a biomassa de folheto remanescente dentro das bolsas pode ser representada por uma regressão exponencial negativa, visto que inicialmente ocorre a degradação mais rápida de determinados compostos orgânicos contidos no folheto, tais como açúcares e celulose. Todavia, a decomposição dos compostos mais resistentes aos ataques dos microrganismos decompositores, como a lignina e os fenóis, pode levar muito tempo.

Desta forma, pode-se concluir que o folheto produzido nos tratamentos com a aplicação dos lodos apresentou, depois do primeiro ano, uma taxa maior de decomposição em relação ao tratamento testemunha e mesmo em relação ao tratamento com adubo mineral. Provavelmente, a maior concentração de macro e micronutrientes no folheto produzido nos tratamentos com lodo de esgoto e com adubo mineral, pode ter propiciado um aumento da atividade dos microrganismos decompositores.

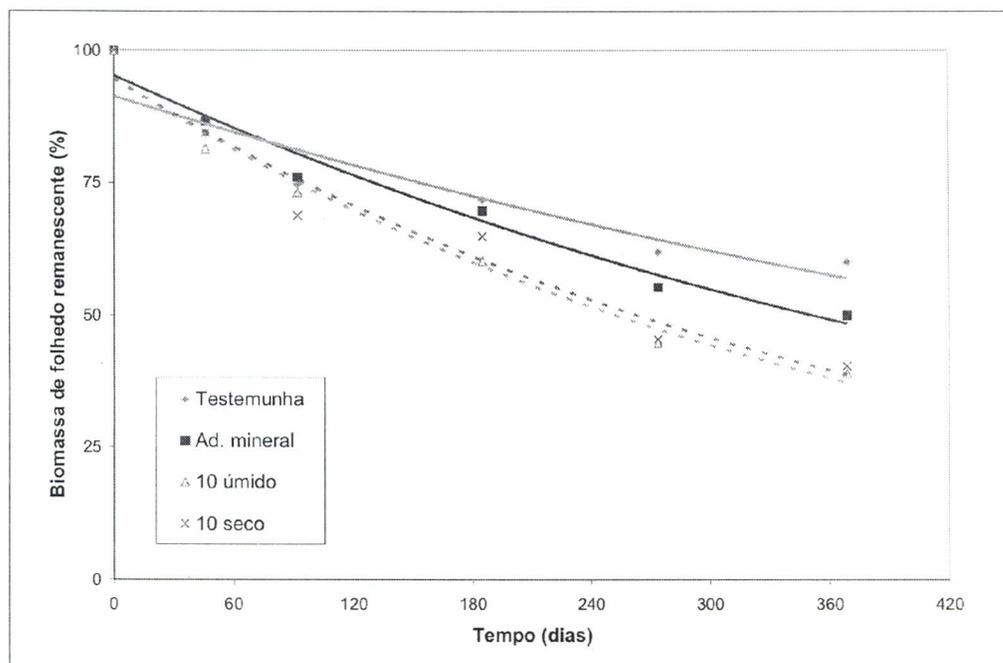


Figura 6.12 Biomassa de folheto remanescente ao longo do tempo nas bolsas de decomposição deixadas sobre o solo, entre a serapilheira acumulada, nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos.

d) Estoque de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo

O acúmulo de folheto sobre o solo das parcelas experimentais depende do balanço entre a biomassa de folheto depositado pelos eucaliptos e a biomassa de folheto decomposto, durante um determinado período de tempo, nas parcelas experimentais dos diferentes tratamentos. A Tabela 6.3 e a Figura 6.12 indicam, respectivamente, que ocorreu uma maior produção, mas também uma decomposição mais acelerada do folheto nos tratamentos onde foi aplicado o lodo e a adubação química, em relação à testemunha. (Tabela 6.6).

Tabela 6.6 Folheto acumulado sobre o solo (t ha⁻¹) nos tratamentos: testemunha, adubação química, 10 t ha⁻¹ do lodo úmido e seco.

