

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

ADEMIR FRANCO

**Aplicação de lodo de esgoto em cana-planta como
fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental**

Piracicaba
2009

ADEMIR FRANCO

**Aplicação de lodo de esgoto em cana-planta como
fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na
Agricultura, Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Energia Nuclear na
Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior

Piracicaba

2009

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA 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

Franco, Ademir

Aplicação do lodo de esgoto em cana-planta como fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental / Ademir Franco; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - Piracicaba, 2009.

96 f.: fig.

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

1. Fertilidade do solo 2. Metais pesados 3. Nutrição vegetal 4. Resíduos sólidos domésticos I. Título

CDU 631.879.2:633.61

A minha família

Dedico

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior, pela orientação, amizade e apoio para execução desse trabalho.

A Biossolo Agricultura e Ambiente, pela ajuda na escolha da área experimental e apoio durante todo o desenvolvimento do experimento.

Ao Sr. Celso Batagin, pela cessão da área experimental e disponibilização de recursos para o desenvolvimento do experimento no campo.

À Coordenadoria do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pela concessão da bolsa de doutorado e a Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Ao Prof. Dr. Takashi Muraoka e *in memoriam* ao Prof. Dr. Eurípedes Malavolta, por viabilizar as instalações laboratoriais para realização das análises.

Aos Prof. Dr. José Carlos Barbosa e Prof. Dr. Dilermando Percin do Departamento de Ciências Exatas da UNESP-Jaboticabal, pelo auxílio no delimitamento experimental e análises estatísticas.

Ao Prof. Dr. Antonio Enedi Boaretto, que sempre bem humorado, me ofereceu um bom, convívio e ótimos ensinamentos.

À Biologista e técnica do laboratório Henriqueta Maria Gimenes Fernandes, por seu companheirismo, pelos ensinamentos e todo apoio, dedicação desde o início dos trabalhos.

À Biologista e técnica do laboratório Cleusa Pereira Cabral, que, sempre com seu bom humor me ajudou nas análises laboratoriais.

À estagiária Juliana Nassin, que sempre esteve disposta a ajudar e por toda a dedicação prestada, em nome da qual eu agradeço os demais estagiários que também contribuíram neste trabalho.

Aos amigos Henrique C.J. Franco e Mácio Moraes que me incentivaram e apoiaram na realização dessa etapa da minha vida.

Outros que surgiram no percurso do doutorado e fazem parte da minha vida: Lilian, Lúcia, Carlos Baca, Lilian P., Juliana, João, Barizon, Adriano, Adriana.

Aos amigos de laboratório: Ana Carolina, Denis, Leila, Maju, Milton, Raul, Vivian e Vitor; muito obrigado pelo companheirismo e ajuda de todos vocês.

Agradeço a todos os funcionários do CENA, sempre gentis e solícitos

RESUMO

FRANCO, A. **Aplicação do lodo de esgoto em cana-planta como fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental**. 2009. 96 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

O potencial do uso agrícola do lodo de esgoto decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes de plantas, principalmente o nitrogênio e fósforo, constituintes de maior valor agrícola no lodo. No entanto, faltam pesquisas para adequar as doses complementares de adubos nitrogenado e fosfatado a serem aplicadas em área agrícola tratada com lodo. Não obstante aos benefícios evidentes da aplicação do lodo na agricultura, elementos potencialmente tóxicos (Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, e Zn) podem estar presentes no lodo de esgoto e contaminar o ambiente e a cadeia alimentar. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre as propriedades químicas do solo e a produtividade, características tecnológicas, estado nutricional e elementos potencialmente tóxicos, como efeito direto, na cana-planta e, como efeito residual, na primeira soqueira. Foi instalado um experimento em área comercial de cultivo de cana-planta (no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil), em setembro de 2005. Foram aplicadas quatro doses de lodo (0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e de P₂O₅ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), correspondentes a 0, 33, 66 e 100% do N e P recomendados para a cultura. (as dose de lodo foram calculadas com base no teor do N-disponível), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com duas repetições. Para avaliar o efeito residual do lodo, após a colheita da cana-planta, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, em todas as parcelas. A cana-planta foi colhida em setembro de 2006 e a cana-soca em outubro de 2007. A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado alterou somente as variáveis de produtividade e teores de N e P no solo e na planta. Para as demais variáveis, em alguns casos, foi observado o efeito do lodo. A aplicação de lodo no plantio da cana, combinado ou não com adubo nitrogenado e/ou fosfatado, aumentou a produtividade de colmos de 84 a 118 t ha⁻¹, sem alterar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, em relação ao adubo NPK convencional, que produziu 91 t ha⁻¹ de colmo. A aplicação do lodo de esgoto resultou em incremento no teor de C-orgânico, na camada de 0-0,2 m de profundidade. O tempo de persistência do lodo no solo foi superior a 360 dias. Os teores de P no solo

aumentaram com a aplicação do lodo e do adubo fosfatado, passando de classe muito baixa para média. O fornecimento de N pelo lodo resultou em aumento do teor de N no solo e na planta. A aplicação do lodo resultou em aporte, em torno de três vezes a quantidade de Cd no solo anterior a aplicação do lodo, para o Zn, o aporte foi de 76%, o que refletiu em maiores teores dos elementos no solo e na partes da planta analisadas (folha, colmo e caldo). Foi observado aumento nos teores de Ag, Cd, Cu, Hg, Ni, V e Zn no solo e na cana-planta, e, como efeito residual, aumento nos teores de Ag, Cd, Hg e Zn no solo e na cana-soca com as doses de lodo. Concluiu-se que a aplicação do lodo de esgoto, na cana-planta, dentro dos critérios técnicos (Resolução CONAMA nº 375) promove: como efeito direto na cana-planta, melhoria da fertilidade do solo, pelo aumento no teor de C-orgânico e fornecimento de N e P; redução no uso de fertilizantes nitrogenado e fosfatado, respectivamente, em 100% e 30%; aumento da produtividade de colmo e de açúcar, sem alterar a qualidade tecnológica; e como efeito residual, na cana-soca, o aumento da produtividade de colmos em 12% e da produtividade de açúcar em até 11%; e não contaminação do ambiente canavieiro, solo e planta, por Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, e Zn.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Nutrição mineral de plantas. *Saccharum* spp Metais pesados.

ABSTRACT

FRANCO, A. **Sewage sludge application in cane-plant as nitrogen and phosphorus source and its environmental effects**. 2009. 96 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

The potential agricultural use of the sewage sludge is due to their organic matter and nutrients contents, mainly nitrogen and phosphorus, the most important constituent. However, there is a lack of research to adequate the nitrogen and phosphate fertilizer doses to be applied in agricultural fields treated with this residue. Despite the evident benefits of the agricultural use of the sludge in the sugarcane crop, potential toxic elements (Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V and Zn) can be in the sewage sludge and contaminate the environment and the food chain. The objective of this study was to evaluate the effect of levels of sewage sludge and mineral sources of nitrogen and phosphorus in the chemical proprieties, productivity and technological characteristics, nutritional state and potential toxic elements, as direct effect, in cane-plant and, as residual effect, in the first cane-ratoon. The field study was initiated in September 2005, in a commercial production area planted with cane-plant (municipality of Capivari, São Paulo State, Brazil). Four doses of sewage sludge (0, 3.6, 7.2 and 10.8 t ha⁻¹, dry base), of nitrogen (0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and of P₂O₅ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹), corresponding to 0, 33, 66 and 100 % of N and P recommended to crop (N doses from sludge was calculated based in N-available), were applied in randomized block design, in factorial design, with two replications. To evaluate the residual effect of the sludge, after the harvest of cane-plant, 120 kg ha⁻¹ of N and 140 kg ha⁻¹ of K₂O were applied in all the parcels. The cane-plant cane was harvested on September 2006 and the cane-ratoon was harvested on October 2007. The nitrogen and phosphorus fertilizer only modified the productivity and N and P contents in the soil and plants. In some cases, there were sludge effects. The sludge application in the cane planting combined with or without nitrogen and/or phosphate fertilizer, increased the stalk yield from 84 up to 122 t ha⁻¹, with no alteration on the technological quality of the sugarcane, when compared with the application of NPK fertilizer alone, which stalk yield was 91 t ha⁻¹. It was observed an increment of the C-organic content up to 0-0.2 m depth. The period of the sludge in the soil was more than 360 days. The P contents in soil increased with the application of both, sludge and the phosphorus fertilizer, changing from the very low to middle class. The sludge resulted in an increase of the N

concentration, in three times the Cd background and 76% of Zn background in the soil, increasing their plant contents (leaf, stalk and juice). The sludges doses increased the Ag, Cd, Cu, Hg, Ni, V and Zn in soil and cane-plant as direct effect and the Ag, Cd, Hg and Zn content in soil and cane-ratoon as residual effect. The agricultural use of sewage sludge in cane-plant crop, following the criteria (Resolução CONAMA n 375), resultes: as direct effect in cane-plant, improve the soil fertility due to the increase of C-organic content and N and P supplied; reduce the use of N and P mineral fertilizer in 100% and 30%, respectively; increment the stalk and sugar yield, without modifying the technologic quality; and as residual effect, the increment the stalk yield in 12% and sugar yield in 11%; in cane-ratoon; and no contamination of sugarcane environment, soil and plant, by Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, e Zn.

Keywords: Soil fertility. Mineral nutrition of plants. *Saccharum* spp Heavy metals.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1	Potencial do uso agrícola do lodo de esgoto na produção de cana-de-açúcar.....	12
2.2	Efeito de adubos minerais nitrogenado e fosfatado na cultura da cana-de-açúcar.....	13
2.3	Impactos ambientais da aplicação de lodo de esgoto	15
2.4	Determinação de elementos-traço	17
3	LODO DE ESGOTO COMO FONTE DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NO CULTIVO DA CANA-PLANTA E EFEITO RESIDUAL NA PRIMEIRA CANA-SOCA.....	19
3.1	Introdução.....	21
3.2	Material e métodos	22
3.3	Resultados e discussão	25
3.4	Conclusões.....	31
4	FERTILIDADE DO SOLO E ESTADO NUTRICIONAL DA CANA-PLANTA CULTIVADA EM SOLO TRATADO COM LODO DE ESGOTO	32
4.1	Introdução.....	34
4.2	Material e métodos	34
4.3	Resultados e discussão	39
4.4	Conclusões.....	47
5	ARSÊNIO, BÁRIO, CÁDMIO, CHUMBO, COBRE, CRÔMIO, NÍQUEL, SELÊNIO E ZINCO EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO TRATADO COM LODO DE ESGOTO	50
5.1	Introdução.....	52
5.2	Material e métodos	53
5.3	Resultados e discussão	58
5.4	Conclusão	67

6	ANTIMÔNIO, BERÍLIO, COBALTO, MERCÚRIO, PRATA, TÁLIO, TÓRIO, URÂNIO E VANÁDIO NO SISTEMA SOLO-CANA-DE-AÇÚCAR TRATADO COM LODO DE ESGOTO.....	68
6.1	Introdução.....	70
6.2	Material e métodos	71
6.3	Resultados e discussão	75
6.4	Conclusão	84
7	CONCLUSÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da densidade populacional nas cidades, maior quantidade de água residuária é gerada e destinada aos rios, porém, com aumento da conscientização ambiental da sociedade, principalmente no que diz respeito à qualidade de água potável e à preservação dos recursos naturais, esta prática tem se tornado cada vez mais inconcebível. Cabe salientar que nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil já há escassez de água potável e conflitos pelos usos múltiplos da água. Dessa forma, é crescente o número de estações de tratamento de esgoto nas cidades, as quais devolvem aos rios uma água com menor carga orgânica e de organismos patogênicos (ANDREOLI; PEGORINI, 1998; ABREU JUNIOR et al., 2005); contudo, deste tratamento, gera-se um novo problema: o lodo de esgoto.

A prática já usual de disposição do lodo de esgoto é em aterros, cujo custo tem sido a cada dia mais elevado. No início do milênio, este custo era estimado entre 20 a 40% do custo de operação de uma estação de tratamento de esgoto (TSUTIYA, 2002) e, mais recentemente, já é de 50 a 60% do custo (ABREU JUNIOR et al., 2008).

Quando o lodo de esgoto é proveniente de estações de tratamento biológico, com predominância de esgotos domésticos sobre os industriais, os teores de elementos potencialmente tóxicos permanecem dentro de faixas aceitáveis para o seu uso agrícola (TSUTIYA, 2002). Desta forma, poderá ser utilizado com segurança, o lodo, devidamente condicionado biológica e fisicamente que atender à Resolução nº 375 do CONAMA (CONAMA, 2006), que legisla sobre o uso de lodo de esgoto na agricultura no Brasil. Entretanto, se ocorrer a presença, em excesso, de contaminantes ou de patógenos, a situação é inversa, ocasião em que o lodo de esgoto terá restrições para fins agrícolas (ABREU JUNIOR et al., 2005). O potencial do uso agrícola do lodo decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes de plantas (BETTIOL, CAMARGO, 2006). Além do mais, as condições de clima tropical favorecem a degradação do conteúdo orgânico (OLIVEIRA et al., 2002), assim disponibilizando, principalmente o nitrogênio e fósforo, constituintes de maior valor agrícola no lodo (TSUTIYA, 2002).

Na cultura da cana-de-açúcar, a aplicação do lodo de esgoto tem as seguintes vantagens: a) o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área de cultivo de 6,6 milhões de hectares e produção de 571,4 milhões de toneladas de cana na safra 2008 (CONAB, 2008); b) a maior parte das áreas de cultivo, conforme norma para uso agrícola de lodo, está apta a receber estes resíduos e está próxima aos grandes centros urbanos; c) o cultivo da cana-de-açúcar, em toda sua extensão, apresenta alto índice de mecanização, o que

minimiza o contato do operador com os resíduos; d) trata-se de um setor agrícola tecnologicamente diferenciado dos demais em que as variáveis de fertilidade do solo e as envolvidas no desempenho da cultura são comumente monitoradas e corrigidas com o objetivo de se conseguir altas produtividades; e, e) trata-se de uma cultura não consumida *in natura*. No caso da produção de açúcar, o colmo da cana é submetido a um processo de industrialização, envolvendo tratamentos físico-químicos que podem eliminar a presença de parasitas humanos e minimizar a presença de elementos potencialmente tóxicos no produto final. No caso da produção de álcool também existe a possibilidade de que os elementos potencialmente tóxicos, em sua maioria, sejam eliminados durante o processo de fabricação (MARQUES; MARQUES; TASSO JUNIOR, 2001).

O uso do lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar, em áreas comerciais, embora em pequena escala já é uma realidade no Estado de São Paulo (ABREU JUNIOR et al., 2008) e se constitui como uma das alternativas de maior viabilidade técnico-econômica para a gestão do resíduo. (MARQUES, 1996; SILVA et al., 1998; OLIVEIRA, 2000; FRANCO, 2003; CHIBA, 2005). Considerando que o lodo contém altos teores de nitrogênio e fósforo, supõe-se que as quantidades dos adubos nitrogenado e fosfatado possam ser, pelo menos, reduzidas. Todavia, o investimento de implantação da cultura é muito alto para o produtor correr risco de perda de produtividade, ou lucratividade, ou então de contaminação do ambiente.

Sabe-se que o crescimento e a produtividade da cana-planta são muito pouco alterados pela aplicação do adubo mineral nitrogenado, enquanto que na cana-soca há ausência de efeito para o adubo mineral fosfatado. Porém, no solo, o comportamento do nitrogênio e do fósforo quando fornecidos por meio de fontes orgânicas é diferente daquele quando os nutrientes são fornecidos na forma mineral (BOARETTO, 1986; ANDRADE et al., 2003). Embora sejam encontradas pesquisas sobre o potencial de o lodo de esgoto fornecer nitrogênio e fósforo para a cultura da cana-de-açúcar, os resultados ainda não permitem estabelecer quanto de adubo nitrogenado e, principalmente, de adubo fosfatado pode ser substituído em função da dose de lodo a ser aplicada.

Outra preocupação muito relevante ao uso do lodo na cultura da cana-de-açúcar é o desbalanço nutricional que ele pode ocasionar às plantas com conseqüente redução na síntese de sacarose (BARBIERI, 1984), inclusive com efeitos negativos no processo de industrialização do açúcar (STUPIELO, 2000). Este desbalanço, por exemplo, pode ser provocado pelo excesso ou falta de nitrogênio e/ou de fósforo, ou pela escassez de potássio no

lodo, ou, ainda, pela lixiviação de outros nutrientes (BERTONCINI; MATTIAZZO, 1999). A complementação adequada dos nutrientes para as plantas é fator chave para o sucesso do uso agrícola do lodo de esgoto.

Não obstante aos benefícios evidentes, patógenos e compostos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxicos podem estar presentes no lodo de esgoto e contaminar o ambiente e a cadeia alimentar. Além de ser questionado pelos próprios agricultores, este potencial de contaminação do ambiente tem sido alvo constante de críticas e fator de restrição do uso agrícola de lodo de esgoto domiciliar por parte dos agentes de controle de poluição ambiental, por exemplo da CETESB e do CONAMA (ABREU JUNIOR et al., 2005). Urge, portanto a condução de pesquisas agronômicas onde o enfoque contaminação não seja deixado de lado. Em virtude do enfoque ambiental, também será priorizado o estudo dos elementos inorgânicos no sistema solo-cana tratado com lodo (Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, e Zn).

Assim, a hipótese do trabalho foi que a aplicação de lodo de esgoto, devidamente condicionado, para a cultura da cana-de-açúcar deveria substituir, pelo menos parcialmente, as quantidades de nitrogênio e fósforo aplicados como adubo mineral, pois a liberação lenta e gradual do nitrogênio e fósforo oriundos do lodo poderia resultar em melhor aproveitamento dos nutrientes pela cana-de-açúcar, com melhoria ou manutenção da produtividade e com pouco ou mínimo de impacto ambiental negativo.

Neste contexto, o presente projeto objetiva avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre as propriedades químicas do solo e a produtividade, características tecnológicas, estado nutricional e elementos potencialmente tóxicos na cana-planta e na primeira soqueira, como efeito direto e residual, respectivamente, do lodo aplicado no plantio da cana-planta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Potencial do uso agrícola do lodo de esgoto na produção de cana-de-açúcar

Melhorias nas propriedades biológicas, físicas e químicas do solo têm sido atribuídas à aplicação de lodo de esgoto, assim como desenvolvimento, estado nutricional e produtividade das plantas de interesse econômico com resultados semelhantes, ou mesmo superiores, ao promovido pelo manejo agrícola convencional (MARQUES, 1996; MELO; MARQUES, 2000; OLIVEIRA, 2000; SILVA et al., 2001; CHIBA, 2005). Todavia a maioria dos trabalhos

de pesquisa sobre o uso do lodo na cultura da cana-de-açúcar (MARQUES, 1996, SILVA et al., 1998, OLIVEIRA, 2000; SILVA et al., 2001) tem avaliado apenas o efeito de doses de lodo, doses estas muitas vezes superiores ao atualmente empregado (na ordem de 5 a 15 t ha⁻¹ ano⁻¹), comparando as com a dose zero de lodo ou com a adubação mineral convencional.

Utilizando lodo de esgoto como fonte de fósforo, em cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho-Escuro textura média, Marques (1996), observou que o teor de fósforo disponível aumentou linearmente com a dose de lodo (40, 80 e 160 t ha⁻¹) e que a produtividade foi semelhante àquela obtida com adubação mineral convencional. De modo semelhante, Silva et al. (2001) verificaram aumento no teor de fósforo no solo, extraído pelo método da resina, cujo teor da classe muito baixa passou para a classe de média disponibilidade de P, a partir da dose de 20 t ha⁻¹ (base seca), porém com ganhos de produtividade de biomassa de colmos em consequência do uso de até 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca). Não foram detectadas alterações nas variáveis tecnológicas (Brix, Pol e ATR), entretanto, houve acréscimo na produção de açúcar por unidade de área plantada.

No intuito de avaliar o potencial de o lodo de esgoto fornecer nitrogênio para plantas cana-de-açúcar, Franco, Marques e Melo (2008), em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, com a aplicação de lodo de esgoto por dois anos consecutivos nas doses 5 e 10 t ha⁻¹, em cana-planta, e 7 e 14 t ha⁻¹, em cana-soca, verificaram que os teores de nitrogênio encontrados nos colmos, folhas e palmitos e a produtividade foram semelhantes aos encontrados no tratamento com adubação mineral convencional.

Chiba (2005), cultivando cana planta tratada com até 8,2 t ha⁻¹ de lodo, na base seca, em combinação com adubo fosfatado, e cana-soca com 16 t ha⁻¹ de lodo, em combinação com adubo nitrogenado, verificou que o lodo pode substituir até 25% do adubo fosfatado na cana-planta e 100% do adubo nitrogenado na cana-soca.

