

JOSÉ CARLOS PÖPPL NETO

**Bário, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, selênio e zinco no ambiente
canavieiro adubado com composto de lodo de esgoto
Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011**

**Dissertação apresentada ao Centro de Energia
Nuclear na Agricultura da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Ciências**

**Área de Concentração: Química na Agricultura e
no Ambiente**

**Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu
Junior**

**Piracicaba
2013**

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Pöppl Neto, José Carlos

Bário, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, selênio e zinco no ambiente canavieiro adubado com composto de lodo de esgoto / José Carlos Pöppl Neto; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.

44 p.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Adubo de esgoto 2. Biorremediação 3 Cana-de-açúcar 4. Compostagem
5. Disposição no solo de lodo 6. Metais pesados 7. Toxicidade do solo I. Título

CDU 631.879.2 : 633.61

Aos meus pais José Carlos e Maitê pelo amor, apoio e educação. Por terem feito de mim o homem que sou hoje. Sem eles nada seria.

A minha irmã, Fernanda, pelo amor, amizade e exemplo de sucesso a ser seguido, no qual me inspiro. Por me alegrar nos momentos de dificuldade.

À minha namorada, Cristiane, pelo amor e apoio incondicional. Por estar ao meu lado em todos os momentos, ombro amigo e aconchegante, obrigado por me fazer feliz.

Aos meus Tios, Renato e Tania, pelo apoio e conselhos valiosos. Carinha, estamos juntos para o quer der e vier. Tia, sentimos muito sua falta.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, o dom da vida e da saúde.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo, a estrutura oferecida para o desenvolvimento de meus trabalhos.

Ao Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior a orientação, incentivo, apoio, compreensão nas dificuldades surgidas ao longo do mestrado e a amizade durante esses anos.

Aos meus colegas de casa Amaral, Leandro e Zumbi o apoio durante a execução do mestrado, amizade e descontração.

À Coordenadoria do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) a concessão da bolsa de mestrado e auxílio financeiro à pesquisa (processo 130330/2011-6) e a Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP) o auxílio financeiro à pesquisa (processo 07/54720-3).

Ao Prof. Dr. José Lavres Junior a amizade, pelos ensinamentos e por sempre estar disposto a ajudar.

Ao Supervisor de desenvolvimento agrônomo Antônio Palhares, da Usina Costa Pinto, Grupo RAÍZEN S/A, que foi quem nos ajudou na escolha da área experimental e prestou auxílio em todas as etapas do experimento.

À Usina Santa Helena, Grupo RAÍZEN S/A, por nos conceder a área para a realização do experimento e, especialmente, ao Sr. Doli e a todos os funcionários de campo e do laboratório da Usina, que ajudaram em várias etapas do experimento.

À Empresa Biossolo, Agricultura e Ambiente, pelo fornecimento do composto de lodo de esgoto e ao Dr. Fernando Carvalho Oliveira, pelo auxílio e ensinamentos imprescindíveis para a execução desse trabalho.

Às Biólogas Cleusa Pereira Cabral e Henriqueta Maria Gimenes Fernandes, o apoio e auxílios prestados durante as análises laboratoriais, e a Sra. Suzineide Manesco a ajuda nas diferentes etapas do mestrado.

Aos estagiários do LNMP do CENA/USP: André Luiz Borges Trombeta, Camila dos Santos Vieira, Felipe Teixeira de Freitas, Keyla Boralli e Saulo Augusto Quassi de Castro por estarem sempre dispostos a ajudar e a dedicação prestada. Vocês foram fundamentais na condução e finalização desse trabalho e dessa etapa da minha vida.

Ao pesquisador Dr. Felipe Carlos Alvarez Villanueva o auxílio nas atividades laboratoriais, em especial nas análises com o ICP-MS.

Aos colegas de sala Cintia, Lucia, Marcandalli e Renatão o companheirismo, amizade e apoio.

A todos os colegas do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas (LNMP) do CENA/USP o companheirismo, a ajuda e troca de experiências profissionais.

À Seção de Apoio Acadêmico e PG-CENA/USP por serem tão solícitos e a atenção especial que dispensaram a mim.

À Seção da Secretaria do PG-CENA/USP pela ajuda em diversos momentos, especialmente a Daiane, Fábio, Sôzinha e Neuda.

À Seção Técnica da Biblioteca do CENA/USP, especialmente à Marília Henyei, a revisão das normas da tese.

Agradeço a todos os professores e funcionários do CENA/USP, sempre gentis e solícitos.

"Na vida só existe um caminho: sangue, suor e lágrimas!"

Meu Pai

RESUMO

PÖPPL NETO, J. C. **Bário, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, selênio e zinco no ambiente canavieiro adubado com composto de lodo de esgoto.** 2013. 42 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Para o uso agrícola de composto de lodo de esgoto, há escassez de informações sobre os elementos Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn, que podem contaminar o ambiente. Os elementos Ba, Cd, Cr, Ni e Pb, metais pesados e o Se, um ametal, de modo geral, têm sido pouco avaliados, principalmente pelos baixos teores no solo e na planta. Dessa forma, com o presente estudo, objetivou-se avaliar os teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no solo e na cultura da cana-açúcar em função da aplicação de composto de lodo de esgoto. O experimento foi conduzido em área comercial de produção de cana-de-açúcar, primeira cana soca cultivada em Argissolo Vermelho distrófico. Foram aplicadas quatro doses de composto de lodo (0; 14,7; 29,4 e 44,5 t ha⁻¹, base seca), quatro de nitrogênio (0, 36,3 ; 72,6 e 110 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0, 30 kg ha⁻¹), em delineamento experimental de blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4x2, com três repetições. Foram aplicados 77 kg ha⁻¹ de K₂O em todas as parcelas para suprir a falta desse nutriente no composto. Os teores dos metais pesados foram determinados por espectrometria de massas com plasma acoplado (ICP-MS). A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado não resultou em incremento nos teores dos metais pesados no solo e na planta. A aplicação do composto resultou em incremento de duas vezes nos teores iniciais de Zn no solo e na planta. Para Cd, Ni, Pb e Se, houve aumento nos teores do solo e da planta, em faixas que variam de 12% a 60%, em relação ao tratamento sem composto. Para o Cu, foi observado um incremento de 13% no solo, porém sem alterar o teor na planta. Os teores Ba e Cr no solo e na cana-de-açúcar não foram alterados pela aplicação do composto de lodo de esgoto. Para todos os elementos, os teores observados estiveram dentro da faixa considerada normal para solo e planta. A aplicação de composto de lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos e no modelo de condução do experimento de um ano de cultivo, não resulta em contaminação do ambiente canavieiro pelos elementos avaliados.

Palavras-chave: Compostagem. Composto classe “D”. Contaminação do Solo. Elementos traços. Metais pesados. Saccharum spp.

ABSTRACT

PÖPPL NETO, J. C. **Barium, cadmium, chromium, copper, nickel, lead, selenium and zinc in the sugarcane environment fertilized with compost of sewage sludge.** 2013. 42 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

For agricultural use of sewage sludge compost, there is few information on the elements Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se and Zn, that can contaminate the environment. The elements Ba, Cd, Cr, Ni and Pb, heavy metals, and the Se, one nonmetal, generally have been little evaluated especially by low levels in soil and plant. The present study objected to evaluate the effects of application of sewage sludge compost on the content of Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se and Zn in soil and the sugar cane. The experiment was conducted in a commercial area of production of sugarcane, first ratoon cane, cultivated in a Rhodic Paleudalf. There were applied four doses of sludge compost (0, 14.7, 29.4 and 44.5 t ha⁻¹, dry basis), four of N rates (0, 36.3, 72.6 and 110 kg ha⁻¹) and two of P₂O₅ (0 and 30 kg ha⁻¹), in a randomized block design in a factorial scheme 4x4x2 with three replications. Were applied 77 kg ha⁻¹ of K₂O in all plots to supply the lack of this nutrient in the compost. The concentration of heavy metals were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The rates of nitrogen and phosphate fertilizers did not result in increase in concentration of heavy metals in soil and plant. The compost application rates resulted in an increase of twice the initial concentration of Zn in soil and plant. The concentration of Cd, Ni, Pb and Se increased in soil and plant, ranging from 12% to 60%, compared to treatment without compound. For Cu, there was a 13% increase in the soil, without changing in the plant. The concentration of Ba and Cr in soil and sugarcane were not altered by the application of compost of sewage sludge. For all elements, the levels found were within the range considered normal for soil and plant. The application of sewage sludge compost, following the technical criteria and the model of conducting the experiment of one year of cultivation, does not result in contamination in the sugarcane environment by the elements evaluated.

Keywords: Composting. Compost class “D”. Heavy metals. *Saccharum* spp. Soil contamination. Trace elements.