Tratamentos	outono	inverno	média	
Test	3,4	3,3	3,4	b
Ad. mineral	4,9	4,5	4,7	a
10 úmido	3,8	3,7	3,7	b
10 seco	4,5	3,5	4,0	a b
		Valor F	6,28 (*)	

Por outro lado, a maior concentração de nutrientes no folheto dos tratamentos com lodo de esgoto e com adubo mineral justifica o estoque mais elevado de nutrientes nestes tratamentos em relação ao tratamento testemunha (Tabela 6.7). A diferença fica mais acentuada principalmente para os elementos: nitrogênio, potássio, cálcio, zinco e boro. Guedes (2005) encontrou no folheto acumulado sobre o solo em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis*, aos seis anos de idade e tratadas com 10 t ha⁻¹ de lodo de esgoto complementado com potássio, os seguintes estoques de nutrientes expressos em kg/ha: 163 de N, 8,2 de P, 175 de Ca, 10,5 de Mg 12,5 de S e 0,7 de Zn. Os maiores estoques de nutrientes encontrados por Guedes (2005) em relação aos indicados na Tabela 6.7, justificam-se principalmente em função da idade do povoamento (6 anos). No resultado obtido por este pesquisador, nota-se principalmente um estoque de cálcio muito elevado (175 kg/ha), que pode ser atribuído à grande quantidade deste elemento contido no lodo tratado com cal. Ao passo que neste trabalho de pesquisa, o lodo foi condicionado com polieletrólito.

Tabela 6.7 Valores médios dos estoques de nutrientes no folheto acumulado sobre o solo dos tratamentos: testemunha, adubação mineral e 10 t ha⁻¹ dos lodos úmido e seco.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	B
	Kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹		
Testemunha	42,0	1,5	1,2	17,4	4,5	2,5	68,6	65,9	74,9
Ad. mineral	54,7	1,8	4,5	33,1	10,9	3,5	90,9	71,5	180,2
10 t/ha úmido	41,5	1,6	3,0	21,3	5,5	2,8	51,4	92,4	134,8
10 t/ha seco	44,4	1,9	2,9	26,1	5,9	2,9	61,0	102,4	152,0

e) Reflexo dos tratamentos sobre a fertilidade do solo

Com o auxílio do trado foram coletadas amostras compostas de solo nas linhas de plantio, visando efetuar um estudo preliminar (aos 18 meses de idade) do reflexo dos diferentes tratamentos sobre a concentração dos macro e micronutrientes na camada superficial do solo entre 0 e 60 cm de profundidade. Todavia, para se avaliar de maneira adequada os resultados obtidos (Tabelas 6.8 e 6.9), deve ser esclarecido que a aplicação inicial dos lodos úmido e seco e também do adubo mineral, não foi efetuada de maneira uniforme em toda a superfície do solo das parcelas experimentais, mas apenas nas linhas de plantio. Desta forma, a aplicação

de 10 t ha^{-1} de lodo foi efetuada através do seu espalhamento concentrado numa faixa aproximada de 80 cm de largura, gerando um acúmulo de lodo e de adubo mineral apenas nas linhas de plantio (Figura 6.13). Para completar o estudo em relação ao efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo, será realizada uma nova coleta de amostras, quando o plantio atingir a idade de 36 meses. Nesta oportunidade, espera-se observar o efeito indireto da aplicação do lodo também nas entrelinhas de plantio, através do ciclo biogeoquímico dos nutrientes ao longo do tempo.

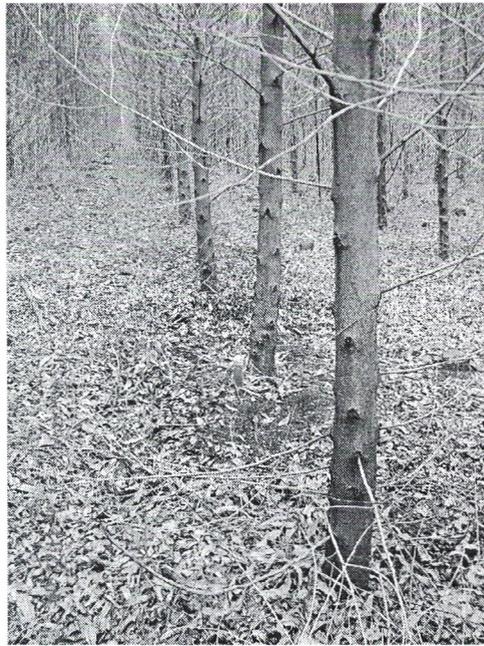


Figura 6.13 Vista do lodo de esgoto remanescente sobre o solo nas linhas de plantio dos eucaliptos, 25 meses após a aplicação de 30 t/ha .