2.2 Efeito de adubos minerais nitrogenado e fosfatado na cultura da cana-de-açúcar

Os resultados apresentados na literatura sobre o efeito da aplicação de adubo mineral nitrogenado na cana-planta são contraditórios, pois, enquanto alguns poucos têm revelado respostas positivas (ORLANDO FILHO; RODELLA, 1996; FRANCO, et al., 2008), a maioria não tem evidenciado qualquer resposta (AZEVEDO; ROBAIANA; MANHÃES,

1980; SAMPAIO; SALCEDO; BETTAMY, 1984; AZEREDO et al., 1986; BITTENCOURT; FAGANELLO; SALATA, 1986; ORLANDO FILHO et al., 1999; GAVA et al., 2001).

A ausência de efeito do adubo mineral nitrogenado na produtividade da cana-planta, em condições de campo, tem sido atribuída: a) ao sistema radicular mais vigoroso (CARNAÚBA, 1990), que, ao explorar um maior volume de solo, conseqüentemente, é mais eficiente na absorção do nitrogênio e, portanto, menos dependente da fertilização; b) à mineralização do nitrogênio da matéria orgânica do solo, acumulada durante o período da soqueira, favorecida pelo preparo mecânico, como a aração e gradagem, para reforma do canavial (ORLANDO FILHO et al., 1999); c) à presença de microrganismos fixadores de nitrogênio na rizosfera, colmo e folha da cana (URQUIAGA; CRUZ; BODDEY, 1992); d) às reservas orgânicas nos toletes que podem representar de 5 a 10% das necessidades da planta, com influência direta na brotação e desenvolvimento inicial da cultura (CARNEIRO; TRIVELIN; VICTORIA, 1995); e, em função destes processos, e) à pequena contribuição do adubo mineral na quantidade do nitrogênio retida na planta (GAVA et al., 2001). Rossiello (1987), compilando resultados de 105 ensaios de campo, demonstrou que a probabilidade de resposta da cana-planta à adubação nitrogenada é menor quanto maior os teores de carbono orgânico e nitrogênio dos solos.

As soqueiras de cana-de-açúcar, de modo geral, apresentam maiores possibilidades de respostas positivas ao adubo nitrogenado que a cana-planta (ZAMBELO JÚNIOR; ORLANDO FILHO, 1981). Carnaúba (1990) sugeriu que a explicação para este fato está na diferença de vigor dos sistemas radiculares da cana-planta e das soqueiras, muito menos vigorosos nas soqueiras, estando, portanto, menos aptos a absorverem o nitrogênio que está localizado a maiores distâncias, tornando essencial à adição deste nutriente às socas para manutenção de altas produtividades.

O adubo nitrogenado, geralmente, não tem alterado as características agroindustriais da cana-de-açúcar, como Brix caldo, fibra, AR, Pol caldo, Pol cana; assim, os maiores rendimentos em açúcar por área são resultantes da maior produtividade de colmos (TRIVELIN, 2000).

Outro fato peculiar da cultura da cana-de-açúcar é seu desenvolvimento em relação ao adubo mineral fosfatado: tem-se verificado alta produtividade de cana-planta adubada com fósforo e ausência de efeito na produtividade de cana-soca, ao contrário do que ocorre com o nitrogênio. Este comportamento tem sido justificado pelo fato de o fósforo estar diretamente

ligado ao desenvolvimento radicular, intensidade de perfilhamento e crescimento do colmo (ALEXANDER, 1973).

O fósforo quando aplicado no solo na forma orgânica, como no lodo de esgoto, tem-se mostrado mais disponível que quando fornecido na forma mineral exclusiva (BOARETTO, 1986). A decomposição do material orgânico resulta em ácidos orgânicos que são adsorvidos pelo solo, ocupando sítios de adsorção de fosfato e aumentando a disponibilidade do elemento (McDOWELL; SHARPLEY, 2001; ANDRADE et al., 2003), porém este efeito pode ser transitório, devido a alguns ácidos orgânicos serem prontamente mineralizados (AFIF; BARRON; TORRENT, 1995). No caso de aplicação de lodo, o incremento do teor de fósforo disponível no solo, avaliado método da resina, para a cultura da cana-de-açúcar já foi constatado por Boaretto (1986), Marques (1996), Silva et al. (2001) e Chiba (2005).

2.3 Impactos ambientais da aplicação de lodo de esgoto

A aplicação agrícola de lodo de esgoto, devidamente condicionado, está se tornando uma prática comum devido à sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de ser um manejo economicamente viável para o setor agrícola. Entretanto, o uso deste resíduo na agricultura também pode causar a introdução de patógenos e de contaminantes inorgânicos e orgânicos nos solos (BETTIOL, CAMARGO, 2006; ABREU JUNIOR et al., 2008).

O lodo de origem doméstica, por suas características, pode vir a ser fonte direta de contaminação de agentes patogênicos, exigindo um tratamento adequado, de modo a permitir sua manipulação e utilização com segurança (ANDREOLI; PEGORINI, 1998). Resultados obtidos por Rocha et al. (2003), dois meses após a aplicação de lodo de esgoto Classe B em couve, mostraram não haver contaminação no solo por patógenos, apesar do alto grau de contaminação inicial no lodo. Nas análises microbiológicas e parasitológicas realizadas nas folhas de couve, aos 75 dias após a incorporação do lodo, não foram encontradas amostras positivas para coliformes totais e fecais e para ovos de helmintos. Ressalta-se, obviamente, que estes resultados não indicam que cuidados não devam ser tomados na manipulação do lodo, durante e após sua aplicação no solo.

Os lodos de esgoto apresentam, em média, 5 a 76 g kg⁻¹ de nitrogênio total, sendo que aproximadamente 90% estão na forma orgânica. Este nitrogênio, uma vez mineralizado, pode ser convertido a nitrato e lixiviado, contaminando águas superficiais e subterrâneas

(OLIVEIRA et al., 2001). O consumo de águas com alto teor de nitrato pode ocasionar problemas de saúde em animais e em seres humanos, especialmente em crianças, pelo risco de causar metaemoglobinemia (LÆGREID; BØCKMAN; KAARSTAD, 1999). Cabe salientar que a Organização Mundial de Saúde estabelece para água potável a concentração máxima aceitável de 10 mg L^{-1} de nitrogênio na forma de nitrato, padrão este também adotado no Brasil pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2004) e pela CETESB, para o Estado de São Paulo (CETESB, 2005).

A aplicação de 33 a 99 t ha^{-1} de lodo, base seca, correspondente a 844 a 2.532 kg ha^{-1} de nitrogênio total, em Latossolo Amarelo distrófico, resultou em aumento significativo da concentração de N-NO_3^- na solução do solo, a 30, 60 e 90 cm de profundidade (OLIVEIRA et al., 2001). Aos 39 dias após a aplicação, as concentrações de N-NO_3^- nos 30 cm de profundidade foram 41,17; 59,98 e $137,84 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto no tratamento com adubação mineral foi $27,67 \text{ mg L}^{-1}$. Considerando que a cultura da cana-de-açúcar tem quase a totalidade de raízes absorventes na camada 0-30 cm (BACCHI, 1983), pode-se considerar que este nitrogênio estaria praticamente perdido para o aproveitamento pela cultura. Anjos e Mattiazzo (2001) verificaram risco de contaminação de águas subterrâneas em Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho, ambos distróficos, tratados com 388 t ha^{-1} de lodo. Porém a dose agronomicamente recomendada, de acordo com Berton (2000), de lodo de esgoto da ETE de Franca-SP na cultura da cana-de-açúcar é de $5,5 \text{ t ha}^{-1}$, na base seca, o que corresponderia aproximadamente a 120 kg ha^{-1} de nitrogênio inorgânico ou mineralizável nos três primeiros meses após a aplicação.

O fósforo também tem sido identificado como um dos principais fatores de eutrofização de cursos d'água (MAGUIRRE; SIMS; COALE, 2000). O tratamento das águas residuárias gera um lodo de esgoto, geralmente, rico em fósforo (FROSSARD; SINAJ; DUFOUR, 1996), o que faz com que o uso agrícola do lodo de esgoto seja uma excelente opção para a reciclagem e manutenção do fósforo nos solos, haja vista a deficiência de fósforo, notadamente em solos ácidos (LÆGREID; BØCKMAN; KAARSTAD, 1999), a escassez de jazidas para produção de fertilizante mineral fosfatado e que, se não houver tratamentos das águas servidas, o destino final do nutriente será o fundo dos mares.

Em solos ácidos, quantidades significativas de fósforo podem ser adicionadas ao solo via lodo de esgoto e, então, modificar alguns aspectos da dinâmica do nutriente e contribuir para a melhoria da disponibilidade de fósforo para as plantas (MUNHOZ, 2001). Há também o risco de transporte do fósforo, contido no lodo ou adsorvido ao material particulado na

superfície do solo, pela água de enxurrada, em direção aos reservatórios de águas superficiais, causar eutrofização (MAGUIRRE; SIMS; COALE, 2000).

Compostos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxico constituem um outro aspecto importante que deve ser levado em consideração para o uso agrícola do lodo (OLIVEIRA, 2000; MELO; MARQUES, 2000; SILVEIRA; ALLEONI; GUILHERME, 2003). Entre os elementos inorgânicos presentes no lodo de esgoto, há os nutrientes de plantas e que, se não estiverem no solo em concentrações adequadas, restringirão à produção vegetal: Cu, Ni e Zn; mas em altas concentrações eles poderão contaminar os solos, as águas, os alimentos, os animais e os homens. Há também aqueles elementos que são intrinsecamente tóxicos: As, Cd, Cr, Hg, Pb e Se; mas eles estão presentes no solo e nas plantas, em concentrações muito baixas, não sendo, na maioria dos casos, detectados pelas técnicas convencionais de análise de solo e planta.

As pesquisas no Brasil, geralmente, têm demonstrado que Cr, Cu, Ni e Pb apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na camada do solo onde o lodo de esgoto foi incorporado, enquanto que o Cd e, principalmente, o Zn são móveis e, portanto, apresentam maior potencial para contaminar o subsolo e as águas subterrâneas (ISEA et al., 2000; OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001).

A relação entre a concentração de um elemento químico na parte aérea das plantas e a concentração dele no solo pode ser indicativo de sua fitodisponibilidade e tem sido demonstrado que Cd e Zn possuem os maiores coeficientes de transferência para as plantas, enquanto que Cr e Cu são menos disponíveis (LASAT, 2000). Silva et al. (2006) avaliaram a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos para milho tratado com lodo de esgoto (obtido das Estações de Tratamento de Esgotos de Franca e de Barueri) nas doses de 1, 2, 4 e 8 vezes a quantidade para fornecer o nitrogênio necessário para a cultura, por 3 anos sucessivos de cultivo. Os autores concluíram que os teores extraíveis de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn no solo aumentaram linearmente com as doses de lodo de esgoto, porém a correlação com o teor na folha e nos grãos mostrou-se dependente do elemento avaliado e da origem do lodo utilizado.

2.4 Determinação de elementos-traço

A determinação de elementos potencialmente tóxicos, também conhecidos como elementos-traço, em amostras de solo tratadas com lodo de esgoto, bem como de plantas

cultivadas sob este solo é de suma relevância em estudos de avaliação de risco do uso deste resíduo na agricultura (GUILHERME et al., 2005). De um modo geral, as pesquisas realizadas no Brasil, com o intuito de avaliar a dinâmica de elementos potencialmente tóxicos nos solos tratados com lodo de esgotos, não demonstraram efeitos adversos sobre o ambiente canavieiro (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; BERTONCINI; MATTIAZZO; ROSSETO, 2004; CHIBA, et al., 2008); mas, isto não indica propriamente que não houve aumento nos teores dos elementos-traço no sistema solo-planta. Os problemas encontrados neste tipo de avaliação são as baixas concentrações dos elementos-traço e os altos limites de detecção dos métodos analíticos utilizados, geralmente a espectrofotometria de absorção atômica (AAS) ou a espectrometria de emissão atômica com plasma (ICP-AES), por exemplo, para o chumbo.

Oliveira e Mattiazzo (2001), após aplicação sucessiva de lodo de esgoto durante dois anos, para cultivo de cana-de-açúcar, sendo 33, 66 e 99 t ha⁻¹ de lodo, base seca, na primeira aplicação e 37,74 e 110 t ha⁻¹ na segunda aplicação, relataram teores totais de cádmio e chumbo no solo abaixo do limite de detecção do AAS, ou seja, as concentrações analíticas apresentaram-se inferiores a 0,08 e 0,76 µg mL⁻¹, no extrato, ou a 8 e 76 mg kg⁻¹, na amostra de terra, respectivamente. Com relação à possibilidade de incrementos no acúmulo de Cd, Cr, Ni e Pb pelas plantas de cana-de-açúcar, os autores comentam que não foram possíveis maiores considerações tendo em vista as concentrações dos elementos, em todas as amostras analisadas, também estiveram abaixo do limite de detecção do AAS, ou seja, nas amostras de folha e colmo desfibrado: Cd < 0,60 mg kg⁻¹, Cr e Ni < 0,75 mg kg⁻¹ e Pb < 5,70 mg kg⁻¹; e nas amostras de caldo: Cd, Cr e Ni < 0,02 mg kg⁻¹ e Pb < 0,15 mg kg⁻¹.

Tais fatos demonstram que a análise química de terra e, principalmente, de planta por AAS ou mesmo por ICP-OES, em experimentos agronômicos para avaliação de elementos inorgânicos ao nível traço (µg L⁻¹, ppb) e ultratraço (ng L⁻¹, ppt), de acordo com a rotina atual, não é viável. Atualmente, a espectrometria de massas com plasma (ICP-MS) apresenta-se como a melhor opção para a análise multielementar e simultânea de elementos potencialmente tóxicos, seja em rotina ou pesquisa. Esta técnica possui vantagens como: eliminação das interferências comuns devido às altas temperaturas do plasma e, principalmente, à capacidade de determinação multielementar, limites de detecção de poucos ng L⁻¹ e faixa linear de ppt a centenas de ppm (YAMANAKA, 2001; WILBUR; SOFFEY; McCURD, 2004). O estado da arte em análise de elementos ao nível ultratraço em amostras ambientais é o ICP-MS com célula de reação e colisão, para remoção de interferentes poliatômicos (AGILENT, 2005).

3 LODO DE ESGOTO COMO FONTE DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NO CULTIVO DA CANA-PLANTA E EFEITO RESIDUAL NA PRIMEIRA CANA-SOCA

RESUMO

O uso do lodo de esgoto na agricultura brasileira foi normatizado pela resolução Conama nº 375, de agosto de 2006. No entanto, faltam pesquisas para adequar as doses complementares de adubos nitrogenado e fosfatado a serem aplicadas em área agrícola tratada com lodo. Objetivou avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre a produtividade e características tecnológicas da cana-planta e da primeira soqueira (efeito residual), em campo. Foi instalado um experimento em área comercial de cultivo de cana-planta (no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil), em setembro de 2005. Foram aplicadas quatro doses de lodo (0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e de P₂O₅ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), correspondentes a 0, 33, 66 e 100% do N e P recomendados para a cultura. (as dose de lodo foram calculadas com base no teor do N-disponível), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com duas repetições. Para avaliar o efeito residual do lodo, após a colheita da cana-planta, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, em todas as parcelas. A cana-planta foi colhida em setembro de 2006 e a cana-soca em outubro de 2007. A aplicação de lodo no plantio da cana, combinado ou não com adubo nitrogenado e/ou fosfatado, aumentou a produtividade de colmos de 84 a 122 t ha⁻¹, sem alterar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, em relação ao adubo NPK convencional, que produziu 91 t ha⁻¹ de colmo. O estudo de superfície de resposta para a produtividade de colmo, em solo de baixa fertilidade, permitiu estabelecer sugestão de recomendação de adubo mineral nitrogenado e fosfatado para implantação de canavial, em função da dose de lodo; e, concluir que a aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de lodo, ou seja, da dose estabelecida pelo critério do nitrogênio, conforme resolução Conama nº 375, pôde: a) reduzir o uso de N mineral em 100% e o de P₂O₅ em 30%, com aumento de produtividade de colmos em 22%, em relação ao adubo NPK convencional, como efeito direto do lodo sobre o cultivo da cana-planta, e b) aumentar a produtividade de colmos da primeira soqueira em até 12% e a produtividade de açúcar em até 11%, como efeito residual do lodo aplicado na cana-planta sobre o cultivo da cana-soca.

Palavras-chave: Análise tecnológica. Cana-de-açúcar. Produtividade. Resíduos urbanos. *Saccharum* spp, Superfície de resposta

SEWAGE SLUDGE AS NITROGEN AND PHOSPHORUS SOURCE TO CANE-PLANT CROP AND FIRST CANE-RATOON AS RESIDUAL EFFECT

ABSTRACT

The use of sewage sludge in Brazilian agriculture was normalized by the Conama n° 375 resolution, in 2006. However, there is a lack of research to adequate the nitrogen and phosphate fertilizer doses to be applied in agricultural fields treated with this residue. In a field experiment, the effects of application rates of sewage sludge and nitrogen and phosphate mineral fertilizers on the productivity and technological characteristics of the cane-plant and cane ratoon (residual effect) crops were evaluated. The field study was initiated in September 2005, in a commercial production area planted with cane-plant (municipality of Capivari, São Paulo State, Brazil). Four doses of sewage sludge (0, 3.6, 7.2 and 10.8 t ha⁻¹, dry base), of nitrogen (0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and of P₂O₅ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹), corresponding to 0, 33, 66 and 100 % of N and P recommended to crop (N doses from sludge was calculated based in N-available), were applied in randomized block design, in factorial design, with two replications. To evaluate the residual effect of the sludge, after the harvest of cane-plant, 120 kg ha⁻¹ of N and 140 kg ha⁻¹ of K₂O were applied in all the parcels. The cane-plant cane was harvested on September 2006 and the cane-ratoon was harvested on October 2007. The sludge application in the cane planting, combined with or without nitrogen and/or phosphate fertilizer, increased the stalk yield from 84 up to 122 t ha⁻¹, with no alteration on the technological quality of the sugarcane, when compared with the application of NPK fertilizer alone, which stalk yield was 91 t ha⁻¹. The study of surface response for the stalk yield, to a low fertility soil, permitted to establish a draft of nitrogen and phosphate mineral fertilizer recommendation for cane crop implantation in function of sewage sludge application rate; and also, to conclude that the application of 10.8 t ha⁻¹, in other words, the sludge dose established by nitrogen criteria according to the Conama n° 375 resolution, could a) reduce the use of mineral N in 100% and of P₂O₅ in 30%, with increments of 22% in stalk yield, as a direct effect of the applied sludge over the cane-plant crop, and b) increase the stalk yield up to 12% and sugar yield up to 11%, as residual effect of the applied sewage in the cane-plant over the first cane-ratoon crop.

Keywords: Technological quality. Sugarcane. Crop yield. Urban wastes. *Saccharum* spp, Surface response.

3.1 Introdução

Com o aumento da densidade populacional nas cidades, maior quantidade de água residuária é gerada, dessa forma, é crescente o número de estações de tratamento de esgotos, as quais devolvem aos rios uma água com menor carga orgânica e patogenicidade; contudo, deste tratamento, gera-se um resíduo que pode configurar um novo problema: o lodo de esgoto. O potencial do uso agrícola do lodo decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes de plantas, principalmente, o nitrogênio e fósforo, constituintes de maior valor agrícola no lodo (CORRÊA, 2004; NASCIMENTO et al., 2004)

O uso do lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar em áreas comerciais, embora em pequena escala, já é uma realidade no Estado de São Paulo, e se constitui como uma das alternativas de maior viabilidade técnico-econômica para a gestão do resíduo; porém, há muitas incertezas, por parte dos agricultores e dos gestores do lodo, sobre o melhor manejo da fertilidade do solo tratado com lodo (ABREU JUNIOR et al., 2008).

Na literatura são encontrados vários trabalhos que relatam o uso do lodo na cultura da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; BERTONCINI; MATTIAZZO; ROSSETO, 2004; CAMILOTTI et al., 2006; MARQUES et al., 2007); porém, na maioria deles, foram utilizadas doses de lodo de esgoto superiores ao permitido pelos critérios técnicos da Resolução Conama nº 375, de 29/08/2006 (CONAMA, 2006), documento que legisla sobre o uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil. Ainda são poucos os trabalhos que apresentam resultados do uso de doses agronômicas de lodo sobre a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, e estes, de modo geral, relatam que a aplicação de lodo pelo critério do nitrogênio, conforme CONAMA (2006), tem sido suficiente para suprir 100% da necessidade de nitrogênio e 25% da necessidade de fósforo da cana-planta (CHIBA, 2005; FRANCO; MARQUES; MELO, 2008). Entretanto, os estudos sobre a capacidade de o lodo fornecer nitrogênio e fósforo, respectivamente, têm sido avaliados em condições experimentais distintas.