LISTA DE FIGURA

FIGURA 1 VALORES MENSIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (P) ACUMULADA AO LONGO DO EXPERIMENTO COM APLICAÇÃO DE COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO EM CANA-SOCA DESDE A INSTALAÇÃO (1) ATÉ A COLHEITA (2).....	19
FIGURA 2 - PARCELA DO EXPERIMENTO	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE REFERÊNCIA DE QUALIDADE DE SOLO DO ESTADO DE SÃO PAULO DOS METAIS AVALIADOS.....	17
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO, PARA FINS DE FERTILIDADE DO SOLO, ANTES DA APLICAÇÃO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO	20
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO UTILIZADO NO EXPERIMENTO	21
TABELA 4 - ANÁLISE QUÍMICA DA AMOSTRA CERTIFICADA STANDARD REFERENCE MATERIAL 1515 – APPLE LEAVES E LIMITES DE DETECÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO (MDL).....	24
TABELA 5 - TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO (MG KG ⁻¹) APÓS 20 DIAS DA APLICAÇÃO DO COMPOSTO DE LODO, EM FUNÇÃO DA DOSE. (P < 0,10)	26
TABELA 6 - DIFERENÇAS ENTRE OS TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO (MG KG ⁻¹) NA DOSE DE 44,5 T HA ⁻¹ DE COMPOSTO, COM 20 DIAS E 209 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DO COMPOSTO DE LODO.	29
TABELA 7 - TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO (MG KG ⁻¹) APÓS 209 DIAS DA APLICAÇÃO DE COMPOSTO DE LODO, EM FUNÇÃO DA DOSE. (P < 0,10)	30
TABELA 8 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS NO COLMO (MG KG ⁻¹) EM FUNÇÃO DA DOSE DE COMPOSTO DE LODO (P < 0,10).	31
TABELA 9 - ACÚMULO DE METAIS PESADOS NOS COLMOS (G HA ⁻¹), EM FUNÇÃO DAS DOSES DE COMPOSTO DE LODO (P < 0,10).	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	14
2.2 O COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO.....	15
2.3 METAIS PESADOS NO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO.....	16
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	19
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO UTILIZADO	21
4.3 INSTALAÇÃO E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	22
4.4 AMOSTRAGEM DE SOLO	23
4.5 ANÁLISES QUÍMICAS	24
4.6 ACÚMULO DE METAIS PESADOS NOS COLMOS	25
4.7 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	26
5.2 METAIS PESADOS NO SOLO.....	26
5.2.1 <i>Metais pesados aos 20 dias após a aplicação do composto</i>	26
5.2.2 <i>Metais pesados residuais remanescentes aos 209 dias após a aplicação do composto de lodo</i>	28
5.3 METAIS PESADOS NO COLMO	31
5.4 ACÚMULO DE METAIS PESADOS NOS COLMOS E PRODUTIVIDADE.....	33
6. CONCLUSÃO	34
7. RECOMENDAÇÕES E COMENTÁRIOS.....	35
REFERÊNCIAS	36
8. ANEXOS	42

1. INTRODUÇÃO

O uso agrícola de lodo de esgoto e seus derivados tem como fator comum o controle dos limites dos elementos inorgânicos potencialmente tóxicos, arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), molibdênio (Mo), níquel (Ni), chumbo (Pb), selênio (Se) e zinco (Zn), e de concentração de patógenos (CONAMA, 2006). Para fomentar informações para o amparo à pesquisa sobre o uso agrícola de lodo de esgoto, a maioria dos trabalhos realizados nas últimas décadas foram focados nos elementos listados na legislação, principalmente os catiônicos.

Nesse sentido, foram criadas legislações específicas visando à proteção do ambiente e da saúde da população, dentre as quais podem ser citadas a Resolução nº 375 do CONAMA (CONAMA, 2006) adotada na esfera Federal e a Decisão da Diretoria nº 195-2005-E da CETESB (CETESB, 2005) adotada no estado de São Paulo.

A partir do ano de 2006, houve redução no número de projetos agronômicos para aplicação do lodo de esgoto nos solos do Estado de São Paulo, devido às dificuldades, ou mesmo falta de interesse, em se elaborar projetos e em se licenciar as unidades geradoras de lodo para a aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados no solo agrícola, conforme preconizado pela norma CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006).

Uma das alternativas para se dispor corretamente o lodo de esgoto no solo é por meio do processo de compostagem. A compostagem é um processo de redução da atividade de patógenos e atratividade de vetores do lodo, que altera a toxicidade dos elementos e substâncias potencialmente tóxicas presentes no lodo, e que, portanto, reduz os possíveis efeitos negativos dos patógenos, elementos e substâncias tóxicas no solo. O lodo compostado é um produto seguro para aplicação nos solos agricultáveis, passível de registro como fertilizante orgânico Classe “D”, conforme estabelecido pela Instrução Normativa da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2009).

Com o advento da compostagem, a aplicação de composto de lodo de esgoto está se tornando uma prática cada vez mais comum na agricultura, devido, principalmente, à sua capacidade de fornecer nutrientes às culturas e proporcionar produtividades semelhantes ao do manejo com adubação mineral convencional, afora ser uma alternativa economicamente viável para as estações de tratamentos de efluentes disporem desse lodo. Entretanto, se o uso do composto de lodo não seguir à corretos critérios agronômicos, esta prática também poderá

causar a introdução de contaminantes inorgânicos indesejáveis, como, por exemplo, excesso de metais pesados no solo e nas culturas.

O termo “Metal Pesado” é comumente designado a um grupo de metais com alto peso molecular, componentes naturais da crosta terrestre (HASHIM, et al., 2011). Essa definição não é a mais apropriada, em face do largo uso na literatura e ao grande número de elementos metálicos que abrange. Contudo, nos estudos das plantas superiores é comumente usada para designar o grupo de metais e até não metais, como o selênio, que, devido às suas características químicas e concentração, são considerados tóxicos aos seres vivos e, dificilmente será eliminada dos estudos de plantas. No presente estudo, o termo metal pesado é utilizado para designar o grupo dos elementos inorgânicos potencialmente tóxicos, objeto do presente estudo.

Dentre os elementos avaliados, Pb, Ba, Cd, Cr e Se são intrinsecamente tóxicos. No entanto, não são muitos os trabalhos que consideram esses elementos no solo e nas plantas com a aplicação de composto de lodo e, para a maioria, são escassas as informações existentes. Os elementos Ni, Cu e Zn são micronutrientes de plantas, porém em altas concentrações podem ultrapassar as necessidades da cultura e causar fitotoxicidade, devido a uma dose elevada de um do composto por exemplo.

No solo, os metais introduzidos podem seguir diversos caminhos. Um deles é a pronta liberação, tornando-se disponíveis às culturas, ou, ainda podem ser imobilizados pela matéria orgânica. Porém, há controvérsias sobre essa evolução da disponibilidade do metal após a aplicação e, ainda, sobre a capacidade de retenção do metal pelo solo com o tempo (STACEY; MERRINGTON; MCLAUGHLIN, 2001).

Em face da possibilidade da aplicação do composto de lodo de esgoto, sem prejudicar o ambiente, surge a hipótese: O uso agrícola de composto de lodo de pode contribuir para a diminuição da adubação mineral convencional na cultura da cana-de-açúcar sem prejudicar o ambiente devido a presença de metais pesados no composto. Juntamente com esse e outros questionamentos o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação do composto de lodo de esgoto na cultura de cana-de-açúcar quanto à influência de metais pesados no solo e na planta, bem como subsidiar futuras pesquisas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), da família das Poaceas, é uma planta semiperene de clima tropical e subtropical (FIGUEIREDO, 2008), sendo a maioria das variedades comerciais híbridos multiespecíficos.

O Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área destinada a atividade sucroalcooleira estimada em 8.893,0 mil hectares (CONAB, 2013), está em constante expansão das lavouras, com acréscimo de 4,8% em relação à safra passada de 2012. O estado de São Paulo é o seu principal produtor do país, com 51,3% da produção brasileira. Estima-se, no corrente ano, uma produção de 594,07 milhões de toneladas, 11,5% maior que a produção anterior (CONAB, 2013).

A cana-de-açúcar destinada principalmente à produção de açúcar e etanol, biocombustível, também é fonte de biomassa utilizada nas usinas sucroalcooleiras para a produção de energia que contribuem para a diminuição das emissões dos gases do efeito estufa, associados ao processo produtivo e ao transporte (BRAGA, 2013).