Observa-se na Tabela 6.8, que a concentração de N na camada superficial do solo das parcelas experimentais dos tratamentos com a aplicação de lodo foi cerca de 30% mais elevada em relação à concentração no tratamento testemunha e semelhante ao tratamento com adubação química. A concentração do N no solo dos tratamentos com lodo de esgoto continua mais elevada em relação à testemunha na camada entre 5 e 10 cm de profundidade, mas se iguala na camada entre 10 e 20 cm de profundidade.

Quanto ao fósforo, observou-se um aumento de sua concentração com a aplicação dos lodos seco e úmido em relação aos demais (Tabela 6.8). A maior quantidade de P nesta camada superficial foi encontrada no

tratamento com lodo de esgoto seco termicamente. A diferença em relação ao lodo úmido pode ser atribuída à solubilização mais rápida do lodo granulado em contato com as partículas do solo. Neste caso, pode-se dizer que a maior concentração de fósforo em relação à testemunha é estatisticamente significativa até 10 cm de profundidade.

Em relação à concentração do potássio, observa-se que a diferença não foi significativa entre os tratamentos. Entretanto, as concentrações de potássio no solo dos tratamentos com aplicação de lodo foram numericamente superiores em relação ao tratamento testemunha e similares à adubação química. O potássio, que apresenta grande mobilidade no ecossistema, é rapidamente absorvido pelas raízes dos eucaliptos e novamente transferido para o estoque da serapilheira, formando assim um contínuo processo de ciclagem.

Por outro lado, o aumento significativo do teor de cálcio no solo do tratamento com adubo mineral, é justificado pela adição deste elemento através do adubo e principalmente devido à calagem, que libera prontamente este nutriente para o sistema radicular dos eucaliptos.

Tabela 6.8 Concentração de macronutrientes na camada superficial do solo entre 0 e 60 cm de profundidade em amostras coletadas nas linhas de plantio dos diferentes

Tratamentos	prof (cm)	N total	P		K		Ca		Mg		S-SO ₄ ²⁻	
		mg kg ⁻¹	mg dm ⁻³		mmolc dm ⁻³				mg dm ⁻³			
Test.	0-5	560	6,0	c	0,11	a	2,4	b	0,9	b	7,6	b
Ad. Mineral		730	4,3	c	0,39	a	14,1	a	14,2	a	6,9	b
10 úmido		700	61,4	b	0,39	a	5,1	b	1,4	b	20,2	a
10 seco		700	119,3	a	0,36	a	10,9	a	2,7	b	16,8	a
Valor de F		nd	11,2	(**)	1,30	(ns)	16,8	(**)	20,8	(**)	(**)	13,9
Test.	5-10	490	4,4	b	0,03	a	2,0	b	1,2	b	6,5	c
Ad. Mineral		420	3,9	b	0,22	a	9,8	a	10,4	a	7,6	c
10 úmido		560	9,0	a	0,17	a	1,5	b	0,6	b	25,6	a
10 seco		560	15,6	a	0,17	a	3,0	a b	0,8	b	17,2	b
Valor de F		nd	5,2	(*)	1,67	(ns)	3,50	10,0	8,17	(*)	(**)	27,9
Test.	10-20	350	3,0	a	0,03	a	1,9	a	1,1	b	9,9	c
Ad. Mineral		350	3,4	a	0,00	a	5,9	a	6,0	a	8,8	c
10 úmido		420	11,0	a	0,06	a	2,0	a	0,6	b	37,4	a
10seco		350	8,3	a	0,06	a	2,3	a	0,8	b	23,7	b
Valor de F		nd	1,50	(ns)	0,55	(ns)	3,27	(ns)	9,14	(*)	(**)	23,6
Test.	20-50	350	2,4	a	0,00	a	1,0	a	0,4	a	9,5	c
Ad. Mineral		350	3,0	a	0,00	a	2,9	a	2,2	a	12,2	c
10 úmido		350	8,3	a	0,00	a	1,4	a	0,5	a	59,5	a
10 seco		350	9,2	a	0,00	a	1,5	a	0,6	a	42,4	b
Valor de F		nd	1,58	(ns)	nd		1,6	(ns)	2,2	(ns)	(**)	75,23

Até 20 cm de profundidade, os maiores teores de Mg no solo foram observados no tratamento com adubação mineral (Tabela 6.8). Na camada entre 0 e 10 cm de profundidade, o Mg chegou a apresentar uma concentração 10 vezes superior aos tratamentos com lodo, que pode ser atribuída à calagem previamente efetuada apenas no tratamento com adubo mineral. Deve ser salientado que o magnésio foi o único nutriente adicionado ao solo em quantidade três vezes maior através da calagem no tratamento com adubação mineral, ao passo que os demais nutrientes foram adicionados em maior quantidade pelos tratamentos com aplicação de lodo de esgoto.