Todavia, até o momento, não há relato de trabalhos que tenham avaliado de forma simultânea, por meio de experimento em esquema fatorial, a capacidade de o lodo substituir os adubos minerais nitrogenado e fosfatado em cana-planta. Desta forma, os resultados gerados até o momento pelas pesquisas ainda não permitiram a elaboração de recomendação de adubação adequada ao uso agronômico do lodo de esgoto na cultura de cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene e, sob este aspecto, é agronomicamente recomendado que também sejam avaliados os efeitos que as adubações poderão proporcionar com o passar do tempo, ao longo da vida útil da soqueira, e não apenas em função de uma única safra. Nesta linha de trabalho, Orlando Filho et al. (1999) constataram efeito residual da adubação mineral nitrogenada da cana-planta sobre o vigor das soqueiras, refletindo em aumento de produção nos cortes subsequentes. Somando-se a isto e considerando que os estudos sobre mineralização de lodo de esgoto demonstrem que aproximadamente 30% do N orgânico é mineralizado no primeiro ano de cultivo (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002) e 10%, no segundo ano (COGGER et al., 2004), tem-se que a avaliação do efeito residual da aplicação do lodo é indispensável para recomendação da adubação mineral suplementar do canavial. No Brasil, no entanto, ainda são poucos os trabalhos que reportam os efeitos da aplicação continuada de lodo na cultura de cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al., 2002; CÓ JUNIOR; MARQUES; TASSO JUNIOR, 2008; FRANCO; MARQUES; MELO, 2008), porém em nenhum deles foi avaliado o efeito residual da aplicação de lodo no plantio da cana-planta sobre a produção da primeira cana-soca.

Assim, o presente trabalho visou avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo sobre a produtividade e as características tecnológicas da cana-planta e o efeito residual na primeira soqueira, por meio de modelos de superfície de respostas, com o intuito de nortear a elaboração de recomendação de adubação mineral para produção comercial de cana-de-açúcar em área tratada com lodo de esgoto.

3.2 Material e métodos

O experimento foi instalado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil. A área para realização do experimento foi escolhida em razão de estar inserida em projeto de utilização de lodo de esgoto na lavoura canavieira, autorizado e licenciado pelos órgãos fiscalizadores, e que, na ocasião, ainda não tinha sido tratada com lodo de esgoto.

O clima no município de Capivari é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.565 mm e de 1.615 mm, respectivamente nos períodos de setembro de 2005 a setembro de 2006 e de setembro de 2006 a outubro de 2007, conforme registros da Usina Cosan S/A.

Antes da instalação do experimento, o solo, classificado como Argissolo Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 1999), foi amostrado para avaliação da fertilidade do solo, conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006) (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Resultados da caracterização química do solo da área experimental, para avaliação da fertilidade, antes da aplicação do lodo de esgoto (julho de 2005).

Profundidade m	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S-SO ₄ mg dm ⁻³	K -----	Ca	Mg	Al mmol _c dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	T	V %
0-0,2	4,6 ⁽¹⁾	9,1	4	10	1,1	19	8	2	22	28,2	50,2	56
0,2-0,4	4,7	6,5	2	10	1,1	23	14	2	22	39,1	60,1	63
0,4-0,6	4,1	5,2	1	20	0,9	10	9	24	42	19,9	61,9	32

¹ Metodologia de análise proposta por Raij et al. (2001)

O lodo de esgoto utilizado foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiaí, em Jundiaí, SP. O lodo foi gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação. O lodo biológico foi estabilizado nas lagoas de sedimentação por cerca de 12 meses, resultando em lodo com teor de matéria orgânica em sólidos secos menor que 70%. Na seqüência, o lodo foi condicionado com polímeros, centrifugado e seco ao ar por 120 dias, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos. O lodo foi caracterizado conforme recomendado pela Resolução n° 375 (CONAMA, 2006), apresentando umidade de 78 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 5,8. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg⁻¹, de 322; 29,7; 2,2; 0,02; 10,49; 2,75; 19,03; 2,75; 17,14; 2,06, respectivamente.

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB85 5536, que possui como característica ser de ciclo médio/tardio, muito responsivo à aplicação de fertilizante mineral e apresentando altas produtividades de colmos e de açúcar quando cultivado em ambiente agrícola favorável ao seu desenvolvimento (MAULE; MAZZA; MARTHA JUNIOR, 2001).

Antes da implantação do experimento, em agosto de 2005, aplicou-se 0,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 62%) em área total, para elevar a saturação por bases a 60% (SPIRONELLO et al., 1996). As parcelas experimentais foram constituídas por sete linhas de

cana-de-açúcar, com 12 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m. Como área útil foi considerada as três linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas.

Em setembro de 2005, o lodo de esgoto foi aplicado no sulco de plantio nas doses de 0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹ de lodo, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do N, conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006); o nitrogênio, nas doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental (SPIRONELLO et al., 1996), na forma de uréia, sendo 1/3 aplicado no plantio e 2/3 em cobertura; e o fósforo, nas doses de 0, 45, 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado, na forma de superfosfato triplo, aplicado no plantio. Como o lodo de esgoto é pobre em potássio (cerca de 1 g kg⁻¹), houve a necessidade de se suprir o nutriente à cultura aplicando-se 160 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio, na forma de cloreto de potássio, em todas as parcelas.

Para avaliação do efeito residual do lodo aplicado na cana-planta sobre o cultivo da primeira soqueira, após a colheita da cana-planta, em outubro de 2006, foi realizada a adubação mineral convencional (SPIRONELLO et al., 1996) em toda a área experimental, aplicando-se 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, nas formas de uréia de cloreto de potássio, que foram incorporados ao solo.

As colheitas, com queima, ocorreram em setembro de 2006, para cana-planta, e em outubro de 2007, para cana-soca. A produtividade da cana-de-açúcar, em t ha⁻¹, foi avaliada no campo utilizando-se uma balança acoplada a um guincho. As avaliações das características tecnológicas consistiram na determinação do °Brix, Pol % no caldo, fibra, açúcar redutor (AR), Pol % na cana, pureza, açúcares redutores totais (ART) e açúcar total recuperável (ATR), de acordo com a metodologia utilizada por Prado e Pancelli (2006).

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de lodo, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento dos graus de liberdade da interação tripla, distribuído em 8 blocos (16 tratamentos por bloco), com duas repetições, totalizando 128 parcelas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, dos modelos de regressão simples e múltipla, e ao estudo de modelagem de superfície de respostas, para obtenção da equação do tipo: $Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iN^2 + jP^2$, na qual L é a dose de lodo (t ha⁻¹), N, a dose de N (kg ha⁻¹), e P, a dose de P₂O₅ (kg ha⁻¹). Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de lodo de esgoto em t ha⁻¹ referem-se à aplicação de material seco.

3.3 Resultados e discussão

A produtividade média de colmo da cana-planta por hectare (TCH), em função das doses de lodo de esgoto, de nitrogênio e de fósforo, variou de 55 a 122 t ha⁻¹ (Tabela 3.2). A produtividade do tratamento com adubo mineral foi de 91 t ha⁻¹. A variedade RB 85-5536, cultivada também por 12 meses (cana de ano), em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico, recebendo adubo mineral de modo convencional, produziu em média 98 t ha⁻¹ de colmo (GOMES, 2003). Produtividade superior foi relatada por Maule, Mazza e Martha Junior (2001), que obtiveram 154 t ha⁻¹, cultivando a mesma variedade por período de 18 meses (cana de ano e meio), em Argissolo Vermelho-Amarelo. Fato esperado, pois a cana-planta de ciclo de 12 meses é menos produtiva do que as lavouras de cana cultivadas por 18 meses (SILVA; JERONIMO; LUCIO, 2008). Portanto, pode-se considerar que são excelentes as produtividades observadas no presente trabalho, com cana de ano, principalmente nos tratamentos com 7,2 e 10,8 t ha⁻¹ de lodo.

O estudo de modelagem de superfície de resposta demonstrou efeitos dos tratamentos sobre a produtividade de colmos da cana-planta, sendo que os maiores incrementos foram causados pelas doses de lodo, seguindo pelas doses de fósforo e, por último, pelas doses de nitrogênio. Foram observados efeitos lineares e quadráticos, conforme equação:

$$\text{TCH (t ha}^{-1}\text{)} = 58,80 + 5,2 L + 0,17 N + 0,18 P - 0,15 L^2 - 0,0007 N^2 - 0,0006 P^2$$

(R² = 0,82; p < 0,05).

As maiores produtividades de colmo, na faixa de 96 a 122 t ha⁻¹, foram obtidas nos tratamentos com a aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de lodo, quando comparadas com o tratamento com adubo mineral NPK. Entretanto, Marques et al. (2007), estudando doses de 10, 20 e 40 t ha⁻¹ do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de Suzano, em Latossolo Vermelho-Escuro, e Oliveira et al. (2002), utilizando doses de 33, 66 e 99 t ha⁻¹ do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de Barueri, em Latossolo Vermelho-Amarelo, verificaram que a produtividade da cana-planta não foi alterada pelas doses de lodo e que não houve diferença entre tratamentos com lodo e com adubo mineral. A ausência de efeito do lodo foi atribuída à maior fertilidade do solo, no trabalho de Marques et al. (2007), e à falta de chuvas e, ou, ao curto período de cultivo da cana, de aproximadamente 11 meses (316 dias), no trabalho de Oliveira et al. (2002).

Tabela 3.2 – Produtividade média de colmos (TCH) da cana-planta, em função das doses de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo (t ha ⁻¹)	Nitrogênio (kg ha ⁻¹ de N)	Fósforo (kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅)			
		0	60	120	180
		----- t ha ⁻¹ -----			
	0	55	65	78	74
0	30	57	74	70	87
	60	63	96	78	63
	90	69	77	84	91
	0	84	65	86	92
3,6	30	96	77	89	84
	60	78	106	87	97
	90	95	86	95	102
	0	78	94	98	95
7,2	30	89	101	102	96
	60	99	101	106	97
	90	79	93	99	112
	0	97	105	106	102
10,8	30	102	109	96	104
	60	102	102	114	95
	90	96	107	122	118

Coefficiente de variação = 11,21%.

A produtividade máxima de colmos estimada pelo modelo estatístico foi de 120 t ha⁻¹, na condição da aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de lodo, com a complementação, via fertilizante mineral, de 53 kg ha⁻¹ de N e de 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Não obstante, considerando-se a dose de 10,8 t ha⁻¹ de lodo, sem adição de N mineral, ter-se-á produtividade estimada de 112 t ha⁻¹, com aplicação de 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅, ou seja, a dose de lodo com base no critério do N proporcionou produtividade 23% maior que o tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional, com redução de 30% da dose de adubo mineral fosfatado recomendado para a cana-planta e 100% do adubo mineral nitrogenado.

Resultados semelhantes, quanto à possibilidade de redução de doses de N e P, foram observados por Franco, Marques e Melo (2008), aplicando doses de 5 e 10 t ha⁻¹ de lodo em cana-planta. Chiba (2005), aplicando 8,2 t ha⁻¹ de lodo, com base no critério do N, complementado com 0, 45, 90, 135 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (equivalente a 0, 25, 50, 75 e 100% do adubo fosfatado recomendado para a cultura), verificou a possibilidade de redução de 25% da aplicação do adubo fosfatado, de modo semelhante ao encontrado no presente trabalho. Contudo o autor não verificou incrementos de produtividade quando o lodo foi aplicado juntamente com adubo mineral fosfatado.

Os dados médios de produtividade de açúcar da cana-planta (TAH), em função das doses de lodo de esgoto, de nitrogênio e de fósforo, variaram de 9,3 a 17,7 t ha⁻¹ (Tabela 3.3). A produtividade de açúcar no tratamento com adubação mineral, de 14,7 t ha⁻¹, foi semelhante à encontrada por Gomes (2003), que obteve produtividade de açúcar de 15,2 t ha⁻¹, para a mesma variedade do presente estudo, quando tratado com adubo mineral convencional.

Para a TAH da cana-planta, por meio do estudo de superfície de resposta, foi obtida a equação:

$$\text{TAH (t ha}^{-1}\text{)} = 8,87 + 0,98 L + 0,04 N + 0,02 P - 0,04 L^2 - 0,0002 N^2 - 0,0001 P^2$$

$$(R^2 = 0,61; p < 0,05)$$

Os valores de TAH variaram somente em função da produtividade de colmos, uma vez que o teor de açúcar teórico recuperável (ATR) não diferiu entre os tratamentos (Tabela 3.4). A ausência de resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação de fertilizante nitrogenado, sobre a variável ATR, também foi encontrada por Korndörfer et al. (1997), que verificaram que a maior produção de açúcar por área era consequência direta da maior produtividade de colmos.

Segundo a equação de superfície de resposta, a aplicação de lodo conforme recomendado pelo critério do N, ou seja, 10,8 t ha⁻¹, possibilitou obter a produtividade de 15,7 t ha⁻¹ de açúcar, quando complementada com 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via fertilizante fosfatado, possibilitando a redução de aproximadamente 30 % do fertilizante. No entanto, a produtividade de açúcar máxima de 17,4 t ha⁻¹ somente é atingida quando se adiciona 57 kg ha⁻¹ de N, via adubo mineral, à combinação de lodo e adubo fosfatado.

Tabela 3.3 – Produtividade média de açúcar (TAH) da cana-planta, em função das doses de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo (t ha ⁻¹)	Nitrogênio (kg ha ⁻¹ de N)	Fósforo (kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅)			
		0	60	120	180
----- t ha ⁻¹ -----					
0	0	9,3	10,5	12,9	12,3
	30	9,3	12,3	11,6	15,1
	60	10,1	16,1	13,2	10,1
	90	10,5	12,3	13,6	14,7
3,6	0	14,2	10,1	12,8	15,2
	30	15,7	13,0	14,9	13,8
	60	12,2	17,5	14,4	16,3
	90	15,5	14,0	15,3	16,8
7,2	0	12,6	15,2	16,3	15,0
	30	13,4	17,0	16,4	14,8
	60	16,5	16,9	17,7	15,8
	90	12,2	14,9	16,1	18,3
10,8	0	16,2	17,7	17,4	14,8
	30	17,2	17,5	16,1	17,2
	60	16,1	15,9	19,1	16,2
	90	15,5	17,9	18,6	17,6

Coefficiente de variação = 17,09%

Tabela 3.4 – Características tecnológicas da cana-de-açúcar por ocasião da colheita cana-planta (setembro de 2006) e da cana-soca (outubro de 2007).

	Brix	Pol	AR	Pureza	Pol Cana	ART	ATR
	----- % caldo -----			----- % -----			kg t ⁻¹
Cana-planta	22,67	20,50	0,44	90,38	16,71	18,10	163,25
CV (%)	3,45	4,45	10,70	1,82	4,27	4,20	3,99
Cana-soca	22,66	20,55	0,54	90,23	16,87	18,10	165,02
CV (%)	8,87	3,59	5,36	0,94	3,27	3,10	3,05

As características tecnológicas da cana-de-açúcar, avaliadas pelo Brix, Pol caldo, Pol cana, pureza, AR (açúcares redutores), ART (açúcares redutores totais) e ATR (açúcar total recuperável), não foram alteradas pelos tratamentos (Tabela 3.4). Resultados semelhantes foram reportados por Marques et al. (2007). Entretanto, Bertoncini, Mattiazzo e Rosseto (2004), ao com aplicação de lodo (equivalente a 388 t ha⁻¹) vasos contendo amostras de Latossolo Vermelho, verificaram efeitos depreciativos na qualidade da cana-de-açúcar, tais como aumento no teor de açúcares redutores e redução da quantidade de fibras. Neste caso, além das condições experimentais em vasos e da dose de lodo ter sido bastante alta, muito acima do permitido para uso agrícola, supõe-se que a cana não tenha atingido o ponto de maturação no momento da colheita, pois foi utilizada uma variedade tardia, a RB72 454, colhida precocemente, aos 10 meses após o plantio.

O teor de fibras variou conforme a equação:

$$\text{Fibra (\% cana)} = 14,85 - 0,25 L + 0,015 L^2 \quad (R^2 = 0,70; p < 0,05)$$

Neste caso, estimou-se que o teor máximo de fibras, de 14,85%, foi obtido na ausência da aplicação de lodo e o teor mínimo, de 13,90%, na dose 10,8 t ha⁻¹ de lodo. Teores de fibra na faixa de 10 a 11% foram obtidos por Tasso Junior et al. (2007), avaliando a aplicação de lodo de esgoto em cana-planta, variedade SP 81-3250.

Na avaliação do efeito residual dos tratamentos aplicados à cana-planta sobre a primeira soqueira, observaram-se incrementos na TCH, de 84 para 94 t ha⁻¹, e na TAH, de 14,2 para 15,8 t ha⁻¹, respectivamente, em função das doses de lodo aplicadas por ocasião do plantio da cana:

$$\text{TCH (t ha}^{-1}\text{)} = 84,0 + 0,9 L \quad (R^2 = 0,55; p < 0,05)$$

$$\text{TAH (t ha}^{-1}\text{)} = 14,24 + 0,14 L \quad (R^2 = 0,46; p < 0,05)$$

Portanto, a aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de lodo no plantio proporcionou incrementos de 12% na TCH e de 11% na TAH da primeira soca. Esses resultados foram decorrentes, provavelmente, da mineralização do lodo, que seria de 10 % no segundo ano após a aplicação do resíduo (COGGER et al., 2004).

De modo semelhante ao que ocorreu na cana-planta, constatou-se que não houve nenhum efeito residual, benéfico ou prejudicial, dos tratamentos iniciais sobre as

características tecnológicas da cana da primeira soqueira (Tabela 3.4). Assim como na cana-planta, a maior produtividade de açúcar foi devido à maior produtividade de colmos. Resultados semelhantes foram observados por Silva, Jeronimo e Lucio (1998), que não constataram depreciação na qualidade tecnológica dos colmos de soqueira de cana-de-açúcar devido à aplicação de 5,32 e 10,65 t ha⁻¹ de lodo.

Em função dos resultados obtidos e do modelo de superfície de reposta para produtividade de colmos de cana-planta, é sugerida recomendação de adubação (Tabela 3.5) para nortear os produtores de cana-de-açúcar interessados em fazer uso deste resíduo urbano em complementação à aplicação de adubo mineral convencional. Os resultados são válidos para solos com teores muito baixos de fósforo e de potássio e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a estimativa de 92 t ha⁻¹, para cana-planta cultivada por 12 meses sob condições convencionais de manejo e de aplicação de calcário e adubo mineral NPK, conforme recomendação de Spironello et al. (1996). Verifica-se que à medida que se emprega dose maior de lodo na implantação do canavial, até a dose permitida pela legislação, pelo critério do nitrogênio (CONAMA, 2006), diminui-se a necessidade de aplicação dos fertilizante mineral nitrogenado em até 100% e do fosfatado em até 30%.

Tabela 3.5 – Sugestão para recomendação de adubação mineral nitrogenada e fosfatada para implantação do canavial, em função de dose de lodo de esgoto, com base no critério do nitrogênio (CONAMA, 2006), considerando solo com teores muito baixos de fósforo e de potássio e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a estimativa de 92 t ha⁻¹, para cana-planta cultivada por 12 meses sob condições convencionais de manejo e de aplicação de calcário e adubos minerais contendo N, P e K (SPIRONELLO et al., 1996).

⁽¹⁾ Lodo de esgoto ---- % ----	N ----- kg ha ⁻¹ -----	P ₂ O ₅ ----- kg ha ⁻¹ -----	K ₂ O ----- kg ha ⁻¹ -----	Produtividade relativa estimada ---- % ----
0	90	180	160	100
33	80	154	160	109
66	60	140	160	117
100	0	125	160	122

⁽¹⁾A dose de 100% de lodo de esgoto equivale à taxa de aplicação do lodo de esgoto, em t ha⁻¹, conforme recomendado pelo Conama (2006), que é definida pelo quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura, em kg ha⁻¹, conforme Boletim 100 (SPIRONELLO et al., 1996), e teor estimado de nitrogênio disponível, em g kg⁻¹, em base seca. O nitrogênio disponível é estimado por equação que relaciona o fator de mineralização e os teores de nitrogênio total, amoniacal e nítrico, do lodo de esgoto (CONAMA, 2006).

3.4 Conclusões

Na cana-planta, em relação à aplicação de adubo mineral, no manejo convencional, a aplicação de lodo de esgoto, em combinação com adubos minerais NPK, aumenta a produtividade de colmo e de açúcar e não altera a qualidade tecnológica. A dose de lodo recomendada pelo critério do nitrogênio possibilita reduzir o uso de fertilizantes nitrogenado e fosfatado, respectivamente, em 100% e 30%, e, ainda, incrementar a produtividade de colmos em 22%. Na primeira cana-soca, há efeito residual do lodo aplicado na cana-planta, com aumento da produtividade de colmos e de açúcar em função da dose de lodo, sem alterar a qualidade tecnológica.