A cultura de cana-de-açúcar possui um alto potencial para aplicação do composto de lodo de esgoto, tendo em vista que a mesma é uma cultura não consumida *in natura*, sendo destinada principalmente à produção de etanol e de açúcar. O colmo da cana, na produção de açúcar, sofre processos de industrialização físico-químicos, os quais eliminam a presença de patógenos e elementos potencialmente tóxicos ao homem. Na produção de etanol, os elementos potencialmente tóxicos, também em sua maioria, são eliminados durante o processo de fabricação (MARQUES; TASSO JUNIOR, 2001). Dentre outras vantagens, está o alto grau de tecnificação da produção de cana-de-açúcar, com elevado índice de mecanização das lavouras, o que diminui o contato do composto com o trabalhador rural e a proximidade das áreas cultivadas dos grandes centros urbanos, facilitando, assim, a disposição do lodo de esgoto gerado nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE).

São reduzidos os relatos na literatura sobre a utilização de composto de lodo de esgoto na agricultura (BRAGA, 2013; MORETTI, 2013). Entretanto, são encontrados diversos trabalhos que relatam o uso do lodo de esgoto (BERTONCINI et al., 2004; MARQUES et al., 2007; CHIBA et al., 2009; FRANCO et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2013) e composto de lixo urbano (OLIVEIRA et al., 2002; ROSSETTO et al., 2002) na cultura da cana-de-açúcar.

2.2 O composto de lodo de esgoto

O número de municípios brasileiros que não possuem saneamento básico é elevado, aumentando a demanda por Estações de Tratamento de Efluentes no país. Com a alta demanda por ETE, surge um novo óbice: o lodo proveniente do tratamento de esgoto. Sabe-se que o custo para disposição correta em aterros sanitários do lodo de esgoto está em torno de 50% do custo operacional de uma ETE. No entanto, esse lodo pode ser utilizado para outras finalidades economicamente mais viáveis e nobres à disposição na agricultura.

O lodo de esgoto é um resíduo semissólido, composto predominantemente por material orgânico, e varia de acordo com a sua origem, com o tipo do sistema de tratamento do esgoto e do próprio efluente de entrada das estações de tratamento. (BERTON; NOGUEIRA, 2010). Seu potencial para o uso agrícola decorre dessa presença de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas (BERNAL et al., 1998; OLIVEIRA, 2001; CHIBA et al., 2009; FRANCO et al., 2010; BETTIOL; GHINI, 2011). As condições de clima tropical favorecem à maior degradação do conteúdo orgânico (OLIVEIRA et al., 2002), disponibilizando principalmente o nitrogênio e o fósforo, nutrientes em maiores quantidades nos lodos.

Atualmente, não se pode mais aplicar lodo de esgoto diretamente na agricultura sem antes passar por algum processo que minimize o seu potencial poluidor. A Resolução nº 380 do CONAMA (CONAMA, 2006) cita procedimentos para minimizar o potencial poluidor do lodo dentre eles: a secagem térmica, a higienização com cal e a compostagem. A compostagem do lodo de esgoto é um procedimento de fácil elaboração e custo baixo, que elimina grande parte dos patógenos e compostos orgânicos potencialmente tóxicos, podendo ainda indisponibilizar a fração inorgânica tóxica (GICHANGI et al., 2012). Ela consiste, basicamente, na mistura do lodo desaguado com material vegetal, e sua disposição em leiras, que são periodicamente revolvidas.

Durante o processo de compostagem, a atividade microbiana no interior da massa libera energia na forma de calor, com conseqüente aumento da temperatura, podendo chegar aos 60 °C. Esse aumento de temperatura é o que proporciona a eliminação de grande parte dos microrganismos patogênicos (STENTIFORD; BERTOLDI, 2010).

A aplicação de composto de lodo de esgoto na agricultura deve atender aos critérios técnicos estabelecidos na Resolução nº 375 do CONAMA (CONAMA, 2006), concomitantemente com a Resolução nº 420 do CONAMA (CONAMA, 2009), a qual estabelece valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias

químicas em decorrência de atividades antrópicas, definindo os Valores de Prevenção (VP), os Valores de Intervenção (VI) e determina que cada estado estabeleça os Valores de Referência de Qualidade (VRQ). A Decisão da Diretoria nº 195-2005-E da CETESB (CETESB, 2005), estabelece os VRQ do estado de São Paulo.

Os fertilizantes orgânicos compostados produzidos a partir de lodo de esgoto, como matéria-prima, são passíveis de registro do produto, sendo classificados como fertilizantes orgânicos Classe “D”, de acordo com as Instruções Normativas da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

2.3 Metais pesados no composto de lodo de esgoto

Metais pesados, quando adicionados ao solo, podem seguir caminhos indesejáveis atingindo o lençol freático e contaminando as coleções hídricas. É importante ressaltar que os metais pesados são bioacumuladores e se depositam em maiores quantidades em animais do alto da cadeia trófica, como o homem.

O composto de lodo passa por um processo de compostagem, o qual retém parte desses metais pela decomposição dos microrganismos, pela imobilização ou sequestro (GICHANGI et al., 2012). O composto, por sua vez, é um material mais seguro para aplicação na agricultura, sem relatos de contaminação do solo por sua aplicação (ZHAO et al., 2012), porém o mesmo deve seguir critérios técnicos previamente citados, para se evitar esse potencial risco de contaminação.

A concentração de metais presentes no composto varia muito, dependendo principalmente do lodo de origem, a qual se destinou a compostagem, que, por sua vez, está relacionada principalmente com o tipo de tratamento utilizado na ETE, com as características do efluente de entrada da estação e com o método de compostagem empregado. Esses fatores influenciam diretamente na qualidade final do composto.

Outro fator importante que determina a qualidade final do composto é a relação carbono e nitrogênio (C/N). Segundo Pereira Neto (1989), a relação C/N ideal para o início do processo de compostagem é de 10/1, ou seja, 10 partes de carbono para 1 parte de nitrogênio. Caso a relação C/N seja muito alta (excesso de carbono), pode haver falta de nitrogênio para que os microrganismos decomponham por completo o material, resultando, assim, em uma compostagem incompleta, que com sua aplicação poderá vir a consumir o nitrogênio que se

destina à cultura. O inverso, isto é, uma relação C/N baixa (excesso de nitrogênio) pode causar a liberação do nitrogênio na forma de amônia, causando odor indesejável (STENTIFORD; BERTOLDI, 2010), e contribuindo para a poluição atmosférica.

Como mencionado anteriormente, ainda são escassos os trabalhos realizados com composto de lodo de esgoto aplicado na agricultura (GICHANGI et al., 2012; JAYASINGHE, 2012; ZHAO et al., 2012; BRAGA, 2013; MORETTI, 2013), sendo, na sua maioria, com a aplicação de lodo (NOGUEIRA et al., 2013).

Segundo a Decisão da Diretoria n° 195-2005-E da CETESB (CETESB, 2005), são estabelecidos os Valores de Referência de Qualidade (VRQ) do estado de São Paulo, os quais são utilizados como um padrão de qualidade estadual (Tabela 1). Os VRQ são tomados como base para definir um solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea. Ele é determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos e amostras de águas subterrâneas. Devem, ainda, serem utilizados como referência nas ações de prevenção da poluição dos solos e das águas subterrâneas e de controle de áreas contaminadas.

Tabela 1 - Valores de Referência de Qualidade de solo do estado de São Paulo dos metais avaliados.

Elemento	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----							
VRQ	75	<0,5	40	35	13	17	0,25	60

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto no cultivo da cana-de-açúcar, quanto à influência dos elementos potencialmente tóxicos no solo e possível transferência a para a cultura.

3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar, em função das doses de composto de lodo, o incremento dos teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn nas profundidades de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, aos 20 dias e aos 209 dias após a aplicação do composto no solo e possível transferência para a cultura;
- b) Determinar o acúmulo por hectare dos elementos Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn nos colmos da cultura de cana-de-açúcar após a sua colheita, em função das doses de composto de lodo de esgoto;

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em área de produção comercial de cana-de-açúcar em Anhumas, Distrito de Piracicaba-SP, área pertencente ao Grupo RAÍZEN, Unidade Santa Helena. O clima da região de Piracicaba é do tipo Cwa (classificação de Köppen) tropical úmido, com inverno seco e verão quente e chuvoso. As precipitações pluviométricas mensais, desde a data de instalação do experimento até a sua colheita, variaram de 22 a 96 mm (Figura 1).