Para o enxofre, os maiores teores observados nos tratamentos com lodo já eram esperados, em virtude de sua elevada concentração neste resíduo. Observa-se que o enxofre é o único nutriente que eleva sua concentração em maior profundidade, conforme observado nas camadas mais profundas. Em decorrência de sua carga negativa, o SO_4^{-2} é menos atraído para a superfície da argila do solo e da matéria orgânica, comparativamente aos cátions. Permanece, portanto, em sua maioria, na solução do solo e se movimenta facilmente, com facilidade de lixiviação. O enxofre, quando necessário, é normalmente adicionado ao solo para aumentar a produtividade das culturas em doses que podem atingir 450 kg/ha e, portanto, muito superiores à aplicada através do lodo de esgoto neste experimento (Tabela 6.2).

A concentração dos micronutrientes na camada do solo entre 0 e 5 cm de profundidade é apresentada na Tabela 6.9. Considerando que estes elementos se apresentam com teores muito baixos no solo, a variabilidade dos resultados das análises químicas impede uma interpretação mais conclusiva. Todavia, como era esperado, observa-se um aumento dos metais Cu e Zn, devido às concentrações existentes no lodo aplicado neste experimento produzido na ETE de Barueri. Sabe-se que esta ETE recebe o esgoto proveniente da região metropolitana de São Paulo, onde numerosas indústrias despejam seus resíduos. Concentrações de metais semelhantes foram também encontradas por Rezende (2005) em parcelas experimentais de eucaliptos, aos cinco anos de idade, onde foram aplicadas 20 toneladas de lodo de esgoto úmido por hectare. Abaixo de 10 cm de profundidade, apenas o Zn apresentou aumento significativo com a aplicação do lodo de esgoto (Tabela 6.9).

Foi observado que a aplicação de doses crescentes de lodo provocou incrementos diferenciados no volume dos eucaliptos e que a dose mais adequada a ser aplicada estaria ao redor de 10 t ha⁻¹. Há indicativo, também, que os lodos úmido e seco aplicados nas linhas de plantio provocaram, aos 19 meses de idade, incrementos semelhantes em volume de madeira.

Tabela 6.9 Concentração de micronutrientes na camada do solo entre 0 e 60 cm de profundidade em amostras coletadas na linha de plantio dos diferentes tratamentos, 18 meses após o início do experimento.

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

A aplicação de lodo refletiu-se de maneira positiva sobre a ciclagem de nutrientes, aumentando a produção de folheto e conseqüentemente a transferência de nutrientes das copas dos eucaliptos para a serapilheira e para o solo.

Observou-se também aumento da taxa de decomposição do folheto nos tratamentos com a adição do lodo de esgoto, provavelmente em virtude do aumento da concentração de macro e micronutrientes nas folhas dos eucaliptos, depositadas sobre o solo ao longo do tempo. Pode-se dizer que o uso do lodo de esgoto, neste experimento, não gerou impactos deletérios sobre a camada do solo, entre 0 e 60 cm de profundidade.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, C.A. Fração orgânica de biossólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com eucalipto. 2005. 121p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

ANDRADE, C.A. Nitratos e metais pesados em solos e plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólidos da ETE Barueri. 1999. 65p. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

ANDRADE, C.A.; MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, n.58, p.59-72, 2000.

ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C. ; MADER NETTO, O.S. Desidratação de lodo aeróbio e séptico através de uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem uso de polieletrólitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

AMBIENTAL, 21, João Pessoa, 2001. Anais. (CD-ROM)

BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T.; FRANCO, B.J.D.C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. *O solo*, v.75, n.1, p.44-54, 1982.

CETESB. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas Critérios para projeto e operação (Manual Técnico) P 4.230. São Paulo, CETESB, 1999, 33 p.

CETESB. Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 2001.

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

EL-BAHA A.M. Growth response of *Eucalyptus camaldulensis* as affected by thinning and sewage sludge or inorganic fertilizer on a poor quality site. *Alexandria Journal of Agricultural Research*, v.46, n.1, p.269, 2001.