4 FERTILIDADE DO SOLO E ESTADO NUTRICIONAL DA CANA-PLANTA CULTIVADA EM SOLO TRATADO COM LODO DE ESGOTO

RESUMO

O potencial do uso agrícola do lodo de esgoto decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes de plantas, principalmente o nitrogênio e fósforo. O presente trabalho visou avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo sobre as propriedades químicas do solo e o estado nutricional da cana-planta e o efeito residual na primeira soqueira. Foi instalado um experimento em área comercial de cultivo de cana-planta (no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil), em setembro de 2005. Foram aplicadas quatro doses de lodo (0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e de P₂O₅ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), correspondentes a 0, 33, 66 e 100% do N e P recomendados para a cultura. (as dose de lodo foram calculadas com base no teor do N-disponível), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com duas repetições. Para avaliar o efeito residual do lodo, após a colheita da cana-planta, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, em todas as parcelas. A cana-planta foi colhida em setembro de 2006 e a cana-soca em outubro de 2007. A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado alterou somente os teores de N e P no solo e na planta. Para as demais variáveis, em alguns casos, foi observado o efeito do lodo. A aplicação do lodo de esgoto resultou em incremento no teor de C-orgânico, na camada de 0-0,2 m de profundidade. O tempo de persistência do lodo no solo foi superior a 360 dias. Os teores de P no solo aumentaram com a aplicação do lodo e do adubo fosfatado, passando de classe muito baixa para média. O fornecimento de N pelo lodo resultou em aumento do teor de N no solo e na planta. Os valores médios de pH, os teores de H+Al, os teores de K, Ca e Mg, soma de bases, capacidade de troca de cátions e índice de saturação por bases no solo não foram alterados pelos tratamentos. O lodo contribui para a melhoria da fertilidade do solo devido ao aumento no teor de C-orgânico e fornecimento de N e P.

Palavras-chave: Resíduos urbanos, Efeito residual, *Saccharum* spp, Superfície de resposta.

SOIL FERTILITY AND NUTRITIONAL STATE OF SUGARCANE CULTIVATED IN SOIL TREATED WITH SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

The potential agricultural use of the sewage sludge is due to organic matter and nutrients contents, mainly the nitrogen and phosphorus. The objective of this study was to evaluate the effect of levels of sewage sludge and mineral sources of nitrogen and phosphorus on the chemical properties of the soil and the nutritional state of the cane-plant and the residual effect in the first cane-ratoon. The field study was initiated in September 2005, in a commercial production area planted with cane-plant (municipality of Capivari, São Paulo State, Brazil). Four doses of sewage sludge (0, 3.6, 7.2 and 10.8 t ha⁻¹, dry base), of nitrogen (0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and of P₂O₅ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹), corresponding to 0, 33, 66 and 100 % of N and P recommended to crop (N doses from sludge were calculated based on N-available), were applied in randomized block design, in factorial design, with two replications. To evaluate the residual effect of the sludge, after the harvest of cane-plant, 120 kg ha⁻¹ of N and 140 kg ha⁻¹ of K₂O were applied in all the parcels. The cane-plant was harvested in September 2006 and the cane-ratoon was harvested in October 2007. The nitrogen and phosphorus fertilizer only modified the N and P contents in the soil and plants. In some cases, there were sludge effects. It was observed an increment of the C-organic content up to 0-0.2 m depth. The period of the sludge in the soil was more than 360 days. The P contents in soil increased with the application of both, sludge and the phosphorus fertilizer, changing from the very low to middle class. The sludge resulted in an increase of the N concentration, increasing their plant contents (leaf, stalk and juice). The average values of pH, the content of H+Al, the contents of K, Ca and Mg, addition of bases, CEC and index of bases saturation in the soil had not been modified by the treatments. The sludge contributes for the improvement of the soil fertility due to increase in the C-organic content and N and P supplied.

Keywords: Urban wastes. Residual effect, *Saccharum* spp, Surface response.

4.1 Introdução

O potencial do uso agrícola do lodo de esgoto decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes de plantas em sua composição. Além do mais, as condições de clima tropical favorecem a degradação do conteúdo orgânico (OLIVEIRA et al., 2002), disponibilizando nutrientes, principalmente o nitrogênio e fósforo, constituintes de maior valor agrícola no lodo (TSTIYA, 2002).

Sabe-se que o crescimento e a produtividade da cana-planta são muito pouco alterados pela aplicação do adubo mineral nitrogenado, enquanto que na cana-soca há ausência de efeito para o adubo mineral fosfatado. Porém, no solo, o comportamento do nitrogênio e do fósforo quando fornecidos por meio de fontes orgânicas é diferente daquele quando os nutrientes são fornecidos na forma mineral (BOARETTO, 1986; ANDRADE et al., 2003).

Os trabalhos sobre alterações na fertilidade do solo tratado com lodo têm sido discordantes, principalmente devido à origem e processo de tratamento do lodo. A aplicação de lodos estabilizados com cal tem resultado em aumento do pH do solo que, no caso de solos com cargas dependentes de pH, muito comuns no Brasil, resulta em aumento da CTC. Por outro lado, lodos de esgoto não estabilizados com cal, o pH não tem sido alterado e em alguns casos foi observado redução do pH atribuída à liberação de ácidos orgânicos no processo de mineralização do resíduo (MELO et al., 1997; SIMONETE et al., 2003; GALDOS; DE MARIA; CAMARGO, 2004). Quanto aos teores de C-orgânico tem sido observado que lodos ativados tendem a ser degradados pela biota do solo em curto espaço de tempo, ao contrário, lodo estabilizado em lagoas de decantação, por ser um resíduo orgânico mais estável e de baixa degradabilidade, apresentam maior tempo de residência no solo (TSUTYIA, 2002).

O presente trabalho visou avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo sobre as propriedades químicas do solo e o estado nutricional da cana-planta e efeito residual do lodo na primeira soqueira.

4.2 Material e métodos

O experimento foi instalado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, localizada no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil. A área para realização do experimento foi escolhida em razão de estar inserida em projeto de utilização de lodo de esgoto na lavoura canavieira, autorizado e licenciado pelos órgãos fiscalizadores, e que, na ocasião, ainda não tinha sido tratada com lodo de esgoto.

O clima no município de Capivari é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.565 mm e de 1.615 mm, respectivamente nos períodos de setembro de 2005 a setembro de 2006 e de setembro de 2006 a outubro de 2007, conforme registros da Usina Cosan S/A (Figura 4.1)

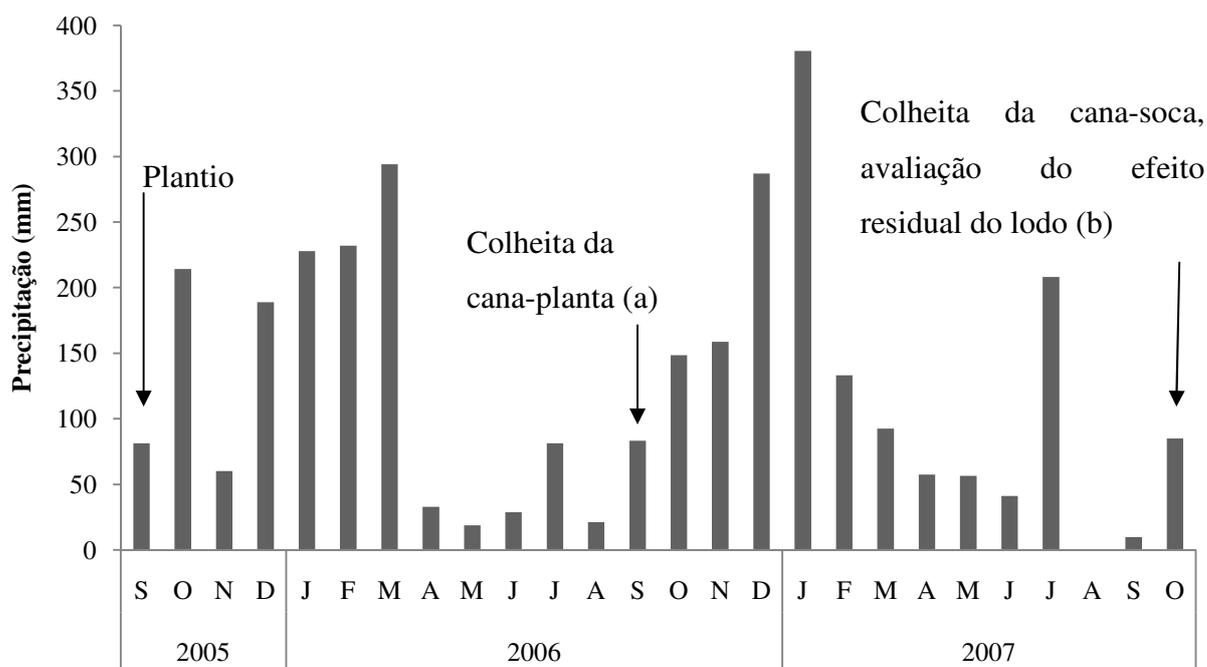


Figura 4.1. Valores mensais de precipitação pluviométrica (P) acumulada, ao longo do experimento com aplicação de lodo de esgoto em cana-planta (a) e avaliação do efeito residual na soqueira (b).

Antes da instalação do experimento, o solo, classificado como Argissolo Amarelo Distrófico (PRADO, 2003), foi amostrado para avaliação da fertilidade do solo e para caracterização quanto aos elementos potencialmente tóxicos (Tabela 6.1). A análise de fertilidade do solo foi feita conforme metodologia descrita em Raj et al. (2001) e os elementos potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma, ICP-MS), após digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A (USEPA, 2006) (Tabela 4.1). Os teores dos elementos potencialmente tóxicos encontravam-se abaixo dos valores de prevenção (CESTESB, 2005), possibilitando, assim, a aplicação do lodo de esgoto nesta área.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização química do solo da área experimental, para avaliação da fertilidade e determinação de elementos potencialmente tóxicos listados na Resolução Conama nº 375, antes da aplicação do lodo de esgoto (julho de 2005).

Profundidade m	pH CaCl ₂	C-org. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S-SO ₄ mg dm ⁻³	K -----	Ca	Mg	Al mmol _c dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	T	V %
0-0,2	⁽¹⁾ 4,6	9,1	4	10	1,1	19	8	2	22	28,2	50,2	56
0,2-0,4	4,7	6,5	2	10	1,1	23	14	2	22	39,1	60,1	63
0,4-0,6	4,1	5,2	1	20	0,9	10	9	24	42	19,9	61,9	32

Profundidade m	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----										
0-0,2	⁽¹⁾ 2,45	84	0,03	18,1	5,51	0,04	0,14	7,64	7,19	0,09	13,42
0,2-0,4	2,92	135	0,02	20,0	5,68	0,03	0,14	9,80	8,25	0,10	17,21
0,4-0,6	3,43	120	0,02	24,9	5,81	0,03	0,19	10,09	7,57	0,10	26,73

⁽¹⁾Resultados da análise de fertilidade do solo (metodologia descrita por Raij et al., 2001) e da análise de elementos potencialmente tóxicos obtidos por espectrometria de massas com plasma (ICP-MS), em digerido de digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A, do manual SW-846 (USEPA, 2006), ambas análises indicadas, para uso agrícola de lodo de esgoto, pela Resolução Conama nº 375 (CONAMA, 2006).

O lodo de esgoto utilizado foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiaí, em Jundiaí, SP. O lodo foi gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação. O lodo biológico foi estabilizado nas lagoas de sedimentação por cerca de 12 meses, resultando em lodo com teor de matéria orgânica em sólidos secos menor que 70%. Na seqüência, o lodo foi condicionado com polímeros, centrifugado e seco ao ar por 120 dias, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos. O lodo foi caracterizado conforme recomendado pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), apresentando umidade de 78 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 5,8. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg⁻¹, de 322; 29,7; 2,2; 0,02; 10,49; 2,75; 19,03; 2,75; 17,14; 2,06, respectivamente, e de As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, em mg kg⁻¹, de 4,22; 599,85; 13,95; 304,09; 277,71; 1,05; 9,75; 65,55; 201,56; 1,84 e 1.868,94, respectivamente. Os elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn encontravam-se em teores inferiores aos limites máximos

estabelecidos na Resolução n° 375 (CONAMA, 2006), portanto, adequado para o uso agrícola.

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB85 5536, que possui como característica ser de ciclo médio/tardio, muito responsivo à aplicação de fertilizante mineral e apresentando altas produtividades de colmos e de açúcar quando cultivado em ambiente agrícola favorável ao seu desenvolvimento (MAULE; MAZZA; MARTHA JUNIOR, 2001).

Antes da implantação do experimento, em agosto de 2005, aplicou-se 0,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 62%) em área total, para elevar a saturação por bases a 60% (SPIRONELLO et al., 1996). As parcelas experimentais foram constituídas por sete linhas de cana-de-açúcar, com 12 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m. Como área útil foi considerada as três linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas.

Em setembro de 2005, o lodo de esgoto foi aplicado no sulco de plantio nas doses de 0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹ de lodo, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do N, conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006); o nitrogênio, nas doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental (SPIRONELLO et al., 1996), na forma de uréia, sendo 1/3 aplicado no plantio e 2/3 em cobertura; e o fósforo, nas doses de 0, 45, 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado, na forma de superfosfato triplo, aplicado no plantio. Como o lodo de esgoto é pobre em potássio (cerca de 1 g kg⁻¹), houve a necessidade de se suprir o nutriente à cultura aplicando-se 160 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio, na forma de cloreto de potássio, em todas as parcelas.

Para avaliação do efeito residual do lodo aplicado na cana-planta sobre o cultivo da primeira soqueira, após a colheita da cana-planta, em outubro de 2006, foi realizada a adubação mineral convencional (SPIRONELLO et al., 1996) em toda a área experimental, aplicando-se 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, nas formas de uréia e cloreto de potássio respectivamente, as quais foram incorporados ao solo.

As amostras de terra foram coletadas na camada de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, aos 360 e 730 dias após a aplicação do lodo de esgoto, ou seja, após colheita da cana-planta e cana-soca, respectivamente. Cada amostra por parcela foi composta de dez subamostras coletadas entre 5 a 10 cm ao lado da linha de plantio. As amostras de terra foram armazenadas em câmara fria até a determinação dos teores de N-amoniaco e N-nítrico. Em seguida, foram secas ao ar, peneiradas (1 mm) e determinados os teores de P-total (por espectrometria de massas com plasma (ICP-MS), em digerido de digestão ácida assistida por

microondas, pelo método 3051A, do manual SW-846 (USEPA, 2006)) e os teores de N-total e a avaliação da fertilidade do solo (RAIJ et al., 2001).

As amostragens de folhas foram realizadas em janeiro de 2006, para cana-planta, e em janeiro de 2007, para primeira soqueira, Foram coletadas 15 folhas nas três linhas centrais de cada parcela, separando-se os 0,2 m centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho visível – TVD), excluindo-se a nervura central. As amostras de folhas foram lavadas, secas em estufa a 40 °C e moídas (40 mesh).

As colheitas foram realizadas no sistema de cana com queima e em setembro de 2006, para cana-planta, e em outubro de 2007, para cana-soca. Antes da queima, foram coletados cinco colmos da área útil de cada parcela. Após a pesagem, os colmos foram triturados e duas subamostras foram retiradas, uma para análises químicas e outra, de 500 g, para extração do caldo, por meio de prensa hidráulica, obtendo-se deste modo o caldo extraído. As amostras de colmo foram secas em estufa a 40 °C e moídas (40 mesh) e as amostras de caldo congeladas.

As amostras vegetais foram digeridas em sistema fechado de microondas (Milestone TC Plus), fazendo adaptações do método 3051 de solo da USEPA (USEPA, 2006) e de Wu, Feng e Wittmeier et al. (1997) e Araújo et al. (2002), utilizando para folhas e colmo uma mistura de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio e para as amostras de caldo foi adicionado ácido clorídrico a mistura para determinação dos teores de P, K, Ca e Mg por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente com sistema octopolo de reação (ICP-MS). O teor de nitrogênio, nas amostras de folha, colmo e caldo, foi determinado pelo método de Kjeldahl, por titulação, após digestão com ácido sulfúrico (RAIJ et al., 2001). Para garantia da exatidão dos resultados foi processada amostra de referência certificada SRM 1515 – Apple Leaves.

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de lodo, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento dos graus de liberdade da interação tripla, distribuído em 8 blocos (16 tratamentos por bloco), com 2 repetições, totalizando 128 parcelas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, dos modelos de regressão simples e múltipla, de contraste de médias, teste de Tukey e ao estudo de modelagem de superfície de respostas ($Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iN^2 + jP^2$, sendo L é a dose de lodo, em t ha⁻¹, N, a dose de N, em kg ha⁻¹, e P, a dose de P₂O₅, em kg ha⁻¹).

Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de lodo de esgoto em t ha⁻¹ referem-se à aplicação de material seco.

4.3 Resultados e discussão

No decorrer do primeiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar foi observada diminuição no teor de C-orgânico do solo, em relação à condição inicial do solo, o que pode ser decorrência da maior mineralização da matéria orgânica do solo devido os processos mecânicos de preparo do solo para o plantio (ORLANDO FILHO et al., 1999).

A aplicação do lodo de esgoto resultou em incremento do teor na camada de 0-0,2 m (Tabela 4.2), sendo que para a dose 10,8 t ha⁻¹ foi observado o teor de C-orgânico próximo a condição inicial do solo (Tabela 4.1). O aumento no teor C-orgânico em solos tratados com lodo tem sido observado no cultivo da cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al. 2002; CHIBA et al., 2008) e do milho (GALDOS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2004) e sua persistência no solo tem sido mantida em até um ano após a aplicação do lodo.

Ao avaliar o efeito residual do lodo de esgoto no ciclo de cultivo subsequente da cana-de-açúcar, constatou-se diminuição no teor do C-orgânico do lodo e ausência do efeito de doses de lodo, como indicativo da decomposição do conteúdo orgânico no solo (Tabela 4.2). Assim foi observado um tempo de residência do lodo em solo superior a 360 dias, o qual é maior que os 230 dias observados por Melo et al. (1994) em solo cultivado com cana-de-açúcar. O maior tempo de residência do lodo no solo pôde ser atribuído a menor degradabilidade do lodo estabilizado em lagoas de decantação (TSUTYIA, 2002), como do lodo utilizado neste tratatlo.

Os teores médios de N-total no solo, na camada 0-0,2 m, aos 360 e 730 dias após o plantio da cana (DAP) foram aproximadamente 30 % maior que o teor encontrado no solo, antes da instalação do experimento, permanecendo no solo para o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar – segunda soqueira. Cabe lembrar que para o cultivo da cana-soca foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N em toda a área experimental, o que pode ter contribuído para manutenção do maior teor de N-total até os 730 dias após o plantio da cana (Figura 4.2.a).

Os teores de N-total nas camadas superficiais do solo (0-0,1 e 0,1-0,2 m) após o cultivo da cana-planta (360 DAP) apresentaram incrementos de até 375,8 mg kg⁻¹ no teor do elemento para a dose 10,8 t ha⁻¹, ou seja o dobro do teor de Ntotal no solo no tratamento sem lodo, conforme equações:

$$N \text{ total }_{0-0,1 \text{ m}} (\text{mg kg}^{-1}) = 368,2 + 34,8 L \quad (R^2 = 0,49, p < 0,05)$$

$$N \text{ total }_{0,1-0,2 \text{ m}} (\text{mg kg}^{-1}) = 346,4 + 33,3 L \quad (R^2 = 0,89, p < 0,01)$$

Tabela 4.2 – Teores de carbono orgânico no solo tratado com lodo de esgoto aos 360 e 730 dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar.

Profundidade (m)	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				CV (%)
	0 ⁽¹⁾	3,6	7,2	10,8	
----- Carbono-orgânico (g kg ⁻¹) -----					
360 DAP					
0-0,1	6,32b	7,30b	7,59b	9,21a	36,65
0,1-0,2	4,95b	5,19b	5,81ab	6,78a	35,08
0,2-0,4	2,85	3,57	3,21	3,59	30,87
0,4-0,6	2,22	2,50	2,31	2,63	38,95
730 DAP					
0-0,1	6,03	5,76	6,60	6,95	28,57
0,1-0,2	5,34	6,38	6,68	6,51	40,20
0,2-0,4	2,34	1,61	2,84	1,68	25,69
0,4-0,6	1,29	1,61	1,61	0,95	38,12

⁽¹⁾ Na mesma linha, médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O aumento no teor de N total na camada superficial do solo tratado com lodo, após o cultivo da cana-de-açúcar, também foi observado por Oliveira et al. (2001) em solo com baixo teor de matéria orgânica, diferentemente de Franco, Marques e Melo (2008) que não observaram efeito do lodo no primeiro ano de cultivo, porém os teores encontrados pelos últimos autores foram maiores que os encontrados no presente trabalho (média de 1.1089 mg kg⁻¹) e o solo apresentava maior teor de matéria orgânica, assim diminuindo a possibilidade de resposta a adubação nitrogenada (ROSSIELO, 1987).