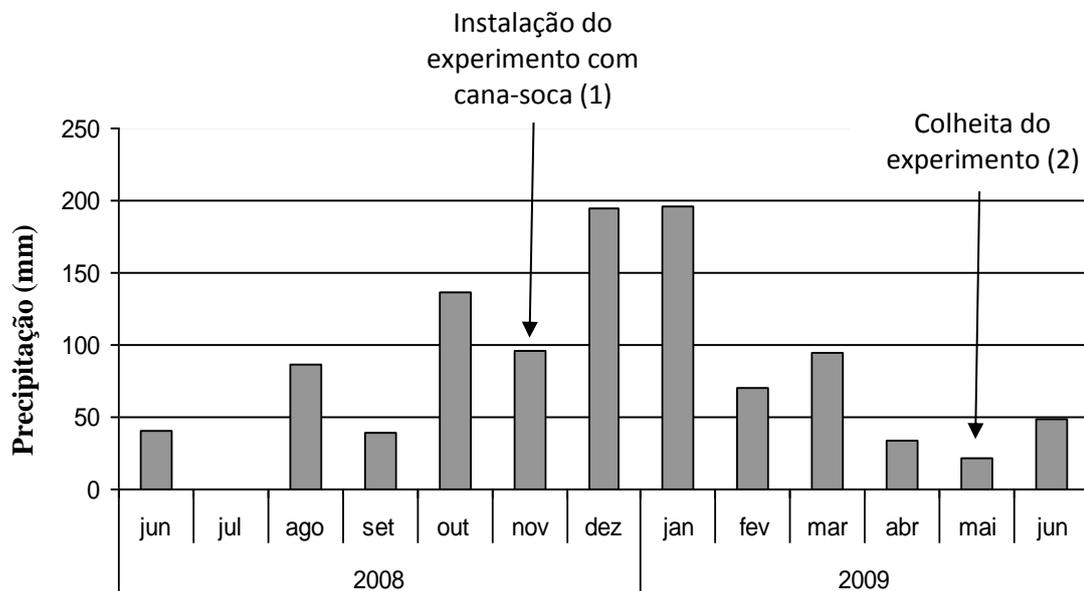


Figura 1 Valores mensais de precipitação pluviométrica (P) acumulada ao longo do experimento com aplicação de composto de lodo de esgoto em cana-soca desde a instalação (1) até a colheita (2).

O solo da área experimental é um Argissolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006). A amostragem do solo para caracterização química se deu nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade e foram realizadas antes da instalação do experimento, conforme método descrito em Rajj et al. (2001) (Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização química do solo, para fins de fertilidade do solo, antes da aplicação do composto de lodo de esgoto

Camada	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	S-SO₄²⁻	B	Fe	Cu	Mn	Zn
m	CaCl₂	g dm⁻³	mg dm⁻³	----- mmol_c dm⁻³ -----				-----		%	----- mg dm⁻³ -----						
0-0,2	4,7	18	7	1,3	22	5	8	27	28,5	56	51	14	0,18	38	0,3	7,2	0,4
0,2-0,4	4,3	16	5	0,6	16	3	2	40	19,9	59,6	33	21	0,16	128	0,2	5,2	0,3

4.2 Caracterização do composto utilizado

O composto de lodo de esgoto foi fornecido pela Opersan Serviços Ambientais S.C. Ltda., empresa que gerencia o lodo produzido na Estação de Tratamento de Efluentes de Jundiaí, SP, da Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ). O lodo foi gerado em sistema de lagoas aeradas de mistura completa, seguida de lagoas de decantação, sendo o desaguamento feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação e secagem em pátio (revestido), com revolvimento mecânico.

O composto utilizado no experimento foi o lodo de esgoto compostado. O lodo de esgoto compostado é basicamente lodo biológico sanitário compostado com bagaço de cana-de-açúcar na proporção 1:1 v/v. (1 m³ de torta de composto de lodo com 18% de sólidos com 1 m³ de bagaço de cana com 70% de sólidos). Essa mistura foi enleirada e revolvida diariamente por 21 dias. Nesse período, o material foi mantido a temperatura média de 50 a 55°C. Após esse período, o material foi empilhado e ficou repousando por mais 30 dias. Nessa etapa, a temperatura do composto foi mantida na faixa de 60 a 65 °C. Após esse período, o material já estará disponível para uso agrícola.

Para caracterização química do composto, conforme descrito em Raij et al. (2001), a amostra foi preparada conforme o método 3051 (USEPA, 2006), e os elementos determinados por ICP-AES (espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado). O nitrogênio total e o nitrogênio amoniacal foram determinados pelo método Kjeldahl. A umidade e os sólidos voláteis foram determinados pela perda de massa, a 60°C e a 500°C, respectivamente. O carbono orgânico, após digestão com dicromato, foi determinado por titulação e o fluoreto, após fusão com soda, foi determinado com eletrodo de íon seletivo (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização química do composto de lodo de esgoto utilizado no experimento

----- Atributo e valor -----		----- Atributo e valor -----	
pH (em água)	6,1 ⁽¹⁾	Bário (mg/kg)	293
Umidade (%) (m/m)	50	Cobre (mg/kg)	144
Sólidos voláteis (%) (m/m)	49	Selênio (mg/kg)	2,56
Carbono orgânico (g/kg)	400	Níquel (mg/kg)	28
Nitrogênio total (g/kg)	24	Molibdênio (mg/kg)	14,7
N amoniacal (mg/kg)	98	Zinco (mg/kg)	21
N nitrato-nitrito (mg/kg)	45	Sódio (mg/kg)	685
Potássio (mg/kg)	1807	Mercúrio (mg/kg)	ND
Fósforo (g/kg)	6,2	Arsênio (mg/kg)	0,95
Cálcio (g/kg)	7,0	Cádmio (mg/kg)	2,96
Enxofre (g/kg)	8,5	Chumbo (mg/kg)	68
Magnésio (g/kg)	2,0	Cromo total (mg/kg)	177

(1) Todos os valores de concentração são apresentados com base na matéria seca.

4.3 Instalação e execução do experimento

A instalação do experimento foi realizada em área de primeira cana-soca, em 19 de novembro de 2008, nove dias após a colheita da cana-planta. O plantio da cana-planta foi feito em 16 de outubro de 2007, cuja adubação consistiu da aplicação de 440 kg ha^{-1} da fórmula 00-18-36. Também foram aplicados o inseticida Regente 800 WG (fipronil), na dose de $0,26 \text{ kg ha}^{-1}$, e os herbicidas Sinerge (clomazone + ametrina), na dose $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$, e DMA 806 (2,4-D), na dose de $1,6 \text{ kg ha}^{-1}$, e Boral (sulfentrazone), na dose de $1,8 \text{ kg ha}^{-1}$.

A variedade utilizada foi a SP80-3280, que é considerada como variedade tardia. A colheita da cana-planta, sem queima, foi realizada mecanicamente em 10 de novembro de 2008. A produtividade de colmos, estimada para a cana-planta, foi de $94,81 \text{ kg ha}^{-1}$.

No período entre a colheita da cana-planta e a instalação do experimento com cana-soca, a área experimental foi tratada com o inseticida Regente 800 WG (fipronil), na dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, o nematicida Temik 150G (aldicarb), na dose de $8,0 \text{ kg ha}^{-1}$, e os herbicidas Clomazone e Boral (sulfentrazone), nas doses de $1,8$ e $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente.

Cada parcela experimental foi constituída por seis linhas de cana-de-açúcar, com 20 m de comprimento e espaçadas em 1,4 m, com área total de 168 m^2 . Como área útil, foram consideradas as quatro linhas centrais, descontando-se a bordadura de 2 m de cada linha de cana, totalizando $89,6 \text{ m}^2$ de área útil. Por ser uma área onde a colheita é mecanizada, toda palhada permaneceu no local após a colheita da cana-planta, a qual foi enleirada na terceira rua. (Figura 2)

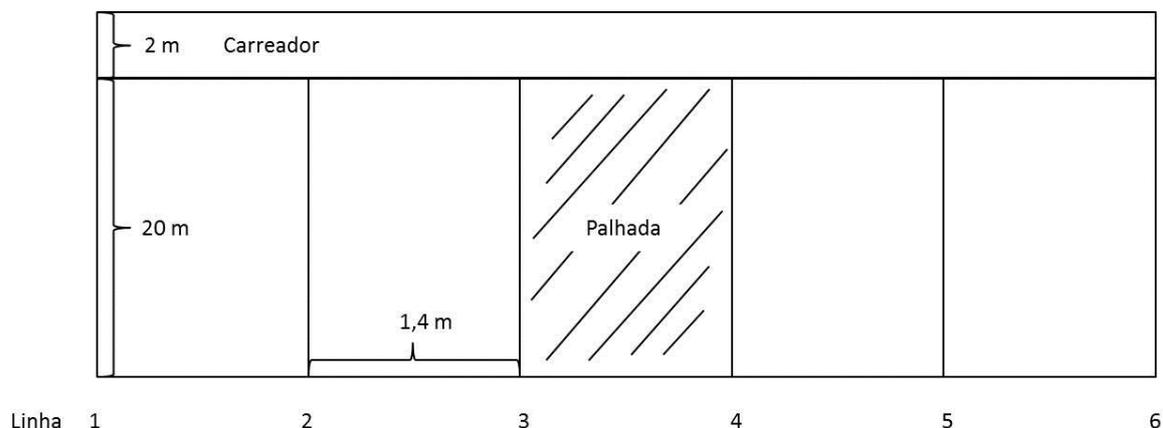


Figura 2 - Parcela do experimento

O composto foi aplicado em superfície nas entrelinhas das quatro ruas sem palha de cada parcela, nas doses de 0; 14,7; 29,4 e 44,5 t ha⁻¹ (base seca), equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério do conteúdo de N e taxa de mineralização do N (10% para lodos compostados), conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006), o nitrogênio mineral, nas doses de 0, 36,3; 72,6 e 110,0 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado, na forma de nitrato de amônio e o fósforo mineral, nas doses 0 e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0 e 100% do recomendado, na forma de superfosfato triplo. Para suprir a quantidade de potássio para a cultura foi necessário aplicar 100% da quantidade recomendada do adubo mineral, aplicando-se 77 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio em área total, conforme recomendação de Spironello et al. (1996).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4 (doses de composto de lodo de esgoto) x 4 (doses de nitrogênio) x 2 (doses de fósforo), com três repetições, totalizando 96 parcelas.