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

- FARIA L.C.; RODRIGUES, L.C.E. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: 5-avaliação do potencial de uso do resíduo da ETE de Barueri, SP. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed). Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.12, p.209-213.
- FJÄLLBORG, B.; HLBERG, G.; ILSSON, E. DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. *Environment International*, v.31, n.1, p.25-31, 2005.
- FORTES NETO, P. Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas. 2000. 113p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- GUEDES, M.C. Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis*. 2005. 154p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- GUEDES, M.C. Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantações de eucalipto. 2000. 74p. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- GUEDES, M.C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. *Scientia Forestalis*, n.63, p.188-201, 2003.
- HARRISON, R. B.; GUERRINI, I. A.; HENRY, C. L.; COLE, D. W. Reciclagem de resíduos industriais e urbanos em áreas de reflorestamento. *Circular Técnica IPEF*, n.198, p.1-21, 2003.
- HARRISON, R.B.; XUE, D.; HENRY, C.; COLE, D.W. Long-term effects of heavy applications of biosolids on organic matter and nutrient content of a coarse-textured forest soil. *Forest Ecology and Management*, v.66, p.165-177, 1994.
- HART, J.B.; NGUYEN, P.V.; URIE, D.H.; BROCKWAY, D.G. Silvicultural use of wastewater sludge. *Journal of Forestry*, v.71, p.17-24, 1988.
- HENRY, C.L.; COLE, D.W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. *Biomass and Bioenergy*, v.13, n.4/5, p.269-277, 1997.
- HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HARRISON, R.B.; BENGTSSON, J.; LUNDKVIST, H. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Packe Forest Sludge Research Program. *Forest Ecology and Management*, v.66, n.1/3, p.137-149, 1994.
- HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HINCKLEY, T.M.; HARRISON, R.B. The use of municipal and pulp paper sludge to increase production in forestry. *Journal of Sustainable Forestry*, v.1, n.3, p.41-45, 1993.
- KAPOSTS, V.; KARINS, Z.; LAZDINS, A. Use of sewage sludge in forest cultivation. *Baltic Forestry*, v.6, n.2, p.24-28, 2000.

KRONKA, F.J.N. et al. Mapeamento e quantificação do reflorestamento no estado de São Paulo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8, São Paulo, 2003. Benefícios, produtos e serviços da floresta: oportunidades e desafios do século. São Paulo, 2003. (CD-ROM, disco 2).

LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T.I.; DAICLE, S. Effect wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two *Salix* species. *Plant and Soil*, v.17, n.1/2, p.303-316, 1995.

LEONARD, P.; MCKINNEY, B. Biosolids application to forests: implementation and operations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE USE OF RESIDUALS AS SOIL AMENDMENTS IN FOREST ECOSYSTEMS, Seattle, 1997. Proceedings. Seattle, 1997. p.73-78.

LUDUVICE, M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.) Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 5, p.153-162.

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

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

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

MORAIS, S.M.J.; ATAIDES, P.R.V.; GARCIA, D.C.; KURTZ, F.C.; OLIVEIRA, O.S.; WATZLAWICK, J.F. Uso de lodo de esgoto da CORSAN, Santa Maria (RS), comparado com outros substratos orgânicos. *Sanare, Curitiba*, v.8, n.8, p.44-49, 1997.

PHILLIPS, R.P.; FISHER, J.T.; MEXAL, J.G. Fuelwood production utilizing *Pinus elliottii* and sewage sludge fertilizer. *Forest Ecology and Management*, v.16, p.95-102, 1986.

POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* implicações silviculturais. 1985. 211p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.
POGGIANI, F. Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2003. 93p. (Relatório Semestral Técnico-Científico, n.12).

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

POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucalipto. *Silvicultura*, n.80, p.48-52, 1999.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: 1- reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed). *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. (Ed). *Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species*. Proceedings of the Joint Australian/Japanese Workshop held in Australia. Melbourne, 1995. p.100-109.

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

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

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

SMITH, C.T.; CARNUS, J.M. Biosolids: planning and design. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE USE OF RESIDUALS AS SOIL AMENDMENTS IN FOREST ECOSYSTEMS, Seattle, 1997. Proceedings. Seattle: University of Washington, 1997. p.45-52.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUE, M.O. (Ed). *Biossólidos na Agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001. cap.5, p.133-180.

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

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

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

VELASCO-MOLINA, M. Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após aplicação de biossólido. 2004. 62p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

Vieira, R.F.; Silva, C.M.M.S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. Brazilian Journal of Microbiology, São Paulo, v.34, 2005.

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