Os maiores teores de N-amoniacoal e N-nítrico no solo foram encontrados nas camadas superficiais (0-0,1 e 0,1-0,2 m). Aos 730 dias após o plantio foi observado teor de amônio muito superior ao de nitrato, o que pode ser decorrente de um pico no processo de amonificação devido a ocorrência de chuva no dia anterior a coleta, após um período de seca (Figura 4.2.b) (CANTARELLA, 2007). Os teores de nitrogênio inorgânico (N-amoniacoal e N-nítrico), após os ciclos de cultivo da cana-planta e cana-soca, não foram alterados pela aplicação dos tratamentos. No solo, o N esteve, predominantemente, na forma orgânica (N orgânico = N total – N mineral), portanto o acúmulo do N no solo foi da forma orgânica,

corroborando com os resultados observados por Oliveira et al. (2001). Esses resultados já eram esperados, pois os cálculos das doses de lodo basearam-se na premissa que 30 % do N presente no lodo seria mineralizado no primeiro ano (CONAMA, 2006), ou seja, ainda permaneceria como forma residual no solo, no mínimo o dobro da quantidade aplicada. Contudo, para os anos seguintes a taxa de mineralização do N será menor, pois a fração da matéria orgânica do lodo persistente no solo está na forma recalcitrante.

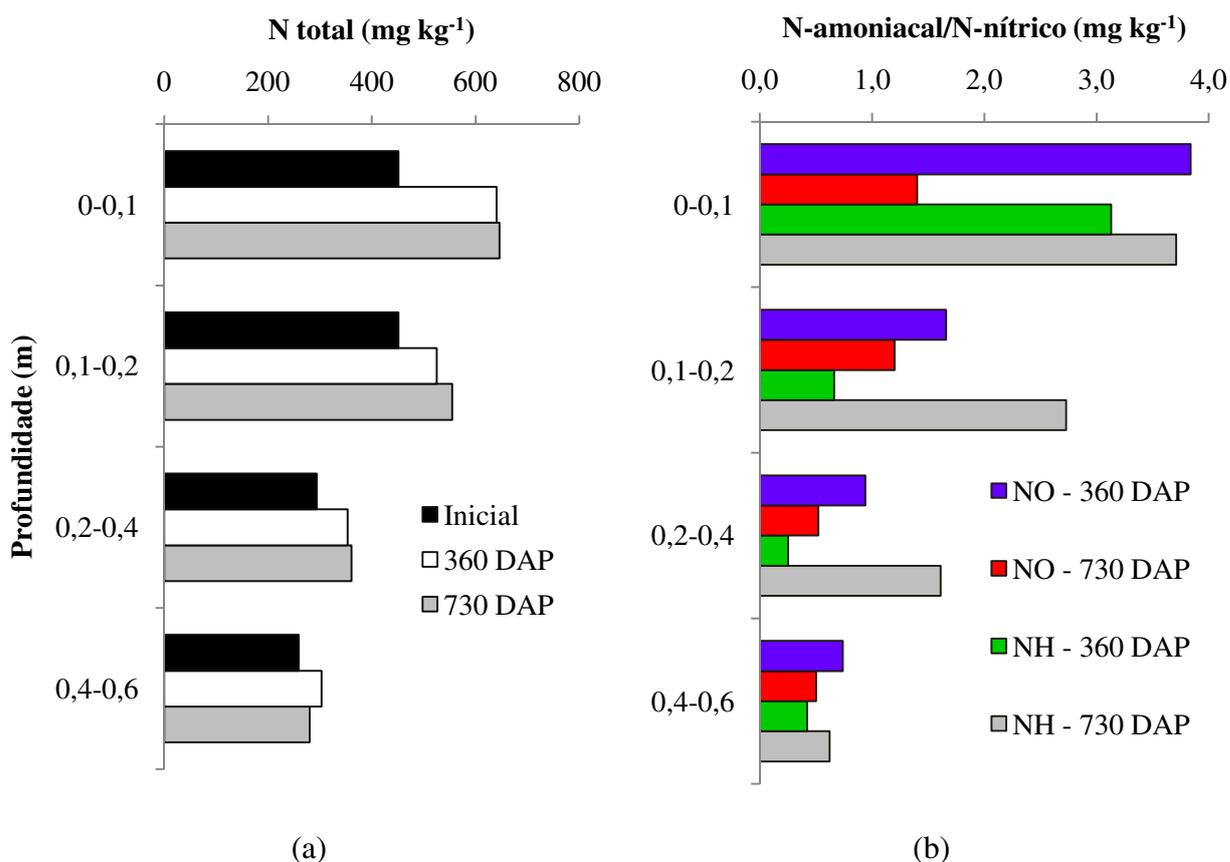


Figura 4.2 - Teores de médios N total (a), N-amoniacoal e N-nítrico (b) em solo tratado com lodo de esgoto aos 360 e 730 dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar.

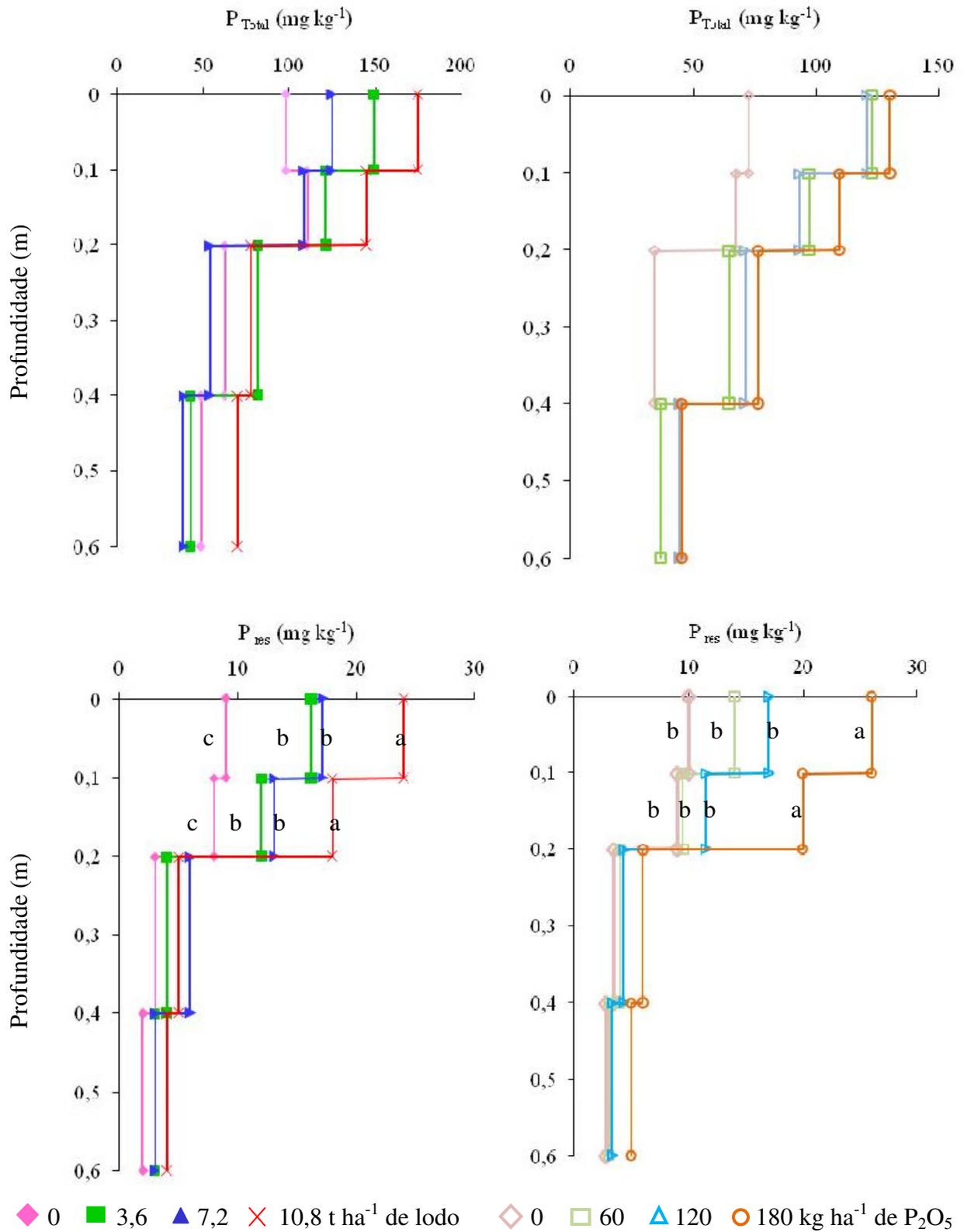
Os maiores teores de P totais e disponíveis (resina) foram observados até a profundidade 0,2 m (Figuras 4.3 e 4.4). O teor de P disponível no solo aumentou em função das doses de lodo e do adubo fosfatado, no primeiro ano de cultivo, até 0,2 m de profundidade (Figura 4.3), mas somente na camada 0-0,1 m é que foi encontrado ajuste ao modelo estatístico proposto, conforme equação:

$$P_{\text{resina } 0-0,1 \text{ m}} (\text{mg kg}^{-1}) = 8,84 + 1,24 L + 0,07 P \quad (R^2 = 0,59, p < 0,05)$$

Como efeito residual da aplicação do lodo na cana-planta, aos 730 dias após o plantio, foi possível observar que foi mantido o aumento no teor de P disponível nas camadas superficiais do solo com as doses de lodo (Figura 4.4). Nas camadas mais profundas (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) não foram observadas alterações no teor de P em função dos tratamentos.

A aplicação do lodo e/ou do adubo fosfatado no plantio proporcionou aumento no teor de P disponível, o qual passou da classe muito baixa à média (RAIJ et al., 1996). Este fato persistiu durante o cultivo da cana-planta (Figura 4.3) e da cana-soca (Figura 4.4), indicando haver efeito residual para o fornecimento do P para a próxima soca. Aumentos nos teores de P disponíveis também foram observados por Silva et al. (2001) e Nascimento et al. (2004), quando o lodo foi aplicado em solos com teores muito baixos do nutriente.

A amostragem do solo próximo a linha de cultivo, uma vez que a aplicação do lodo e dos adubos minerais foi localizada no sulco de plantio, se mostrou eficiente para avaliação dos teores de N e P no solo, condizendo com os tratamentos aplicados. Na literatura tem sido relatada a dificuldade em avaliações no solo tratado com lodo, principalmente com aplicação localizada do resíduo, devido a problemas na localização dos pontos amostragem do solo (CHIBA, 2005), conforme verificado por Franco, Marques e Melo (2008).



◆ 0 ■ 3,6 ▲ 7,2 × 10,8 t ha⁻¹ de lodo ◇ 0 □ 60 ▲ 120 ○ 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅
 Figura 4.3 – Teores de fósforo total e disponível (resina) no solo tratado com lodo de esgoto, aos 360 dias após o plantio da cana-de-açúcar (Médias com iguais, na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade).

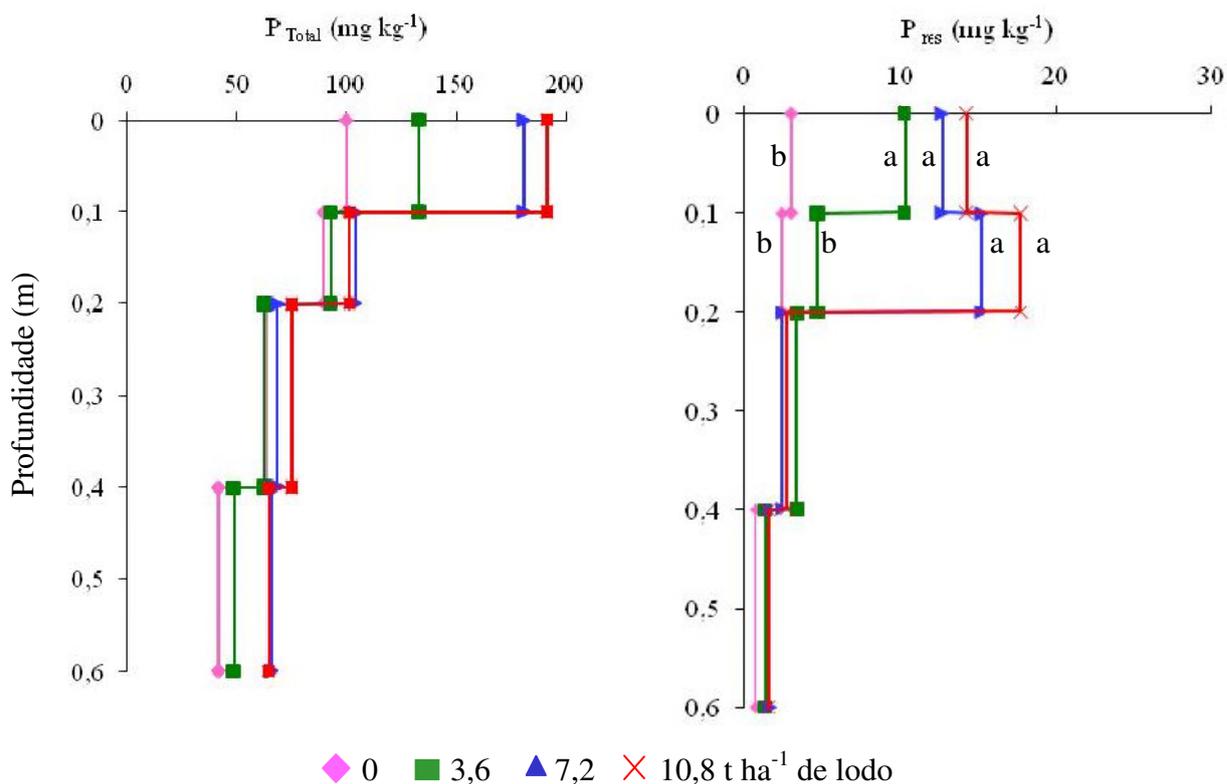


Figura 4.4 – Teores de fósforo total e disponível (resina) no solo tratado com lodo de esgoto, aos 730 dias após o plantio da cana-de-açúcar (Médias com letras iguais, na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade).

Os valores médios de pH (acidez ativa), os teores de H+Al (acidez potencial), os teores disponíveis de K, Ca, Mg, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (T) e índice de saturação por bases (V) não foram alterados pelos tratamentos em ambas as épocas avaliadas (Figura 4.5 e 4.6), principalmente porque o lodo utilizado no experimento não sofreu tratamento com cal e foi realizada calagem e a adubação potássica em todas as parcelas, assim como observado para o lodo oriundo da mesma estação de tratamento (Jundiaí) avaliado por Chiba et al. (2008).

A aplicação de 0,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico antes do plantio não foi suficiente para aumentar o pH e/ou reduzir a acidez potencial (Figura 4.5). Foi observado aumento da acidez potencial (H+Al) com o decorrer dos ciclos de cana-planta e primeira soqueira, o que resultou em consequente diminuição no V % aos 730 dias após o plantio (Figura 4.6). Contudo o pH do solo não foi alterado, o que pode ser atribuído ao efeito tamponante do solo. Ao longo de dois anos de aplicação consecutiva de lodo Oliveira et al. (2002) não observaram alteração nos valores de pH do solo em função das doses de lodo.

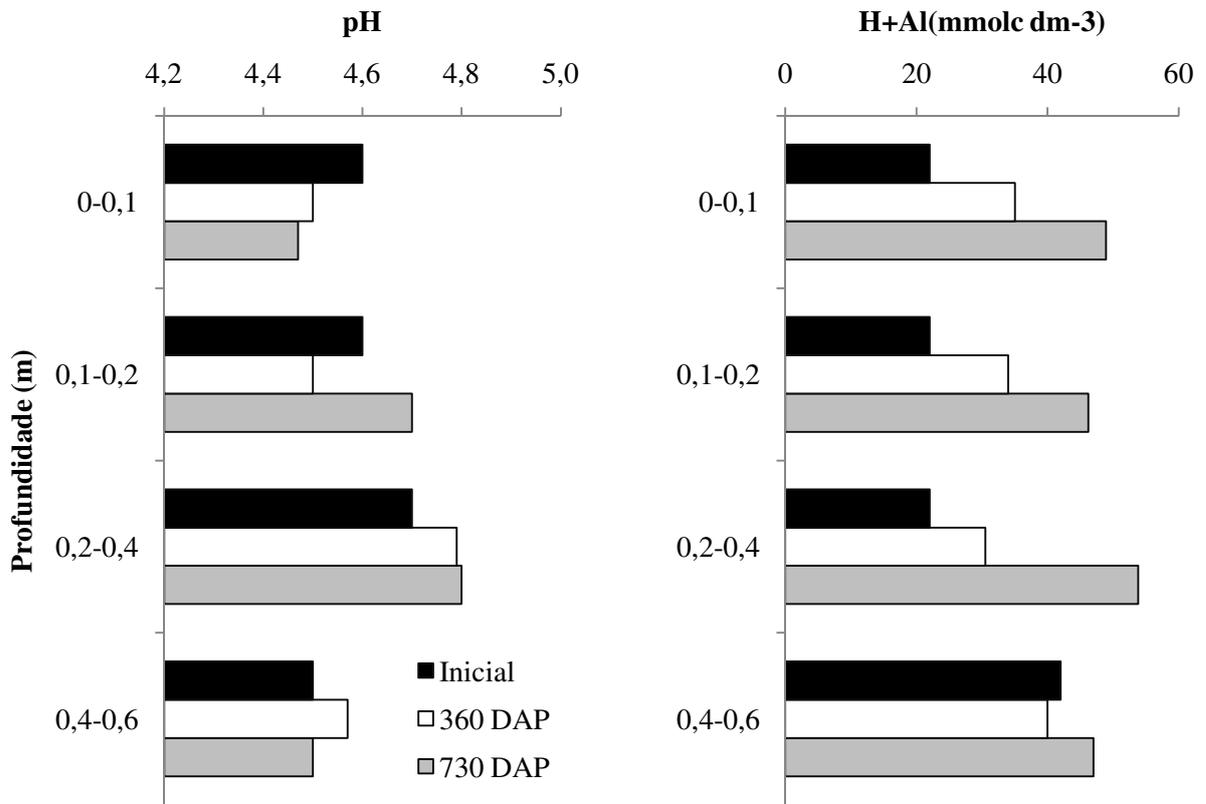


Figura 4.5 – Acidez ativa (pH) e acidez potencial (H+Al) em solo tratado com lodo de esgoto antes do plantio (inicial), e aos 360 e 730 dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar

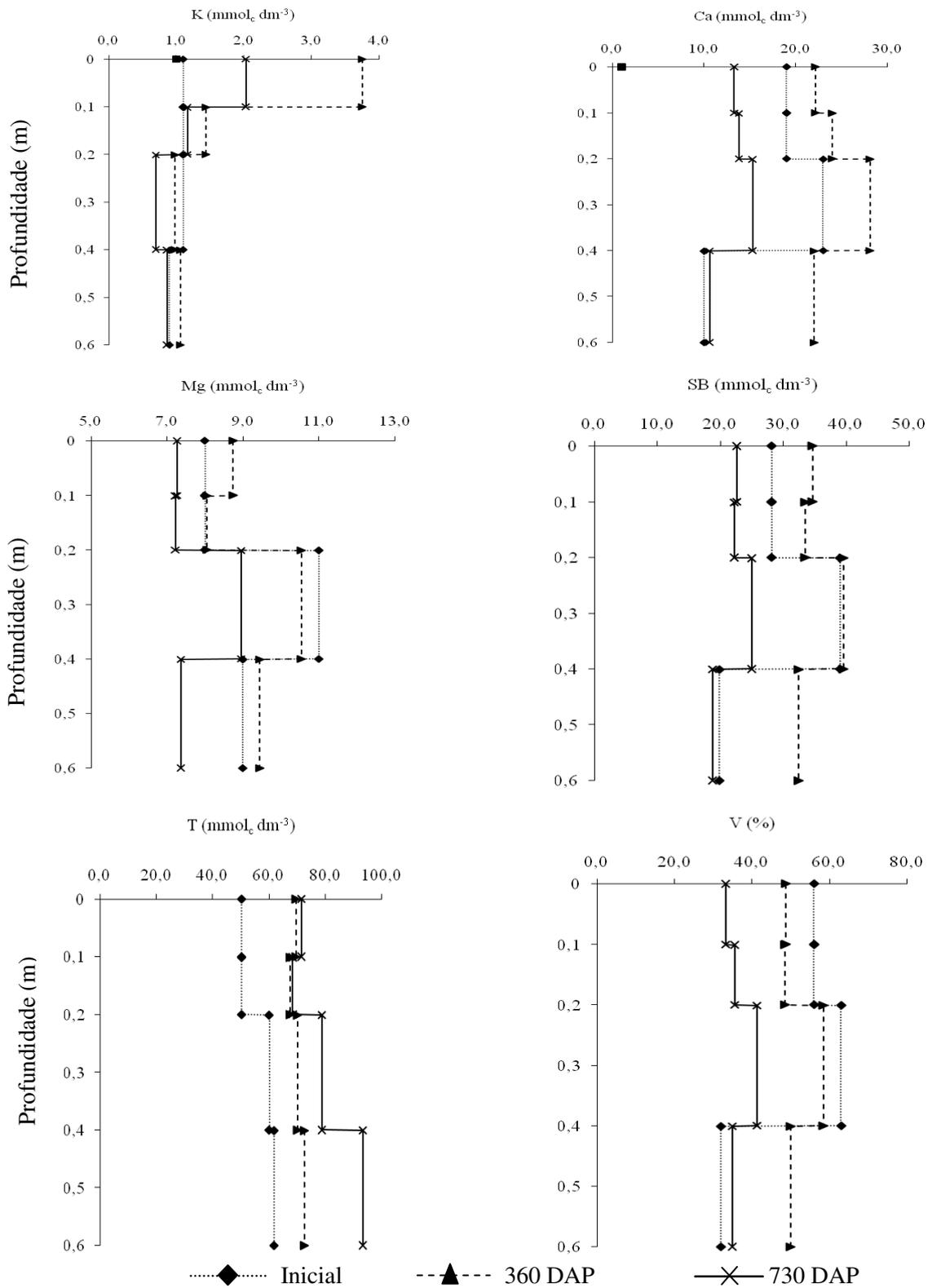


Figura 4.6 – Teores totais e disponíveis de K, Ca e Mg, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e índice de saturação por bases (V) no solo tratado com lodo de esgoto antes do plantio (inicial) e aos 360 e 730 dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar.