As doses recomendadas de N e K₂O foram estabelecidas com base nas análises de fertilidade do solo, de 480 kg ha⁻¹ da fórmula 23-00-15 para cana-soca, no ambiente de produção em que foi instalado o experimento. A dose de P₂O₅ foi estabelecida segundo Spironello et al. (1996).

A colheita do experimento foi realizada nos dias 26 e 27 de maio de 2009, seis meses antes do previsto, em decorrência de incêndio acidental na área de cultivo comercial de cana-de-açúcar ocorrido no dia 23 de maio do mesmo ano. O experimento, portanto, foi colhido aos sete meses e meio de cultivo, após a queima dos colmos. Para determinação da produtividade, colheram-se as quatro linhas centrais de cada parcela manualmente. Posteriormente, os colmos foram pesados com garra acoplada à célula de carga.

4.4 Amostragem de solo

Foram feitas duas coletadas de solo para determinação dos metais pesados, sendo a primeira 20 dias após a aplicação do composto de lodo e a segunda logo após a colheita da cana-de-açúcar, aos 209 dias após a aplicação do composto. Ambas as coletas foram nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2m. Também foram coletadas amostras de solo de 0-0,2; 0,2-0,4m para caracterização inicial do solo do experimento antes da aplicação do composto.

Cada amostra foi composta de oito subamostras, retiradas na faixa de 5 a 10 cm ao lado da linha de plantio (onde adubos e o composto foram aplicados), na área útil de cada

parcela. Após a coleta, as amostras de solo foram transportadas em caixas térmicas para armazenamento em câmara fria (10 °C), até análise química de nitrogênio inorgânico.

4.5 Análises químicas

As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (1 mm) e após procedeu-se a análise dos metais pesados solubilizados com ácidos nítrico e clorídrico concentrados (teores semitotais), em forno micro-ondas (Milestone TC Plus), segundo o método 3051 da USEPA (2006).

As amostras vegetais foram digeridas em sistema fechado de micro-ondas, fazendo-se adaptações do método 3051 de solo da USEPA (USEPA, 2006) e de Wu, Feng e Wittmeier (1997) e Araújo et al. (2002), sendo utilizando para o colmo uma mistura de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio. As determinações de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn nos extratos, contendo digeridos de material vegetal ou de solo, foram realizadas por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente com sistema octopolo de reação (ICP-MS Agilent 7500ce). A água para limpeza e preparo, assim como todos os reagentes utilizados, eram de grau analítico compatível com análises por ICP-MS.

Os teores dos elementos potencialmente tóxicos nos extratos de materiais vegetais foram obtidos com limites de detecção adequados (Tabela 4). A exatidão dos resultados foi garantida pelo emprego de amostra de referência certificada SRM 1515 – Apple Leaves, que foi processada juntamente com as demais amostras.

Tabela 4 - Análise química da amostra certificada Standard Reference Material 1515 – Apple Leaves e limites de detecção do método analítico (MDL)

Elemento	Teor certificado	Teor determinado ⁽¹⁾	MDL	
			colmo	solo
----- mg kg ⁻¹ -----		----- µg kg ⁻¹ -----		
Ba	49 ± 2	47	3	28
Cd	0,013 ± 0,002	0,012	1	11
Cr	0,3 ⁽¹⁾	0,5	2	19
Cu	5,64 ± 0,24	4,85	5	44
Ni	0,91 ± 0,12	0,91	3	30
Pb	0,470 ± 0,024	0,447	3	21
Se	0,050 ± 0,009	0,073	5	44
Zn	12,5 ± 0,3	11,9	10	80

⁽¹⁾ Teor de referência, sem certificação.

4.6 Acúmulo de metais pesados nos colmos

A partir da produtividade observada nos tratamentos com composto de lodo (Anexo 1) e com os teores dos metais pesados nos colmos nos respectivos tratamentos, pode-se inferir o acúmulo por hectare de metais pesados nos colmos (Equação 1).

$$MP_{(g/t)} \times P_{(t/ha)} = A_{(g/ha)} \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

MP = Teor do metal pesado no colmo nas diferentes doses de composto

P = Produtividade média de colmos nas doses de composto de lodo

A = Acúmulo de metais pesados nos colmos

4.7 Delineamento experimental e análise estatística

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de composto de nitrogênio e de fósforo sobre as variáveis dependentes, sem interferência das disparidades do ambiente de condução do experimento, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial, com três repetições, totalizando 96 parcelas. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste “F” para estudar os efeitos dos tratamentos de nitrogênio (N), de fósforo (P) e doses do composto (C).

Para comparação de médias, os resultados foram submetidos ao teste de *Tukey* a 10% de probabilidade. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, dos modelos de regressão simples e múltipla, para obtenção da equação do tipo: $Y = a + bC + cN + dP + eCN + fCP + gNP + hC^2 + iN^2 + jP^2$, onde “C” é composto de lodo, “N” nitrogênio e “P” fósforo, no caso não significativo, o fator é retirado da equação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Forma de apresentação dos resultados

As doses dos fertilizantes minerais, nitrogenado e fosfatado, não resultaram em alterações nos teores dos metais pesados no solo e nas partes da cana-de-açúcar. Assim, os resultados serão apresentados somente em função das doses de composto. Resultados semelhantes, foram também observados por Nogueira et al. (2013), em cana-planta.

Segundo um padrão de qualidade estadual, todos os resultados observados são confrontados com os VRQ do estado de São Paulo. Assim, todas as referências a legislação por seguinte se reportam a Decisão da Diretoria n° 195-2005-E (CETESB, 2005).

5.2 Metais pesados no solo

5.2.1 Metais pesados aos 20 dias após a aplicação do composto

O incremento nos teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no solo em função das doses de composto, logo após a aplicação do composto (20 dias), ficou evidente (Tabela 5).

Tabela 5 - Teores de metais pesados no solo (mg kg^{-1}) após 20 dias da aplicação do composto de lodo, em função da dose. ($p < 0,10$)

Elemento	Dose de composto de lodo (t ha^{-1})				Equação	r^2
	0	14,7	29,4	44,5		
Ba	9,38	9,13	18,91	11,36	N.S.	N.S.
Cd	0,038	0,039	0,046	0,053	$y = 0,0337 + 0,00008x$	0,35
Cr	14,90	19,06	20,03	19,99	N.S.	N.S.
Cu	3,56	3,19	3,32	4,05	$y = 3,64 - 0,03x + 0,001x^2$	0,32
Ni	3,95	4,39	4,66	6,35	$y = 6,42 - 0,01x$	0,66
Pb	5,17	5,55	6,28	5,81	$y = 5,49 + 0,05x - 0,001x^2$	0,26
Se	0,089	0,087	0,103	0,102	$y = 0,092 + 0,0002x$	0,30
Zn	5,25	6,32	8,42	12,49	$y = 3,5 + 0,007x + 0,003x^2$	0,66

NS: Não significativo

Os teores de Ni aumentaram de $3,95 \text{ mg kg}^{-1}$, no tratamento controle para $6,35 \text{ mg kg}^{-1}$, na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$). Esse aumento caracterizou-se de maneira linear, corroborando com os resultados encontrados em experimentos similares (NOGUEIRA et al., 2013). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2005) fixa valor limite de qualidade do solo de 13 mg kg^{-1} de Ni, demonstrando que os valores observados se encontram dentro desse limite.

Rangel et al. (2004) e Oliveira et al. (2005) encontraram aumento similar nas concentrações de Ni no solo com a aplicação de lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Efluentes de Barueri (SABESP- Barueri), nas doses de 8 a 65 t ha^{-1} em um oxissolo. Diferindo do resultado encontrado, Martins et al. (2003) e Nogueira et al. (2009) não constataram efeito de aumento de Ni com a adição de lodo de esgoto em experimento similar, com dose superior (20 a $127,5 \text{ t ha}^{-1}$).

O Cu, por sua vez, aumentou quadraticamente, com variação de $3,56 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $4,05 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$). Resultados similares foram encontrados por Oliveira e Mattiazzo (2001). O menor valor de Cu observado foi na dose de $14,7 \text{ t ha}^{-1}$ de composto, mas não diferindo significativamente dos níveis de controle.

O Zn teve uma variação de $3,95 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $12,49 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$). Esse aumento também foi de forma quadrática. Efeitos similares a esses também foram encontrados por outros pesquisadores, porém o aumento se deu linearmente (SILVA et al., 1998; OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; MARTINS et al., 2003; CAMILOTTI et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2008). O Zn foi o elemento que mais variou entre as medias dos quatro tratamentos, estando, porém, os valores encontrados dentro dos limites estabelecidos pela legislação.

É sabido que o Zn é um micronutriente, sendo sua função de cofator de algumas enzimas na planta, sendo o composto considerado, nesse caso, como mais um efeito benéfico ao seu uso.

O Pb se comportou de forma quadrática em relação às doses de composto, também aumentando nas concentrações de $5,17 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $5,81 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$), com máximo teórico de $6,11 \text{ mg kg}^{-1}$. A legislação brasileira é bem criteriosa a respeito das quantidades limites permissíveis de Pb em solos brasileiros, devido ao seu efeito carcinogênico. No estado de São Paulo, a CETESB determina o limite de 17 mg kg^{-1} (CETESB, 2005), no qual os resultados encontrados se enquadram

abaixo desse limite. Resultados similares foram também encontrados por Marques et al. (2007) e Merlino et al. (2010), onde o aumento, contudo, se deu de forma linear.

Dentre os elementos avaliados no estudo, o Cd é o que possui o menor valor limite definido pela legislação ($0,5 \text{ mg kg}^{-1}$) (CETESB, 2005), o qual aumentou linearmente, variando nas concentrações de $0,038 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $0,053 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$), concentrações essas bem abaixo do limite máximo definido em lei.

O Cd tem sido bastante estudado em trabalhos com aplicação de lodo de esgoto (BERTONCINI et al., 2004; UDOM et al., 2004; CHAUDRI et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2008). O aumento de Cd no solo ocorre devido às consecutivas aplicações de lodo, que por sua vez possui em sua composição relativa altas quantidades desse elemento. As altas concentrações de Cd no solo representam potencial risco à saúde humana, pois o mesmo é incorporado pelos alimentos cultivados em solos contaminados, principalmente devido à alta mobilidade do cádmio no solo e na planta (TYLER; MCBRIDE, 1982).

O Se aumentou de maneira linear. Suas concentrações variaram de $0,089 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $0,102 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto ($p < 0,10$). Da mesma forma, resultados similares foram encontrados em outros trabalhos (NOGUEIRA et al., 2013). Não existem muitos trabalhos na literatura sobre o Se, devido principalmente à baixa precisão dos métodos convencionais de análise (HENINGER et al., 1997). No Brasil, não foram observadas consequências ao ambiente decorrentes da presença do Se, devido ao uso de composto de lodo de esgoto. Até onde se sabe, não há problemas com a aplicação, em curto prazo, de composto de lodo de esgoto em cana-de-açúcar, no que tange ao Se. Porém, não existem estudos de longo prazo (NOGUEIRA et al., 2013).

Os elementos Ba e Cr não apresentaram aumento no teor no solo com as aplicações de composto de lodo, sendo a sua variação de $9,38 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $11,36 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose máxima de composto ($p < 0,10$) e de 15 mg kg^{-1} no tratamento controle para $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose máxima de composto ($p < 0,10$), de Ba e Cr, respectivamente.

5.2.2 Metais pesados residuais remanescentes aos 209 dias após a aplicação do composto de lodo

Comparando-se os resultados das análises de solo, por meio do teste *Tukey* ($p < 0,10$), entre a primeira amostragem de solo (20 dias após a aplicação do composto) e a segunda (209

dias após a aplicação do composto), na maior dose de composto, 44,5 t ha⁻¹, precisamente 188 dias de diferença entre as amostragens, obteve-se significativa diferença nos metais Ni, Zn, Ba e Cr (Tabela 6), dos quais apenas o Ni e o Zn apresentaram aumento estatisticamente significativo nos teores do solo em função das doses de compostos.

Tabela 6 - Diferenças entre os teores de metais pesados no solo (mg kg⁻¹) na dose de 44,5 t ha⁻¹ de composto, com 20 dias e 209 dias após a aplicação do composto de lodo.

Elemento	20 DPA	209 DPA
	-----mg kg ⁻¹ -----	
Ba*	11,4	8,1
Cd	0,053	0,042
Cr*	20,0	16,6
Cu	4,0	4,1
Ni*	6,4	4,9
Pb	5,8	5,9
Se	0,102	0,094
Zn*	12,5	8,3

* diferem significativamente (p < 0,10)

DPA - Dias pós-aplicação de composto

Assim, verificou-se um decréscimo nos teores dos metais pesados no solo, em relação à primeira e à segunda amostragem. Tal fato já era esperado, tendo em vista o aporte metabolizado pela cultura da cana-de-açúcar e pela lixiviação e imobilização pela matéria orgânica dos metais pesados em estudo.

Após a colheita, transcorridos 209 dias da aplicação do composto de lodo, ainda estava evidente o incremento nos teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no solo, em função das doses de composto (Tabela 7).

Tabela 7 - Teores de metais pesados no solo (mg kg^{-1}) após 209 dias da aplicação de composto de lodo, em função da dose. ($p < 0,10$)

Elemento	Dose de Composto de Lodo (t ha^{-1})				Equação	r^2
	0	14,7	29,4	44,5		
Ba	7,30	7,47	7,27	8,08	N.S.	N.S.
Cd	0,042	0,041	0,045	0,042	N.S.	N.S.
Cr	15,38	15,14	14,61	16,56	N.S.	N.S.
Cu	3,24	3,18	2,88	4,09	$y = 3,39 + 0,001x^2$	0,19
Ni	2,91	3,96	4,19	4,87	$y = 5,81 + 0,05x$	0,84
Pb	5,50	5,35	5,77	5,86	$y = 5,54 - 0,008x$	0,22
Se	0,082	0,095	0,095	0,094	$y = 0,09 + 0,0007x$	0,37
Zn	4,24	4,31	5,41	8,27	$y = 5,95 - 0,03x + 0,003x^2$	0,55

NS: Não significativo

Para os metais Ni e Se houve aumento linear em função das doses de composto, cujas variações foram de $2,91 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle, para $4,87 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto para o Ni e de $0,082 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $0,094 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto para o Se. Novamente, verificou-se incremento caracterizado de forma quadrática para os metais Cu e Zn, variando na proporção de $3,24 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle, para $4,09 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto para o Cu e de $4,24 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle, para $8,27 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto para Zn.

Diferindo do observado aos 20 dias após a aplicação do composto, aos 209 dias após observou-se incremento linear para Pb, com a variação de $5,50 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $5,86 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto. Para o elemento Cd, no entanto, não foi observado aumento em função das doses do composto, com valores de $0,042 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle e, igualmente, de $0,042 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto.

Novamente Ba e Cr não apresentaram efeito significativo em função das doses de composto de lodo, com variações de $7,30 \text{ mg kg}^{-1}$ para $8,08 \text{ mg kg}^{-1}$ para Ba e de $15,38 \text{ mg kg}^{-1}$ para $16,56 \text{ mg kg}^{-1}$ para Cr, no tratamento controle e na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto, respectivamente.

5.3 Metais pesados no colmo

O incremento das concentrações dos elementos Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn ficou evidente nos colmos da cana-de-açúcar (Tabela 8).

Tabela 8 - Concentração de metais pesados no colmo (mg kg^{-1}) em função da dose de composto de lodo ($p < 0,10$).

Elemento	Dose de composto de lodo (t ha^{-1})				Equação	r^2
	0	14,7	29,4	44,5		
Ba	4,34	5,22	5,04	4,79	NS	NS
Cd	0,010	0,012	0,016	0,022	$y = 0,009 + 0,0001x + 0,00004x^2$	0,80
Cr	1,61	1,21	1,70	1,64	NS	NS
Cu	3,19	3,05	3,11	3,20	NS	NS
Ni	0,576	0,441	0,598	0,680	$y = 0,55 - 0,009x + 0,0002x^2$	0,42
Pb	0,358	0,328	0,386	0,443	$y = 0,32 - 0,002x + 0,0001x^2$	0,35
Se	0,029	0,049	0,046	0,046	$y = 0,001 + 0,00002x$	0,41
Zn	8,19	9,87	15,21	21,47	$y = 7,07 + 0,1x + 0,05x^2$	0,78

NS: Não significativo

As concentrações de Ni no colmo aumentaram quadraticamente, seguindo uma variação de $0,576 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $0,680 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto, diferindo, portanto, de resultados encontrados em outros trabalhos (NOGUEIRA et al., 2013), os quais tiveram redução nos níveis encontrados para cana-soca, com aumento para cana-planta.