Os teores de macronutrientes nas folhas (Figura 4.7 e Tabela 4.3), tanto na cana-planta como na cana-soca, estiveram na faixa considerada adequada para a cana-de-açúcar, que, segundo RAIJ et al. (1996), são de 18-25; 1,5-3,0; 10-16; 2,0-8,0 e 1,0-3,0 g kg⁻¹, respectivamente, para N, P, K, Ca e Mg, exceto os teores de N na folha da cana-soca.

Não foram observados efeitos dos tratamentos sobre os teores de K, Ca e Mg nas partes avaliadas na planta, um vez que também não foi encontrado efeito no solo, corroborando com os resultados encontrados por Chiba (2005).

Para cana-planta, foi observado efeito das doses de adubo nitrogenado sobre os teores de N nas folhas, colmo e caldo, sendo que no colmo e caldo também foi observado efeito do lodo (Tabela 4.3). Quanto aos teores de N, os resultados obtidos diferiram daqueles resultados encontrados por Chiba (2005), que não verificou efeito da aplicação do lodo em cana-planta, e por Franco (2003), que, mesmo aplicando lodo de esgoto por dois anos consecutivos, não obteve diferença entre a adubação mineral e os tratamentos com lodo de esgoto.

Considerando a produtividade de 122 t ha⁻¹ esperada para o tratamento com 10,8 t ha⁻¹ de lodo (Tabela 3.2) e o teor de 2,16 g kg⁻¹ N no colmo (30% de massa seca) do tratamento e 90 kg ha⁻¹ de N, ter-se-ia uma exportação de aproximadamente 80 kg ha⁻¹ de N, o que representa 88% do total de N disponível fornecido pelo lodo (90 kg ha⁻¹ de N). A quantidade de N que permaneceu no solo foi cerca de 260 kg ha⁻¹ na camada 0,2 m (obtido do balanço entre o teor de N_{total} inicial e aos 360 dias após o plantio), o que corresponde fração não mineralizada do lodo.

A aplicação do lodo resultou em incremento nos teores de P na folha, colmo e caldo, sendo que no colmo também foi observado efeito do adubo fosfatado. Para a maior dose de lodo e adubo fosfatado ter-se-ia uma exportação de aproximadamente 20 kg ha⁻¹ de P.

4.4 Conclusões

O lodo contribui para a melhoria da fertilidade do solo pelo aumento no teor de C-orgânico e fornecimento de N e P.

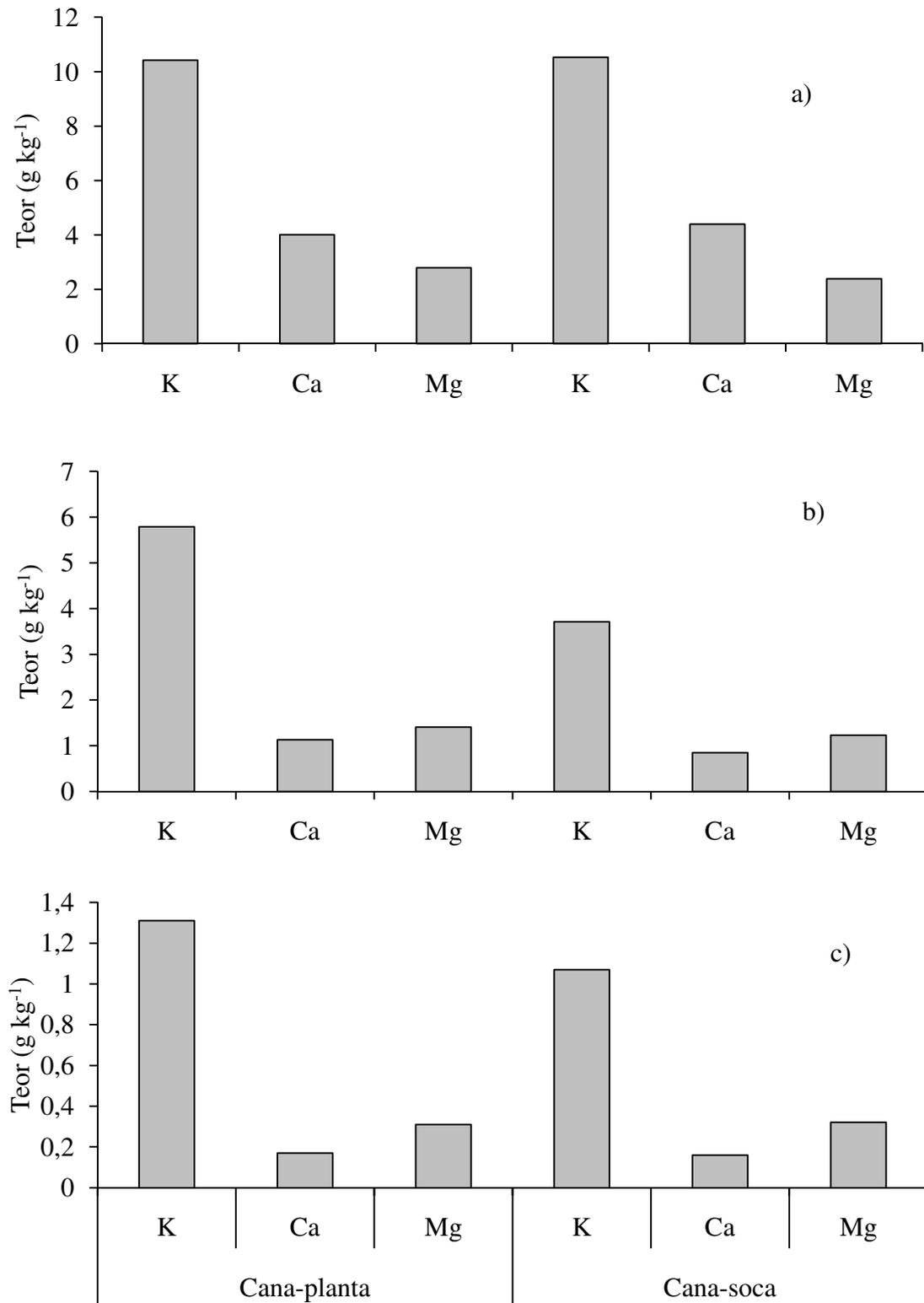


Figura 4.7 – Teores médios de K, Ca e Mg nas folhas (a), colmo (b) e caldo (c) de cana-de-açúcar, cana-planta e cana-soca, tratada com lodo de esgoto.

Tabela 4.3 – Equações de superfície de resposta para os teores de nitrogênio e fósforo em função das doses de lodo e dos adubos nitrogenado e fosfatado.

Parte da planta	Equação:	R ²	CV
N (g kg ⁻¹)			
Cana-planta			
Folha	Y = 17,32 + 0,002 N	0,66*	6,45
Colmo	Y = 1,97 + 0,01 L + 0,001 N	0,59*	21,17
Caldo	Y = 2,31 + 0,11 L + 0,01 N	0,63*	20,54
Cana-soca			
Folha	Y = 13,98 + 0,01 L	0,51*	15,49
Colmo	Y = 2,88	NS	22,12
Caldo	Y = 3,22	NS	38,42
P (g kg ⁻¹)			
Cana-planta			
Folha	Y = 1,97 + 0,023 L	0,56*	6,10
Colmo	Y = 0,45 + 0,01 L + 0,0001 P	0,73*	19,57
Caldo	Y = 0,11 – 0,005 L	0,68**	22,32
Cana-soca			
Folha	Y = 1,53	NS	6,92
Colmo	Y = 0,39	NS	9,51
Caldo	Y = 0,09	NS	10,53

* significativo ao nível de 5 % de probabilidade

** significativo ao nível de 1 % de probabilidade

5 ARSÊNIO, BÁRIO, CÁDMIO, CHUMBO, COBRE, CRÔMIO, NÍQUEL, SELÊNIO E ZINCO EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO TRATADO COM LODO DE ESGOTO

RESUMO

Não obstante aos benefícios evidentes da aplicação do lodo na cultura da cana-de-açúcar, elementos potencialmente tóxicos (EPT) podem estar presentes no lodo de esgoto e contaminar o ambiente e a cadeia alimentar. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre os teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Pb e Zn, como efeito direto, na cana-planta e, como efeito residual, na primeira soqueira. Foi instalado um experimento em área comercial de cultivo de cana-planta (no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil), em setembro de 2005. Foram aplicadas quatro doses de lodo (0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e de P₂O₅ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), correspondentes a 0, 33, 66 e 100% do N e P recomendados para a cultura. (as dose de lodo foram calculadas com base no teor do N-disponível), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com duas repetições. Para avaliar o efeito residual do lodo, após a colheita da cana-planta, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, em todas as parcelas. A cana-planta foi colhida em setembro de 2006 e a cana-soca em outubro de 2007. Os teores de EPT foram determinados por espectrometria de massa com plasma (ICP-MS) nas amostras de solo extraíveis por DTPA e nas amostras de solo e planta solubilizados com ácidos, em forno de microondas. A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado não alterou os teores de EPT no solo e na planta. A aplicação do lodo resultou em aporte, em torno de três vezes a quantidade de Cd no solo anterior a aplicação do lodo, para o Zn, o aporte foi de 76%, o que refletiu em maiores teores dos elementos no solo e na partes da planta analisadas (folha, colmo e caldo). Foi observado aumento nos teores de Cd, Cu, Ni e Zn no solo e na cana-planta, e, como efeito residual, aumento nos teores de Cd e Zn no solo e na cana-soca com as doses de lodo. A aplicação de lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos, não resulta em contaminação do ambiente canavieiro, solo e planta, por As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Pb e Zn.

Palavras-chave: Cana-planta. Cana-soca. Resíduos urbanos. *Saccharum* spp. Metais pesados.

ARSENIC, BARIUM, CADMIUM, LEAD, COPPER, NICKEL, SELENIUM AND ZINC IN SUGARCANE CULTIVATED IN SOIL TREATED WITH SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

Despite the evident benefits of the application of the sewage in the sugarcane crop, potential toxic elements (PTE) can be in the sewage sludge and to contaminate the environment and the food chain. The objective of this study was to evaluate the effect of levels of sewage sludge and mineral sources of nitrogen and phosphorus in As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Pb and Zn contents, as direct effect, in cane-plant and, as residual effect, in the first cane-ratoon. The field study was initiated in September 2005, in a commercial production area planted with cane-plant (municipality of Capivari, São Paulo State, Brazil). Four doses of sewage sludge (0, 3.6, 7.2 and 10.8 t ha⁻¹, dry base), of nitrogen (0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and of P₂O₅ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹), corresponding to 0, 33, 66 and 100 % of N and P recommended to crop (N doses from sludge was calculated based in N-available), were applied in randomized block design, in factorial design, with two replications. To evaluate the residual effect of the sludge, after the harvest of cane-plant, 120 kg ha⁻¹ of N and 140 kg ha⁻¹ of K₂O were applied in all the parcels. The cane-plant cane was harvested on September 2006 and the cane-ratoon was harvested on October 2007. The PTE contents were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in the soil samples extracted by DTPA and in the soil and plant samples solubilized with acids in microwave oven. The nitrogen and phosphorus fertilizer no modified the PTE contents in the soil and plants. The sludge resulted in an increase of the three times the Cd background in soil, 76% of Zn background in the soil, increasing their plant contents (leaf, stalk and juice). The sludges doses increased the Ag, Cd, Cu, Hg, Ni, V and Zn in soil and cane-plant as direct effect and the Ag, Cd, Hg and Zn content in soil and cane-ratoon as residual effect. The sewage sludge application following the criteria does not result in contamination of the sugarcane environment, soil and plant, by As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se and Zn.

Keywords: Cane-plant. Cane-ratoon. Urban wastes. *Saccharum* spp. Heavy metals.

5.1 Introdução

Não obstante aos benefícios evidentes da aplicação do lodo de esgoto na agricultura pelo fornecimento de matéria orgânica e nutrientes, a avaliação de possíveis problemas ambientais decorrentes desta prática, principalmente no que se refere à introdução de elementos inorgânicos potencialmente tóxicos no solo, pois há possibilidade de transferência destes elementos para as plantas e animais, e, portanto, entrada na cadeia alimentar (ABREU JUNIOR et al., 2005; BETTIOL; CAMARGO, 2006).

A maioria das pesquisas sobre elementos potencialmente tóxicos em solos tratados com lodo de esgoto tem sido focadas principalmente nos elementos catiônicos Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn, enquanto elementos aniônicos As, Mo e Se têm recebido menor atenção (BASTA; RYAN; CHANEY, 2005). Estas pesquisas evidenciam que os elementos Cd e Zn apresentam os maiores coeficientes de transferência do lodo para as plantas, enquanto que As, Ba, Cr, Cu, Ni, Se e Pb são menos disponíveis às plantas (CCME, 1999; DHILLON; DHILLON, 1991; LASAT, 2000; MOUTA et al., 2000; GADEPALLE et al., 2008).

De um modo geral, as pesquisas realizadas com o intuito de avaliar a dinâmica de elementos potencialmente tóxicos nos solos tratados com lodo de esgotos não demonstraram efeitos adversos sobre o ambiente canavieiro, mesmo quando foram aplicadas doses muitas vezes superiores às agronomicamente recomendadas (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; RAYMENT; JEFFREY; BARRY, 2002; BERTONCINI; MATTIAZZO; ROSSETTO, 2004, NASCIMENTO et al., 2004). Porém, mesmo em trabalhos mais recentes como, por exemplo em Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008), tem sido relatada a dificuldade em se detectar os teores de elementos potencialmente tóxicos, como As, Ba, Cd, Cr, Ni, Se e Pb, no solo e principalmente na planta, sobretudo no caldo de cana, que é parte da cultura destinada ao consumo.

Os baixos teores no solo e, principalmente, na planta que não são quantificados pelas técnicas convencionais de análise, poderiam ser determinados por a espectrometria de massas com plasma (ICP-MS), que atualmente apresenta-se como a melhor opção para a análise multielementar de elementos potencialmente tóxicos, pois possui vantagens como: limites de detecção de poucos ng L^{-1} e faixa linear de ppt a centenas de ppm (WILBUR; SOFFEY; McCURD, 2004),

Quando se trata de elementos potencialmente tóxicos decorrentes da aplicação do lodo, uma outra preocupação se refere à alteração da retenção dos elementos no solo após o

cessar da aplicação, pois tem-se observado resultados controversos. Enquanto McBride (1995) e Chang e Page (1997) observaram que, devido aos processos de degradação do C-orgânico e a acidificação natural do solo, os elementos, anteriormente indisponíveis, passariam a formas solúveis e disponíveis às plantas. Por outro lado, Granato et al (2004) e Sukkariyah et al. (2005), em estudos de efeito residual da aplicação de lodo de esgoto, em longo prazo, verificaram declínio na disponibilidade de Cd, Cu, Ni e Zn no solo com o tempo.

Neste sentido, o trabalho teve como objetivos avaliar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Pb e Zn no solo e a transferência deles para a cultura da cana-de-açúcar, inicialmente na cana-planta como efeito direto da aplicação do lodo, e posteriormente na cana-soca, como efeito residual do lodo aplicado na cana-planta.

5.2 Material e métodos

O experimento foi instalado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, localizada no município de Capivari (coordenadas geográficas UTM 23K 7462,69 km N e 239,96 km E), Estado de São Paulo, Brasil. A área para realização do experimento foi escolhida em razão de estar inserida em projeto de utilização de lodo de esgoto na lavoura canavieira, autorizado e licenciado pelos órgãos fiscalizadores e, que, na ocasião, ainda não tinha sido tratada com lodo de esgoto.

O clima no município de Capivari é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.565 mm e de 1.615 mm, respectivamente nos períodos de setembro de 2005 a setembro de 2006 e de setembro de 2006 a outubro de 2007, conforme registros locais da Usina Cosan S/A.

Antes da instalação do experimento, o solo, classificado como Argissolo Amarelo Distrófico, foi amostrado para avaliação da fertilidade do solo e para caracterização quanto aos elementos potencialmente tóxicos (determinados por espectrometria de massas com plasma, ICP-MS), após digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A (USEPA, 2006), conforme Resolução nº 375 (CONAMA, 2006) (Tabela 5.1). Os teores dos elementos potencialmente tóxicos encontravam-se abaixo dos valores de prevenção (CETESB, 2005), possibilitando, assim, a aplicação do lodo de esgoto nesta área.

O lodo de esgoto utilizado foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiáí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiáí, em Jundiáí, SP. O

lodo foi gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação. O lodo biológico foi estabilizado nas lagoas de sedimentação por cerca de 12 meses, resultando em lodo com teor de matéria orgânica em sólidos secos menor que 70%. Na seqüência, o lodo foi condicionado com polímeros, centrifugado e seco ao ar por 120 dias, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos. A caracterização química do lodo (Tabela 5.2) foi realizada conforme recomendado pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), Os elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn encontravam-se em teores inferiores aos limites máximos estabelecidos pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), portanto, adequado para o uso agrícola.

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização química do solo da área experimental, para avaliação da fertilidade e determinação de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn, antes da aplicação do lodo de esgoto (julho de 2005).

Profundidade m	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S-SO ₄ mg dm ⁻³	K -----	Ca	Mg	Al mmol _c dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	T	V %
0-0,2	⁽¹⁾ 4,6	14	4	10	1,1	19	8	2	22	28,2	50,2	56
0,2-0,4	4,7	10	2	10	1,1	23	14	2	22	39,1	60,1	63
0,4-0,6	4,1	8	1	20	0,9	10	9	24	42	19,9	61,9	32
	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Se	Zn	----- mg kg ⁻¹ -----		
0-0,2	2,45 ⁽¹⁾	84	0,03	18,1	5,51	7,64	7,19	0,09	13,4			
0,2-0,4	2,92	140	0,02	20,0	5,68	9,80	8,25	0,10	17,2			
0,4-0,6	3,34	120	0,02	24,9	5,81	10,09	7,57	0,10	26,7			

⁽¹⁾Resultados da análise de fertilidade do solo e da análise de elementos potencialmente tóxicos obtidos por espectrometria de massas com plasma (ICP-MS), em digerido de digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A, do manual SW-846 (USEPA, 2006), ambas análises indicadas, para uso agrícola de lodo de esgoto, pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006).

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB85 5536, que possui como característica ser de ciclo médio/tardio, muito responsivo à aplicação de fertilizante mineral e apresentando altas produtividades de colmos e de açúcar quando cultivado em ambiente agrícola favorável ao seu desenvolvimento (MAULE; MAZZA; MARTHA JUNIOR, 2001).

Antes da implantação do experimento, em agosto de 2005, aplicou-se $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT = 62%) em área total, para elevar a saturação por bases a 60% (Spironello et al., 1996). As parcelas experimentais foram constituídas por sete linhas de cana-de-açúcar, com 12 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m. Como área útil foi considerada as três linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas.

Tabela 5.2 – Resultados da caracterização química do lodo de esgoto utilizado no experimento com cana-planta.

Atributo	Teor	Atributo	Teor
pH (em água)	5,8	Sódio (g kg^{-1})	2,06
Umidade (%) (m/m)	78	Arsênio (mg kg^{-1})	4,22
Sólidos voláteis (%) (m/m)	60	Bário (mg kg^{-1})	599,85
Carbono orgânico (g kg^{-1})	322(1)	Cádmio (mg kg^{-1})	13,95
Nitrogênio total (g kg^{-1})	29,7	Chumbo (mg kg^{-1})	201,56
N amoniacal (g kg^{-1})	2,2	Cobre (mg kg^{-1})	304,09
N nitrato/nitrito (g kg^{-1})	0,020	Crômio total (mg kg^{-1})	277,71
Fósforo (g kg^{-1})	10,49	Mercúrio (mg kg^{-1})	1,05
Potássio (g kg^{-1})	2,75	Molibdênio (mg kg^{-1})	9,75
Cálcio (g kg^{-1})	19,03	Níquel (mg kg^{-1})	65,55
Enxofre (g kg^{-1})	17,14	Selênio (mg kg^{-1})	1,84
Magnésio (g kg^{-1})	2,75	Zinco (mg kg^{-1})	1.868,94

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

Em setembro de 2005, o lodo de esgoto foi aplicado no sulco de plantio nas doses de 0; 3,6; 7,2 e $10,8 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do N, conforme Resolução nº 375 (CONAMA, 2006); o nitrogênio, nas doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha^{-1} de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental (SPIRONELLO et al., 1996), na forma de uréia, sendo 1/3 aplicado no plantio e 2/3 em cobertura; e o fósforo, nas doses de 0, 45, 90 e 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado, na forma de superfosfato triplo, aplicado no plantio. Como o lodo de esgoto é pobre em potássio (cerca de 1 g kg^{-1}), houve a necessidade de se suprir o nutriente à cultura aplicando-se 160 kg ha^{-1} de K_2O no plantio, na forma de cloreto de potássio, em todas as parcelas.

Para avaliação do efeito residual do lodo aplicado na cana-planta sobre o cultivo da primeira soqueira, após a colheita da cana-planta, em outubro de 2006, foi realizada a adubação mineral convencional (SPIRONELLO et al., 1996) em toda a área experimental, aplicando-se 120 kg ha^{-1} de N e 140 kg ha^{-1} de K_2O , nas formas de uréia de cloreto de potássio, que foram incorporados ao solo.

As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m de profundidade, aos 360 e 730 dias após a aplicação do lodo de esgoto, ou seja, após colheita da cana-planta e cana-soca. Cada amostra foi composta de dez subamostras tiradas de 5 a 10 cm ao lado da linha de plantio (onde adubos e lodo foram aplicados), na área útil de cada parcela. As amostras foram secas ao ar, peneiradas (1 mm) e procedeu-se a análise dos elementos potencialmente tóxicos extraíveis por DTPA (teores disponíveis) e solubilizados com ácidos nítrico e clorídrico concentrados (teores totais), em forno microondas (USEPA, 2006). A determinação dos teores de As, Ba e Se extraíveis por solução de DTPA foram realizados para avaliação em caráter exploratório, uma vez que o extrator não é definido para prever a absorção destes elementos pela planta (Raij, et al. 2001).

As amostragens de folhas foram realizadas em janeiro de 2006 e de 2007, coletando-se 15 folhas nas três linhas centrais de cada parcela, separando-se os 0,2 m centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho visível – TVD), excluindo-se a nervura central. As amostras de folhas foram lavadas, secas em estufa a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, moídas (40 mesh).

As colheitas, posterior a queima, ocorreram em setembro de 2006, para cana-planta, e em outubro de 2007, para cana-soca. Antes da queima, foram coletados cinco colmos da área útil de cada parcela. Após a pesagem, os colmos foram triturados e retirou-se duas subamostras, uma para análises químicas e outra, de 500 g, para extração do caldo, por meio de prensa hidráulica, obtendo-se deste modo o caldo extraído. As amostras de colmo foram secas em estufa $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e moídas (40 mesh) e as amostras de caldo foram congeladas.

As amostras vegetais foram digeridas em sistema fechado de microondas (Milestone TC Plus), fazendo adaptações do método 3051 de solo da USEPA (USEPA, 2006) e de Wu, Feng e Wittmeier et al. (1997) e Araújo et al. (2002), utilizando para folhas e colmo uma mistura de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio e para as amostras de caldo foi adicionado ácido clorídrico a mistura.

As determinações de As, 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 de elementos potencialmente tóxicos no material vegetal foram obtidos com limites de detecção do método (MDL) bastante sensíveis e a exatidão dos resultados foi garantida pela amostra de referência certificada SRM 1515 – Apple Leaves, que foi processada juntamente com as amostras (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Resultados da 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		
			caldo	folha e colmo	solo
----- mg kg ⁻¹ -----		----- µg kg ⁻¹ -----			
As	0,038 ± 0,007	0,031	0,2	3	29
Ba	49 ± 2	47	0,3	3	28
Cd	0,013 ± 0,002	0,012	0,1	1	11
Cr	0,3 ⁽²⁾	0,5	0,2	2	19
Cu	5,64 ± 0,24	4,85	0,4	5	44
Ni	0,91 ± 0,12	0,91	0,3	3	30
Pb	0,470 ± 0,024	0,447	0,2	3	21
Se	0,050 ± 0,009	0,073	0,4	5	44
Zn	12,5 ± 0,3	11,9	0,7	10	80

⁽¹⁾ média de 6 amostras analisadas.

⁽²⁾ Teor de referência, sem certificação.

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de lodo, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento dos graus de liberdade da interação tripla, distribuído em 8 blocos (16 tratamentos por bloco), com 2 repetições, totalizando 128 parcelas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, dos modelos de regressão simples e múltipla, e ao estudo de modelagem de superfície de respostas ($Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iN^2 + jP^2$, onde L é a dose de lodo, em t ha⁻¹, N, a dose de N, em kg ha⁻¹, e P, a dose de P₂O₅ kg ha⁻¹).

Em casos onde o fator principal foi significativo e não há explicação estatística por meio do estudo acima, os teores foram avaliados por contraste de médias, ao nível de 10% de probabilidade.

Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de lodo de esgoto em $t\ ha^{-1}$ referem-se à aplicação de material seco. Os teores no solo, apresentados para a camada 0-0,2 m, tratam-se da média aritmética entre os teores determinados nas profundidades 0-0,1 e 0,1-0,2 m.

5.3 Resultados e discussão

A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado não resultou em alteração nos teores dos elementos potencialmente tóxicos no solo e nas partes da cana-de-açúcar, assim os dados foram apresentados somente em função das doses de lodo.

No primeiro ano de cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 5.4) foram observados incrementos nos teores de Cd totais e disponíveis no solo devido à aplicação do lodo. Houve correlação positiva entre os teores Cd total e disponível do solo extraídos por DTPA ($r^2 = 0,75$, $p < 0,01$). O incremento nos teores disponíveis devido à aplicação do lodo refletiu em incremento no teor de Cd nas folhas ($r^2 = 0,53$, $p < 0,01$), nos colmos ($r^2 = 0,58$, $p < 0,05$) e no caldo da cana-planta ($r^2 = 0,48$, $p < 0,01$). No segundo ano de cultivo (Tabela 5.5), ficou evidente os maiores teores de Cd nas doses 7,2 e 10,8 $t\ ha^{-1}$ quando comparados aos menores teores nos tratamentos sem lodo e nas doses 3,6 $t\ ha^{-1}$, observados no teor total e disponível no solo e nas folhas da cana-soca. A aplicação do lodo resultou também em incremento no teor de Cd do colmo e do caldo da cana-soca. Foi observada a correlação entre o teor de Cd disponível e o teor nas folhas ($r^2 = 0,66$, $p < 0,05$), no colmo ($r^2 = 0,57$, $p < 0,05$) e no caldo da cana-soca ($r^2 = 0,76$, $p < 0,01$). Em solos tratado com lodo foi observado aumento do teor de Cd no solo e nas plantas (cenoura, espinafre, milho e trigo), com correlação positiva entre o teor disponível no solo e teor na planta, sendo a concentração do elemento no solo o principal fator que influi para o acúmulo na planta (HOODA et al., 1997; LAVADO; RODRIGUES; TABOADA, 2005). Nos trabalhos com aplicação de lodo na cultura da cana-de-açúcar, os teores de Cd na planta estiveram muito baixos e ainda não haviam sido quantificados pelas técnicas analíticas utilizadas (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; BERTONCINI; MATTIAZZO; ROSSETTO, 2004; CHIBA, MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2008).

A aplicação do lodo de esgoto no cultivo da cana-planta (Tabela 5.4) proporcionou incrementos nos teores totais de Zn no solo, resultando em aumento do teor extraído por DTPA ($r^2 = 0,64$, $p < 0,05$). Os teores disponíveis refletiram em maior absorção pela cultura, como pode ser observado pelo aumento do teor de Zn nas folhas ($r^2 = 0,58$, $p < 0,05$), no colmo ($r^2 = 0,77$, $p < 0,01$) e no caldo da cana-planta ($r^2 = 0,65$, $p < 0,01$). No ciclo de cultivo subsequente (Tabela 5.5), embora não sendo observado efeito de doses de lodo no teor total de Zn no solo; a aplicação do lodo resultou, como efeito residual, em incremento no teor disponível do elemento no solo, refletindo em maior teor na folha da cana-soca ($r^2 = 0,66$, $p < 0,05$). Tem sido relatado que as respostas encontradas devido à aplicação do lodo parecem estar relacionada à composição química do lodo utilizado. Quando foi utilizado lodos com alto teor de Zn, como o do presente trabalho (Tabela 5.2), foi encontrado incremento de Zn no teor total no solo (ARAÚJO; NASCIMENTO, 2005), no teor disponível no solo (CHIBA; MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2008) e nas plantas avaliadas (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001).

Para Cu e Ni, a aplicação do lodo resultou em aumento no teor disponível no solo e nos colmos (Tabela 5.4), não sendo observado efeito residual no ciclo de cultivo da cana-soca (Tabela 5.5). Foi observada correlação positiva entre os teores de Ni disponíveis no solo e nos colmos da cana-planta ($r^2 = 0,51$, $p < 0,05$). Porém, para o Cu não foi encontrada correlação, indicando que o extrator DTPA não se mostrou eficiente para avaliação da disponibilidade de Cu, corroborando com o resultado já observado por Borges e Coutinho (2004), em estudo de avaliação do extrator DTPA em solo tratado com lodo de esgoto.

Entre os anos de cultivo da cana-planta e cana-soca (Tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente), foi observado uma diminuição nos teores de Cu, Ni e Zn no solo, principalmente nos teores disponíveis. Em estudos de efeito residual da aplicação de lodo de esgoto em longo prazo, de até 17 anos, foi verificado que as concentrações de Cd, Cu, Ni e Zn diminuiram no solo e planta nos anos seguintes, após cessar a aplicação do lodo (GRANATO et al., 2004; SUKKARIYAH et al., 2005).

Tabela 5.4 – Teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no sistema solo (0-0,2 m) planta, em área de produção de cana-de-açúcar, com cana-planta, cultivada em solo tratado com lodo de esgoto.

Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
As (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	2.509	1.747	1.790	2.589	NS	NS
Solo-disponível	53,05	47,28	42,84	43,26	0,46*	NS
Folha	19,80	17,24	19,01	20,57	NS	NS
Colmo	17,93	17,92	18,75	15,85	NS	NS
Caldo	2,70	1,95	2,01	1,67	0,11*	NS
Ba (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	80,6	65,0	62,5	103,2	NS	NS
Solo-disponível	0,51	0,40	0,31	0,35	0,28*	0,48*
Folha	39,45	38,16	33,75	30,51	NS	NS
Colmo	13,54	11,52	11,94	9,07	NS	NS
Caldo	0,96	0,96	0,82	0,79	NS	NS
Cd (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	25	50	87	90	0,59*	NS
Solo-disponível	13,56	37,27	72,53	85,75	0,72*	NS
Folha	11,99	16,37	22,71	28,84	0,71*	NS
Colmo	28,53	39,75	60,91	75,37	0,60*	NS
Caldo	4,40	5,81	8,81	9,51	0,68**	NS
Cr (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	18.936	15.535	14.425	15.865	NS	NS
Solo-disponível	12,3	13,5	9,9	10,1	NS	NS
Folha	492	535	480	397	NS	NS
Colmo	356	459	358	327	NS	NS
Caldo	16,5	17,7	16,4	13,1	0,32*	0,56*

“Continua”

“Continuação”						
Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
Cu (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	6,48	7,84	7,90	9,54	NS	NS
Solo-disponível	0,96	1,51	1,80	2,04	0,36*	NS
Folha	5,67	5,78	5,63	5,62	NS	NS
Colmo	4,75	4,93	5,16	4,03	0,37*	NS
Caldo	0,50	0,54	0,52	0,48	NS	NS
Ni (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	7.970	5.601	4.117	6.986	NS	NS
Solo-disponível	255	291	348	411	0,53*	NS
Folha	672	800	595	617	NS	NS
Colmo	366	416	808,83	1.545	0,32*	NS
Caldo	37,7	37,9	39,6	36,7	NS	NS
Pb (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	7.254	6.584	6.835	9.657	NS	NS
Solo-disponível	930	1.017	1.007	958	NS	NS
Folha	1.071	1.483	971	975	NS	NS
Colmo	473	493	503	419	NS	NS
Caldo	25,4	25,8	26,3	20,0	NS	0,44**
Se (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	83	63	65	83	NS	NS
Solo-disponível	7,72	7,16	3,47	3,84	0,43*	NS
Folha	8,42	8,51	8,95	8,80	NS	NS
Colmo	4,06	4,14	4,08	3,34	NS	NS
Caldo	0,58	0,47	0,48	0,40	NS	NS
Zn (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	15,63	16,71	23,07	34,10	0,73*	NS
Solo-disponível	1,64	2,67	5,05	6,21	0,73*	NS
Folha	22,32	28,26	30,47	33,11	0,61**	0,73*
Colmo	16,60	18,93	28,74	26,55	0,53**	NS
Caldo	2,20	2,63	3,61	3,49	0,70**	NS

* significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; NS – não significativo.

Tabela 5.5 – Teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn no sistema solo (0-0,2 m) planta, em área de produção de cana-de-açúcar cultivada, com cana-soca, em solo tratado com lodo de esgoto.

Sistema solo-planta	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
As (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	2.458	1.829	2.120	2.520	NS	NS
Solo-disponível	64,73	35,57	34,90	62,32	NS	NS
Folha	34,96	42,44	39,77	40,55	NS	NS
Colmo	13,85	12,68	11,77	13,28	NS	NS
Caldo	1,35	1,19	1,39	1,19	NS	NS
Ba (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	80,4	63,2	78,0	91,0	NS	NS
Solo-disponível	0,58	0,42	0,24	0,42	0,33*	NS
Folha	64,00	62,83	46,11	42,27	NS	NS
Colmo	9,58	8,62	7,33	6,80	0,51*	NS
Caldo	0,92	0,79	0,68	0,60	NS	NS
Cd (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	40b	51b	121a	109a	NS	NS
Solo-disponível	16,8b	20,8b	65,2a	77,5a	NS	NS
Folha	11,4b	12,7b	15,6a	17,5a	NS	NS
Colmo	25,18	20,20	31,36	52,42	0,34*	0,51*
Caldo	3,17	5,24	12,02	10,71	0,53*	NS
Cr (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	18.383	17.670	16.730	17.474	NS	NS
Solo-disponível	8,79	9,74	11,09	16,7	0,42*	NS
Folha	417	324	454	510	NS	NS
Colmo	102,27	136,67	130,37	134,05	NS	NS
Caldo	8,99	8,49	8,89	8,41	NS	NS

“Continua”

“Continuação”

Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
solo-planta						
Cu (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	6,46	5,58	11,82	10,13	NS	NS
Solo-disponível	0,89	1,04	1,77	1,76	NS	NS
Folha	4,71	6,00	6,32	6,04	NS	NS
Colmo	3,28	3,05	2,98	2,67	NS	NS
Caldo	0,42	0,45	0,48	0,43	NS	NS
Ni (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	7833,38	5293,25	4536,5	7729,5	NS	NS
Solo-disponível	268,69	213,60	187,60	356,31	NS	NS
Folha	461,13	438,50	407,35	549,30	NS	NS
Colmo	215,95	137,07	106,87	121,67	NS	NS
Caldo	36,26	30,63	30,25	31,01	NS	NS
Pb (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	7.318	5.619	9.208	10.014	NS	NS
Solo-disponível	845	839	2.095	1.034	NS	NS
Folha	883	1.316	1.312	1.538	NS	NS
Colmo	410	240	280	200	NS	NS
Caldo	14,65	14,36	18,65	15,99	NS	NS
Se (µg kg ⁻¹)						
Solo-total	93	71	78	92	NS	NS
Solo-disponível	3,38	3,19	4,05	4,71	NS	NS
Folha	12,01	11,84	13,06	11,15	NS	NS
Colmo	2,15	2,44	3,08	2,49	NS	NS
Caldo	0,37	0,27	0,36	0,28	NS	NS
Zn (mg kg ⁻¹)						
Solo-total	15,80	13,07	15,63	21,19	NS	NS
Solo-disponível	0,76	1,30	2,73	4,32	0,56*	NS
Folha	23,73	34,90	36,08	47,44	0,70*	NS
Colmo	17,67	14,45	16,15	17,15	NS	NS
Caldo	1,97	2,78	3,93	3,16	NS	NS

* significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; NS – não significativo

As doses de lodo resultaram em redução nos teores disponíveis de As, Ba e Se no solo, após o cultivo da cana-planta (Tabela 5.4), e com conseqüente redução no teor de As no caldo. Como efeito residual da aplicação do lodo, observou-se uma diminuição do teor de Ba disponível no solo e no colmo, porém não foi observada correlação positiva entre o teor disponível no solo e o teor na planta. A diminuição dos teores de As e Se podem ser atribuídos a complexação pela matéria orgânica (KABATA PENDIAS; MUKHERJEE, 2007), tornando-os menos disponíveis, e ao baixo teor no lodo (Tabela 5.2) frente ao teor já existente no solo. Na aplicação de lodos de origem doméstica (ETE de São José dos Campos) e industrial (ETE Barueri), com maiores teores de As de 14 e 27 mg kg⁻¹, respectivamente, também não foi observado aumento na extração de As do solo com DTPA (CORRÊA et al., 2008). Os menores teores disponíveis de Ba, nos dois anos de cultivo, podem ser devido à grande extração pela cultura, pois o elemento apresenta pequena afinidade pela matéria orgânica (CCME, 1999).

Para o Cr, foi observada maior disponibilidade do elemento no solo aos 730 dias (Tabela 5.5), o que não foi observado após o primeiro ano de cultivo (Tabela 5.4). Esse comportamento pode ser atribuído a forte complexação do elemento com a matéria orgânica do solo (BASTA; RYAN; CHANEY, 2005), a qual sofreu redução média de 7 para 4 g kg⁻¹ entre o ano de colheita da cana-planta e da cana-soca, resultando em aumento na disponibilidade do elemento no solo.

O fornecimento do Pb pelo lodo (201 mg kg⁻¹) não foi suficiente para aumento no teor total e disponível no solo. Também haveria dificuldade de aumento no teor disponível devido à complexação do elemento pela matéria orgânica (BASTA; RYAN; CHANEY, 2005).

A aplicação do lodo resultou em diminuição nos teores de Cr e Pb no caldo da cana-planta (Tabela 5.4), embora sem apresentar alteração no teor disponível no solo, o que pode ser decorrente do maior desenvolvimento das plantas nos tratamentos com lodo (Tabela 3.2).

Considerando exclusivamente o aporte de metais pelo lodo de esgoto utilizado neste trabalho (Tabela 5.6), a aplicação poderia ser realizada por mais 18 vezes, ou seja, por 18 anos no caso da cultura da cana-de-açúcar, tendo o Pb como elemento limitante da continuidade da aplicação do lodo na área, conforme a carga acumulada teórica permitida para aplicação de lodo de esgoto, segundo a Resolução nº 375 (CONAMA, 2006).