Da mesma forma, Zn e Pb aumentaram quadraticamente, com variação de sua concentração de $8,19 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $21,47 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto, para Zn e de $0,358 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $0,443 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de $44,5 \text{ t ha}^{-1}$ de composto para Pb. Resultados similares foram encontrados por Oliveira e Matiazzo (2001) para o elemento Zn. Consideram-se adequadas as variações para Zn nas concentrações de 10 a 50 mg kg^{-1} , em experimentos com aplicação de composto de lodo de esgoto (SPIRONELLO et al., 1996). Todavia, para o Pb, não foram encontrados em outros

estudos aumento significativo nas suas concentrações na planta (NOGUEIRA et al., 2013). Vale ressaltar, no entanto, que os valores encontrados estavam abaixo dos considerados normais a toxicidade da cultura (TÜRKAN et al., 1995).

Para Cd, o efeito caracterizou-se de maneira quadrática, aumentando com variações de 0,010 mg kg⁻¹ no tratamento controle para 0,022 mg kg⁻¹ na dose de 44,5 t ha⁻¹ de composto. Diferentemente do encontrado por Nogueira et al. (2013), onde o aumento se deu de forma linear. Não foram constatados sintomas de toxicidade de Cd nas plantas, nem de deficiência de outros elementos que poderiam vir a competir com o Cd. Segundo outros autores, Fornazier et al. (2002) e Sereno (2004), a cultura da cana-de-açúcar tem demonstrado relativa tolerância às altas concentrações de Cd no solo.

O Se, por sua vez, demonstrou um aumento que se caracterizou linearmente, com variação de 0,029 mg kg⁻¹ no tratamento controle para 0,046 mg kg⁻¹ na dose de 44,5 t ha⁻¹ de composto. Porém, as maiores concentrações de Se na planta foram obtidas na dose de 14,7 t ha⁻¹ de composto, correspondente a 0,049 mg kg⁻¹. De acordo com Kabata-Pendias e Mukherjee (2007), as concentrações de Se na maioria das plantas são extremamente baixas e há escassez de informações para que se possa determinar seu efeito sobre a planta. Contudo, segundo os valores observados, pode-se constatar que não houve aumento relevante no solo e, conseqüentemente, na planta, em função das doses de composto, sendo os níveis registrados abaixo de partes por milhão.

Os teores de Ba e Cr não apresentaram aumento na planta em função das doses de composto, com variação de 4,34 mg kg⁻¹ para 4,79 mg kg⁻¹ para Ba e de 1,61 mg kg⁻¹ para 1,64 mg kg⁻¹ para Cr no tratamento controle e na dose de 44,5 t ha⁻¹ de composto, respectivamente. Esse fato já era esperado, em decorrência da baixa variação observada no solo em função das doses de composto.

Para o elemento Cu, mesmo tendo aumentado nos teores do solo, não constatou-se o mesmo comportamento na planta, com variações de 3,19 mg kg⁻¹ no tratamento controle para 3,20 mg kg⁻¹ na dose de 44,5 t ha⁻¹ de composto. Tal fato, provavelmente, foi devido à sua indisponibilidade, resultado da forte interação com a matéria orgânica presente no solo.

5.4 Acúmulo de metais pesados nos colmos e produtividade

A produtividade média de colmo da cana-soca por hectare (TCH), em função das doses de composto, variou de 79 a 98 t ha⁻¹. No tratamento com adubo mineral convencional, a produtividade foi de 95 t ha⁻¹.

A mesma variedade, SP 80-3280, cultivada em um Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico, primeira soca, produziu em média 79 t ha⁻¹ de colmos, recebendo adubação mineral convencional (GOMES, 2003). Comparando-se com as produtividades de colmos do presente experimento, com a mesma variedade e também primeira soqueira, a qual ainda foi colhida com sete meses de cultivo, a produção de colmos encontrada foi considerada excelente, principalmente nos tratamentos com doses de 29,4 e 44,5 t ha⁻¹ de composto. A produtividade média do tratamento com a dose máxima de composto foi de aproximadamente 17,5% superior, se comparados com os tratamentos que não utilizaram composto de lodo.

Calculando-se o acúmulo dos metais pesados por hectare nas respectivas doses de composto de lodo com a utilização da Equação 1 e o Anexo 1 (Tabela 9).

Tabela 9 - Acúmulo de metais pesados nos colmos (g ha⁻¹), em função das doses de composto de lodo ($p < 0,10$).

Elemento	Dose de composto de lodo (t ha ⁻¹)				Equação	r ²
	0	14,7	29,4	44,5		
Ba	341	427	453	441	$y = 342 + 7,2x - 0,11x^2$	0,52
Cd	0,78	0,95	1,47	2,02	$y = 0,76 + 0,01x + 0,0004x^2$	0,81
Cr	126	98	153	150	$y = 119 - 0,34x$	0,20
Cu	250	250	280	295	$y = 248 + 0,33x$	0,37
Ni	45	36	54	63	$y = 43,7 - 0,42x + 0,02x^2$	0,43
Pb	28	27	34	41	$y = 27,6 - 0,06x$	0,44
Se	2,29	4,03	4,20	4,14	$y = 2,34 + 0,13x$	0,21
Zn	643	811	1378	1986	$y = 642 - 9,54x$	0,76

6. CONCLUSÃO

Assim, verificou-se no estudo realizado que, segundo o modelo de condução do experimento, de um ano de cultivo com uma única aplicação de composto, que a aplicação de composto de lodo de esgoto, seguindo padrões técnicos de compostagem adequados para a diminuição da carga patogênica e do potencial de toxicidade dos elementos inorgânicos, não resulta em contaminação do solo e nem da cultura de cana-de-açúcar. Os teores dos metais pesados Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no solo e na planta, tanto aos 20 dias, quanto aos 209 dias após a aplicação do composto, permanecem dentro da faixa de teores dispostos na legislação como valores orientadores de referência de qualidade do solo, conforme preconiza a CETESB.

7. RECOMENDAÇÕES E COMENTÁRIOS

Constatou-se um aumento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar em relação aos tratamentos que não utilizaram o composto de lodo de esgoto, comprovando-se, que o composto, quando bem manejado, contribui para um aumento de produtividade e, conseqüentemente, diminuição nos custos de produção com a adubação mineral convencional.

Outro aspecto significativo a ser salientado, é que o resíduo, lodo de esgoto, quando submetido a um processo de compostagem agronomicamente correto, observando-se os padrões técnicos, deixa de ser um resíduo para tornar-se um produto. Produto este com duplo benefício, tendo em vista que diminuem os gastos que outrora eram investidos em sua correta disposição em aterros sanitários, e têm-se, assim, um ganho econômico com a diminuição da adubação mineral convencional na agricultura. Dessa forma, o produto final composto de lodo de esgoto, agora passa a ser classificado como composto classe “D”, conforme preconiza a classificação do MAPA.

Sugere-se, portanto, a realização de novos estudos que utilizem o composto de lodo de esgoto classe “D” concomitantemente com o lodo de esgoto, confrontando-se seus resultados. Assim, será possível comparar-se os ganhos de produtividade e o efeito das substâncias potencialmente tóxicas em ambos os tratamentos. Propõe-se, também, a avaliação com à aplicação em outras culturas, aumentando-se o rol de opções para uso do composto. Todavia, tais culturas não devem ser consumidas *in natura* pela população.

Cabe-nos, portanto, desmistificarmos a ideia equivocada sobre o composto, o qual não deve mais ser comparado com seu antecessor - o lodo de esgoto.

REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIRES, A. M. M.; FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; BERNARDI, J. H. (Org.). **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: Funep, 2008. p. 183-210.
- ALCANTARA, S.; PÉREZ, D. V.; ALMEIDA, M. R. A.; SILVA, G. M.; POLIDORO, J. C.; BETTIOL, W. 2009. Chemical changes and heavy metal partitioning in an Oxisol cultivated with maize (*Zea Mays*, L.) after 5 years disposal of a domestic and an industrial sewage sludge. **Water Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 203, p. 3–16, 2009.
- ARAÚJO, G. C. L.; GONZALEZ, M. H.; FERREIRA, A. G.; NOGUEIRA, A. R. A.; NOBREGA, J. A. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta. Part B**, Oxford, v. 57, n. 12, p. 2121-2132, 2002.
- BERNAL, M. P.; NAVARRO, A. F.; SÁNCHEZ-MENEDERO, M. A.; ROIG, A.; CEGARRA, J. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 30, p. 305-313, 1998.
- BERTON, S. R.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto - Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 31-50.
- BERTONCINI, E. I.; MATTIAZZO, M. E.; ROSSETTO, R. Sugarcane yield and heavy metal availability in two biosolid-amended Oxisols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 1243-1260, 2004.
- BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v. 2011, n. 1, p. 1-11, 2011.
- BRAGA, V. S. **Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar: nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade**. 2013. 88 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 25 de 08 de novembro de 2012. Estabelece os procedimentos para a comercialização das substâncias sujeitas a controle especial, quando destinadas ao uso veterinário, relacionadas no Anexo I desta Instrução Normativa, e dos produtos de uso veterinário que as contenham. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 224, Seção 1, p. 14, 21 nov. 2012. Disponível em: http://www.lex.com.br/legis_23976295_INSTRUCAO_NORMATIVA_SDA_N_25_DE_8_DE_NOVEMBRO_DE_2012.aspx.
- CAMILOTTI, F.; MARQUES, O. M.; ANDRIOLI, I.; SILVA, A. R.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 284-293, 2007.

CHAUDRI, A.; MCGRATH, S.; GIBBS, P.; CHAMBERS, B.; CARLTON-SMITH, C.; GODLEY, A.; BACON, J.; CAMPBELL, C.; MARK, A. Cadmium availability to wheat grain in soils treated with sewage sludge or metal salts. **Chemosphere**, Oxford, v. 66, p. 1415-1423, 2007.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Rendimento de cana-de-açúcar cultivada em Argissolo, utilizando lodo de esgoto como fonte de fósforo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 495-501, 2009.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. I – Disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 643-652, 2008a.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 653-662, 2008b.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E**, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABSTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abr./2013**. Brasília, DF, 2013. Disponível: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_29_31_boletim_cana_p_ortugues_abril_2013_1o_lev.pdf.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução N° 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Seção 1, p. 141-146, 30 ago. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução N° 380 de 31 de outubro de 2006. Retifica a Resolução CONAMA no 375/06 – 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 213, Seção 1, p. 59, 7 nov. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução N° 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes sobre o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 249, p. 81-84, 30 dez. 2009.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana de açúcar**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 31-44.

FORNAZIER, R. F.; FERREIRA, R. R.; VITÓRIA, A. P.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Effects of cadmium on antioxidant enzyme activities in sugarcane. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 45, p. 91-97, 2002.

FRANCO, A. **Uso agrícola de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental**. 2010. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FRANCO, A.; MARQUES, M. O.; MELO, W. J. Sugarcane grown in an Oxisol amended with sewage and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 408-414, 2008.

FRANCO, A.; ABREU JUNIOR, C. H.; PERECIN, D.; OLIVEIRA, F. C.; GRANJA, A. C. R.; BRAGA, V. S. Lodo de esgoto como fonte de nitrogênio e fósforo no cultivo de cana-planta e de primeira cana-soca. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 553-561, 2010.

GICHANGI, E. M.; MNKENI, P. N. S.; MUCHAONYERWA, P. Evaluation of the heavy metal immobilization potential of pine bark-based composts. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 35, p. 1853-1865, 2012.

GOMES, J. F. F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2003. 65 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

HASHIMA, M.A., MUKHOPADHYAY, S., SAHU, J.N., SENGUPTA, B., Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. 2011. **Journal of Environmental Management**. v. 92, p. 2355-2388.

HENINGER, I.; POTIN-GAUTIER, M.; ASTRUC, M.; SNIDARO, D.; VIGNIER, V.; MANEM, J. Selenium in sewage sludge; general aspects and analytical challenge. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, London, v. 67, p. 1-13, 1997.

JAYASINGHE, G. Y. Composted sewage sludge as an alternative potting media for lettuce cultivation. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 43, p. 2878-2887, 2012.

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace elements from soil to human**. Berlin: Springer, 2007.

MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; MARQUE, T. A.; NOGUEIRA, T. A. R. Qualidade e produtividade de cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, p. 111-122, 2007.

MARQUES, M. O.; MARQUES, T. A.; TASSO JUNIOR, L. C. **Tecnologia do açúcar**. Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 170 p.

MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 563-574, 2003.

MELO, W. J.; AGUIAR, P. S.; MELO, G. M.; MELO, V. P. Nickel in a tropical soil treated with sewage sludge and cropped with maize in a long-term field study. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 39, p. 1341-1347, 2007.

MERLINO, L. C. S.; MELO, W. J.; MACEDO, F. G.; GUEDES, A. C. T. P.; RIBEIRO, M. H.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Barium, cadmium, chromium and lead in maize plants and in an Oxisol after eleven years of sewage sludge applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 2031-2039, 2010.

MORETTI, S. M. L. **Uso de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto com pode de árvore na cultura da cana-de-açúcar**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. C.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 21, n. 3, p. 165-173, 2013.

NOGUEIRA, T. A. R.; MELO, W. J.; OLIVEIRA, L. R.; FONSECA, I. M.; MELO, G. M. P.; MARCUSSI, S. A.; MARQUES, M. O. Nickel in soil and maize plants grown on an oxisol treated over a long time with sewage sludge. **Chemical Speciation and Bioavailability**, Herts, UK, v. 21, n. 3, p. 165-173, 2009.

NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, L. R.; MELO, W. J.; FONSECA, I. M.; MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; MARQUES, M. O. Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em Latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2195-2207, 2008.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 505-519, 2002.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 171-180, 2001.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 581-593, 2001.

OLIVEIRA, K. W.; MELO, W. J.; PEREIRA, G. T.; MELO, V. P.; MELO, G. P. Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 381-388, 2005.

PEREIRA NETO, J. T. Conceitos modernos de compostagem. **Revista de Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 104-109, 1989.

RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Chemical analysis for the evaluation of fertility of tropical soils**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W.; GUILHERME, L. R. G.; DYNIA, J. F. Accumulation of Cu, Mn, Ni, Pb and Zn on a red Latosol fertilized with sources of sewage sludge and cultivated with corn. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, p. 15-23, 2004.

ROSSETTO, R.; BERTON, R. S.; MATTIAZZO, M. E.; LANDELL, M. G. A. Produtividade e nutrientes na cana-de-açúcar em solo tratado com composto de lixo urbano. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 20, n. 4, p. 28-31, 2002.

SAS INSTITUTE. **SAS OnlineDoc**. Version 9.1. Cary, NC, 2002. Disponível em: <http://support.sas.com/91doc/docMainpage.jsp>. Acesso em: 13 set. 2005.

SERENO, M. L. **Avaliação da tolerância de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a metais: expressão dos genes de metalotioneína**. 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SHUMAN, L. M. Effect of organic waste amendments on zinc adsorption by two soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 164, p. 197-205, 1999.

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

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, 1996. p. 237-239. (Boletim, 100).

STACEY, S. P.; MERRINGTON, G.; McLAUGHLIN, M. J. The effect of aging on the availability of cadmium and zinc in soil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, p. 313-321, 2001.

STENTIFORD, E.; DE BERTOLDI, M. Composting: Process. In: CHRISTENSEN, T. H. (Ed.). **Solid waste technology & management**. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. p. 513-532.

TÜRKAN, I.; HENDEN, E.; CELIK, Ü.; KIVILCIM, S. Comparison of moss and bark samples as biomonitors of heavy metals in a highly industrialized area in Izmir, Turkey. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 166, p. 61-67, 1995.

TYLER, L. D.; McBRIDE, M. B. Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel and zinc in organic and mineral soil columns. **Soil Science**, New Brunswick, v. 134, p. 198-205, 1982.

UDOM, B. E.; MBAGWU, J. S. C.; ADESODUN, J. K.; AGBIM, N.N.. Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge. **Environment International**, New York, v. 30, p. 467-470, 2004.

USEPA. Title 40 CFR – Part 503. Final rules: Standards for the use or disposal of sewage sludge. **Federal Register**, Washington, DC, v. 58, p. 9387-9415, 1993.

USEPA. **Method 3051A** - Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, DC, 2007. Disponível em: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2011.

ZHAO, X. L.; MU, Z. J.; CAO, C. M.; WANG, D. Y. Growth and heavy metal up take by lettuce grown in soils applied sewage sludge compost. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 43, p. 1532-1541, 2012.

WU, S.; FENG, X.; WITTMEIER, A. Microwave digestion of plant and grain reference materials in nitric acid or a mixture of nitric acid and hydrogen peroxide for the determination of multi-elements by inductively coupled plasma mass spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, London, v. 12, p. 797-806, 1997.

8. ANEXOS**Anexo 1 - Produtividade de colmos (TCH) (t ha⁻¹)**

Dose de Fosforo (kg ha⁻¹)	Dose de Composto de Lodo (t ha⁻¹)			
	0	14,7	29,4	44,5
0	79	81	91	90
73	78	84	89	94