Pelo balanço de massas (Tabela 5.6), observou-se que a aplicação do lodo resultou em aporte cerca de 3 vezes a quantidade de Cd no solo, anterior à aplicação do lodo, e para o Zn, o aporte foi de 76%. Como conseqüência do aporte de Cd e Zn no solo pelo lodo, verificou-

se o aumento no teor total destes elementos no solo (Tabela 5.4). Ao final de período de cultivo da cana-soca, ou seja, 730 dias após a aplicação do lodo, Cd e Zn ainda apresentavam 70 e 20% disponíveis no solo. Considerando que a maior parte (>56%) do Cd e Zn absorvido pela cultura estão presentes no colmo (RAYMENT; JEFFREY; BARRY, 2002) e com o observado na Tabela 5.6, em que aproximadamente 30% do Cd e 40 % Zn do total exportado pela cultura (colmo) estariam disponíveis no caldo, que é o produto final, verifica-se o potencial deste elementos atingirem a cadeia alimentar. Contudo, os teores encontrados no caldo estão dentro do limite permitido pela WHO (1993), além disso, a cana-de-açúcar, em sua maior parte, não é consumida *in natura*, e no caso do açúcar e do álcool, o processo de industrialização pode retirar tais contaminantes (MARQUES; MARQUES; TASSO JUNIOR, 2001).

Por outro lado, As, Ba, Cr, e Se tiveram um pequeno (< 10%) aporte no solo (teor total) pela aplicação do lodo e permaneceram em uma pequena quantidade disponível (< 5%), sem apresentar evidente perda por lixiviação, até os 730 dias após a aplicação do lodo. Embora a pequena fração de Ba e Cr disponível no solo, foi observado que aproximadamente 50% do conteúdo disponível no solo (0-0,2 m) foi exportado pela cultura. Na planta, As, Ba, Cr, e Se permaneceram em grande parte no bagaço (resíduo da extração de caldo do colmo), o que indica a menor possibilidade de transferência destes elementos na cadeia alimentar (Tabela 5.6).

De modo semelhante ao presente trabalho, Bertoncini et al. (2004), mesmo aplicando 186 kg ha^{-1} de Cr, via lodo de esgoto, observarem uma pequena fração do elemento na forma disponível no solo, porém verificaram aumento do teor de Cr na folha e no colmo da cana-de-açúcar, indicando uma extração grande pela cultura da parte disponível do solo.

Quanto ao Ba, fica evidente que o menor teor disponível no solo nas maiores doses de lodo, relatado anteriormente (Tabela 5.4), foi resultante da maior extração pela cana-planta, de aproximadamente 40% da quantidade disponível conteúdo disponível, pois essa extração representou somente 0,1% do conteúdo total de Ba no solo (Tabela 5.6). A pequena disponibilidade de Ba no solo possivelmente se deve ao fato de o elemento apresentar mobilidade limitada devido a formação de sais relativamente insolúveis quando em solução (CCME, 1999)

Tabela 5.6 – Quantidade de alguns elementos potencialmente tóxicos, em g ha⁻¹, no sistema lodo-solo-cana cultivada com a dose recomendada de lodo de esgoto (10,8 t ha⁻¹ de lodo de esgoto), conforme Resolução CONAMA nº 375, para a cultura da cana-de-aúcar.

Compartimento	As	Ba	Cd	Cu	Cr	Ni	Se	Pb	Zn
----- g ha ⁻¹ -----									
Inicial									
Solo total	5.386	184.371	55	12.122	39.666	16.810	15.817	191	29.513
Lodo	46	6.478	151	3.284	2.999	708	2.177	20	20.185
Cana-planta (360 DPA ¹)									
Solo total	5.697	227.101	198	20.984	34.903	15.370	21.244	182	75.023
Solo disponível	95	764	189	4.488	22	906	2.107	8	13.662
Colmo	0,55	315	2,60	139	11,6	54	15	0,12	904
Caldo	0,15	71	0,84	43	1,2	3,3	1,8	0,04	294
Cana-soca (730 DPA)									
Solo total	5764	200.244	240	22.286	38.442	17.005	20.297	203	46.615
Solo disponível	137	930	170	3.880	37	784	2.275	10	9.504
Colmo	0,44	229	1,78	90	4,6	41	67	0,09	583
Caldo	0,10	53	0,51	38	0,8	2,7	1,4	0,02	281

¹ DAP – dias após o plantio.

O As e o Se têm se apresentado relativamente imóveis, permanecendo muito pouco do total na fração disponível, mesmo em solos contaminados (DHILLON; DHILLON, 2000; GADEPALLE et al., 2008; MOUTA et al., 2008) e para o Se foi encontrado maior teor na parte aérea da cultura da cana-de-açúcar cultivada em solos contaminados (DHILLON; DHILLON, 1991).

Comparado com os demais elementos, de 6 a 21% de Cu, Ni e Pb permaneceram na fração disponível no solo, embora o pequeno aporte de Ni no solo com a aplicação do lodo (4%). Destes elementos, o Pb apresentou menor extração pela cultura, permanecendo em apenas 15% de forma solúvel que é o caldo, enquanto Cu e Ni apresentaram o dobro de solubilidade.

Os teores totais dos elementos potencialmente tóxicos no solo, obtidos antes (Tabela 5.1) e após (Tabelas 5.4 e 5.5) a aplicação do lodo de esgoto, permanecem abaixo dos valores de prevenção normatizado pela CETESB, que definem a ausência de alterações prejudiciais à qualidade do solo (CETESB, 2005), cujos valores são mais restritivos que os permitidos pelas legislações norte-americana e européia (HARRISON; McBRIDE; BOULDIN, 1999). Mesmo em aplicações consecutivas de lodo de esgoto, de características químicas semelhantes ao deste trabalho (origem doméstica), em doses agrônomicas, nas culturas da cana-de-açúcar (CAMILOTTI et al., 2007) e do milho (SILBA et al., 2006) não foram observados teores de Cu, Ni, Pb e Zn acima do valor de prevenção da CETESB.

Os teores dos elementos potencialmente tóxicos nas folhas e colmos da cana-planta e da cana-soca (Tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente) estão aquém dos valores mínimos necessários para o surgimento de sintomas de toxicidade em plantas compilados por Kabata-Pendias e Mukherjee (2007). Avaliando os elementos potencialmente tóxicos que também são micronutrientes, observou-se que os teores foliares de Cu e Zn estiveram abaixo e dentro, respectivamente, da faixa adequada para a cultura da cana-de-açúcar elaborada por Raj et al. (1996).

5.4 Conclusão

A aplicação de lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos, não resulta em contaminação do ambiente canavieiro, solo e planta, pelos elementos potencialmente tóxicos As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se e Zn.

6 ANTIMÔNIO, BERÍLIO, COBALTO, MERCÚRIO, PRATA, TÁLIO, TÓRIO, URÂNIO E VANÁDIO NO SISTEMA SOLO-CANA-DE-AÇÚCAR TRATADO COM LODO DE ESGOTO

RESUMO

Para o uso agrícola do lodo de esgoto há uma escassez de informações sobre os elementos Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V no sistema solo planta, que, na sua maioria, embora tóxicos, normalmente não são avaliados, principalmente pelos baixos teores no solo e na planta, fato que dificulta a quantificação destes elementos pelas técnicas convencionais de análise. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de doses de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre os sobre os teores de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V, como efeito direto, na cana-planta e, como efeito residual, na primeira soqueira. Foi instalado um experimento em área comercial de cultivo de cana-planta (no município de Capivari, Estado de São Paulo, Brasil), em setembro de 2005. Foram aplicadas quatro doses de lodo (0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e de P₂O₅ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), correspondentes a 0, 33, 66 e 100% do N e P recomendados para a cultura. (as dose de lodo foram calculadas com base no teor do N-disponível), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com duas repetições. Para avaliar o efeito residual do lodo, após a colheita da cana-planta, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, em todas as parcelas. A cana-planta foi colhida em setembro de 2006 e a cana-soca em outubro de 2007. Os teores dos elementos potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massa com plasma (ICP-MS), após solubilização ácida de em amostras de solo e planta em forno de microondas. A aplicação do lodo resultou em incremento de 5 vezes o conteúdo inicial de Ag no solo e aumento do teor na folha. Para o Hg, foi observado um incremento de 13% no solo, porém sem alterar o teor na planta. Por outro lado foi observada uma diminuição no teor de Be no solo tratado com lodo. Os teores Co, Sb, Th, Tl e U no solo e na cana-de-açúcar não foram alterados pela aplicação do lodo de esgoto. Os teores de todos os elementos estiveram dentro da faixa considerada normal para solo e planta. A aplicação de lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos, não resulta em contaminação do ambiente canavieiro pelos elementos Ag, Be, Co, Hg, Sb, Tl, Th, U e V.

Palavras-chave: Cana-planta. Cana-soca. Resíduos urbanos. *Saccharum* spp. Metais pesados.

ANTIMONY, BERYLLIUM, COBALT, MERCURY, SILVER, THALLIUM, THORIUM, URANIUM AND VANADIUM IN SUGARCANE CULTIVATED IN SOIL TREATED WITH SEWADGE SLUDGE

ABSTRACT

There is lack of information about elements Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U and V for the agricultural use of the sewage sludge that in its majority even toxic has been little evaluated, mainly due low soil and plant content that difficult the determination by conventional techniques of analysis that have been used. The objective of this study was to evaluate the effect of the application of sewage sludge on Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U and V contents in soil and the transference for the sugarcane, in cane-plant and residual effect in cane-ratoon. The field study was initiated in September 2005, in a commercial production area planted with cane-plant (municipality of Capivari, São Paulo State, Brazil). Four doses of sewage sludge (0, 3.6, 7.2 and 10.8 t ha⁻¹, dry base), of nitrogen (0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and of P₂O₅ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹), corresponding to 0, 33, 66 and 100 % of N and P recommended to crop (N doses from sludge was calculated based in N-available), were applied in randomized block design, in factorial design, with two replications. To evaluate the residual effect of the sludge, after the harvest of cane-plant, 120 kg ha⁻¹ of N and 140 kg ha⁻¹ of K₂O were applied in all the parcels. The cane-plant cane was harvested on September 2006 and the cane-ratoon was harvested on October 2007. The PTE contents were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in the soil and plant samples solubilized with acids in microwave oven. The nitrogen and phosphorus fertilizer no modified the PTE contents in the soil and plants. The sludge application resulted in an increment of 5 times the Ag background in the soil and increase Ag content in the leaf. Soil Hg content increased 13%, without to modify Hg plant content, on the other hand a reduction in the Be content in soil was observed. The Co, Sb, Th, Tl and U content in soil and sugarcane had not been modified by the sewage sludge application. For all the elements, the contents remained inside of the class considered normal for soil and plant. The sewage sludge application following the criteria does not result in contamination of the sugarcane environment, soil and plant, by Ag, Be, Co, Hg, Sb, Tl, Th, U e V.

Keywords: Cane-plant. Cane-ratton. Urban wastes. *Saccharum* spp. Heavy metals.

6.1 Introdução

A aplicação de lodo de esgoto na agricultura, devidamente condicionado, está se tornando uma prática comum devido à sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de ser um manejo economicamente viável para o setor agrícola. Entretanto, o uso agrícola também pode causar a introdução de contaminantes inorgânicos nos solos (ABREU JUNIOR et al., 2005; BETTIOL; CAMARGO, 2006). Neste sentido foram criadas legislações específicas visando à proteção do meio ambiente e da saúde da população, dentre as quais podem ser citadas a Diretiva 86/278/EEC adotada pela Comunidade Econômica Européia (CEC, 1986), a legislação norte-americana EPA CFR 40, Part 503 (USEPA, 1993) e a Resolução nº 375 do CONAMA (CONAMA, 2006) adotada no Brasil.

As legislações sobre o uso agrícola do lodo têm como fator comum o controle dos limites de elementos potencialmente tóxicos como As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn no lodo. Para fomentar informações para amparo a legislação sobre o uso agrícola do lodo de esgoto, as pesquisas realizadas nas últimas décadas têm sido focadas nos elementos listados na legislação, principalmente os catiônicos (BASTA; RYAN; CHANEY, 2005). Contudo, trabalhos sobre outros elementos, como Ag, Be, Co, Sb, Th, Tl, U e V, que também apresentam potencial de contaminação, têm tido menor atenção. A escassez de informações sobre estes elementos, assim como para o Hg, se deve aos baixos teores no solo e, principalmente, na planta, e, na maioria dos casos, não são detectados pelas técnicas convencionais de análise (GUILHERME et al., 2005).

Os elementos Ag, Be, Hg, Sb, Tl e U são considerados tóxicos. Poucos são os trabalhos que avaliaram esses elementos no solo e na planta, e na maioria deles, não há dados consistentes sobre consumo humano. O Co e o V são considerados como elementos benéficos tanto às plantas como aos humanos (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2007). A toxicidade química dos actinídeos (Th e U) pode ser similar ao dos outros elementos potencialmente tóxicos, no entanto, maioria dos estudos sobre U estão associados a atividade radioativa do elemento e para o Th, os estudos sobre o destino e transporte para o ambiente são mais limitados (SHTANGEEVA et al., 2005).

No solo, os metais introduzidos pelo lodo de esgoto podem ser liberados e tornarem-se disponíveis, ou podem ser imobilizados pela matéria orgânica (SHUMAN, 1999). A imobilização pela matéria orgânica é o processo que mais tem sido observado em solos poluídos. (GAO et al., 2003). Também há controvérsias sobre a capacidade de adsorção do

solo com o tempo e a evolução da disponibilidade do metal após a aplicação ao solo (STACEY; MERRINGTON; McLAUGHLIN., 2001), sobretudo de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V.

Neste sentido, o trabalho teve como objetivos avaliar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto nos teores de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V no solo e a transferência deles para a cultura da cana-de-açúcar, inicialmente na cana-planta como efeito direto da aplicação do lodo, e posteriormente na cana-soca, como efeito residual do lodo aplicado na cana-planta.

6.2 Material e métodos

O experimento foi instalado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, localizada no município de Capivari (coordenadas geográficas UTM 23K 7.462,69 km N e 239,96 km E), Estado de São Paulo, Brasil. A área para realização do experimento foi escolhida em razão dela estar inserida em projeto de utilização de lodo de esgoto na lavoura canavieira, autorizado e licenciado pelos órgãos fiscalizadores e, que, na ocasião, ainda não tinha sido tratada com lodo de esgoto.

O clima no município de Capivari é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.565 mm e de 1.615 mm, respectivamente nos períodos de setembro de 2005 a setembro de 2006 e de setembro de 2006 a outubro de 2007, conforme registros locais da Usina Cosan S/A.

Antes da instalação do experimento, o solo, classificado como Argissolo Amarelo Distrófico (PRADO, 2003), foi amostrado para avaliação da fertilidade do solo e para caracterização quanto aos elementos potencialmente tóxicos (Tabela 6.1). A análise de fertilidade do solo foi feita conforme metodologia descrita em Raij et al. (2001) e os elementos potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma, ICP-MS), após digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A (USEPA, 2006).

O lodo de esgoto foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiaí, em Jundiaí, SP. O lodo foi gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação. O lodo biológico foi estabilizado nas lagoas de sedimentação, foi condicionado com polímeros, centrifugado e seco, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos. A caracterização química do lodo (Tabela 6.2) foi realizada conforme recomendado pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006). O teor de Hg, assim como os demais elementos

avaliados (Tabela 5.2) encontrava-se inferiores aos limites máximos estabelecidos pela USEPA 40 CFR Part 503 (USEPA, 1993) e pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), portanto, adequado para o uso agrícola.

Tabela 6.1 – Resultados da caracterização química do solo da área experimental para avaliação da fertilidade e determinação de elementos potencialmente tóxicos (Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V), antes da aplicação do lodo de esgoto (julho de 2005).

Profundidade m	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S-SO ₄ mg dm ⁻³	K -----	Ca	Mg	Al mmol _c dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	T	V %
0-0,2	⁽¹⁾ 4,6	14	4	10	1,1	19	8	2	22	28,2	50,2	56
0,2-0,4	4,7	10	2	10	1,1	23	14	2	22	39,1	60,1	63
0,4-0,6	4,1	8	1	20	0,9	10	9	24	42	19,9	61,9	32
	Ag	Be	Co	Hg	Sb	Th	Tl	U	V	----- mg kg ⁻¹ -----		
0-0,2	0,02 ⁽¹⁾	0,58	3,92	0,04	0,08	5,24	0,10	0,64	17,6			
0,2-0,4	0,02	0,68	3,48	0,03	0,07	6,80	0,14	0,72	26,1			
0,4-0,6	0,02	0,64	2,84	0,03	0,09	6,54	0,17	0,84	35,5			

⁽¹⁾Resultados da análise de fertilidade do solo e da análise de elementos potencialmente tóxicos obtidos por espectrometria de massas com plasma (ICP-MS), em digerido de digestão ácida assistida por microondas, pelo método 3051A, do manual SW-846 (USEPA, 2006), ambas análises indicadas, para uso agrícola de lodo de esgoto, pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006).

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB 85-5536, que possui como característica ser de ciclo médio/tardio, muito responsivo à aplicação de fertilizante mineral e apresentando altas produtividades de colmos e de açúcar quando cultivado em ambiente agrícola favorável ao seu desenvolvimento (MAULE; MAZZA; MARTHA JUNIOR, 2001).

Antes da implantação do experimento, em agosto de 2005, aplicou-se 0,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 62%) em área total, para elevar a saturação por bases a 60% (SPIRONELLO et al., 1996). As parcelas experimentais foram constituídas por sete linhas de cana-de-açúcar, com 12 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m. Como área útil foi considerada as três linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas.

Em setembro de 2005, o lodo de esgoto foi aplicado no sulco de plantio nas doses de 0; 3,6; 7,2 e 10,8 t ha⁻¹ de lodo, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do N, conforme Resolução nº 375 (CONAMA, 2006); o nitrogênio, nas

doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental (SPIRONELLO et al., 1996), na forma de uréia, sendo 1/3 aplicado no plantio e 2/3 em cobertura; e o fósforo, nas doses de 0, 45, 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado, na forma de superfosfato triplo, aplicado no plantio. Como o lodo de esgoto é pobre em potássio (cerca de 1 g kg⁻¹), houve a necessidade de se suprir o nutriente à cultura aplicando-se 160 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio, na forma de cloreto de potássio, em todas as parcelas.

Tabela 6.2 – Resultados da caracterização química do lodo de esgoto utilizado no experimento com cana-planta.

Atributo	Teor	Atributo	Teor
pH (em água)	5,8	Antimônio (mg kg ⁻¹)	0,92
Umidade (%) (m/m)	78	Berílio (mg kg ⁻¹)	0,95
Sólidos voláteis (%) (m/m)	60	Cobalto (mg kg ⁻¹)	11,42
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	322(1)	Mercúrio (mg kg ⁻¹)	1,05
Nitrogênio total (g kg ⁻¹)	29,7	Prata (mg kg ⁻¹)	9,57
N amoniacal (g kg ⁻¹)	2,2	Tálio (mg kg ⁻¹)	0,36
N nitrato/nitrito (g kg ⁻¹)	0,020	Thório (mg kg ⁻¹)	5,33
Fósforo (g kg ⁻¹)	10,49	Urânio (mg kg ⁻¹)	3,90
Sódio (g kg ⁻¹)	2,06	Vanádio (mg kg ⁻¹)	62,56

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

Para avaliação do efeito residual do lodo aplicado na cana-planta sobre o cultivo da primeira soqueira, após a colheita da cana-planta, em outubro de 2006, foi realizada a adubação mineral convencional (SPIRONELLO et al., 1996) em toda a área experimental, aplicando-se 120 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, nas formas de uréia e cloreto de potássio, respectivamente, que foram incorporados ao solo.

As amostras de terra foram coletadas na camada de 0-0,2 m de profundidade, aos 360 e 730 dias após a aplicação do lodo de esgoto, ou seja, após colheita da cana-planta e cana-soca. Cada amostra foi composta de dez subamostras retiradas a 0,05–0,10 m ao lado da linha de plantio (onde adubos e lodo foram aplicados), na área útil de cada parcela. As amostras foram secas ao ar, peneiradas (1 mm) e procedeu-se a análise do elementos potencialmente tóxicos solubilizados com ácidos nítrico e clorídrico concentrados (teores totais), em forno microondas (USEPA, 2006)

As amostragens de folhas foram realizadas em janeiro de 2006 e de 2007, coletando-se 15 folhas nas três linhas centrais de cada parcela, separando-se os 0,2 m centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho visível – TVD), excluindo-se a nervura central. As amostras de folhas foram lavadas, secas em estufa a 40 °C e moídas (40 mesh).

As colheitas, posterior a queima, ocorreram em setembro de 2006, para cana-planta, e em outubro de 2007, para cana-soca. Antes da queima, foram coletados cinco colmos da área útil de cada parcela. Após a pesagem, os colmos foram triturados e duas subamostras foram retiradas, uma para análises químicas e outra, de 500 g, para extração do caldo, por meio de prensa hidráulica, obtendo-se deste modo o caldo extraído. As amostras de colmo foram secas em estufa a 40 °C e moídas (40 mesh) e as amostras de caldo congeladas.

As amostras vegetais foram digeridas em sistema fechado de microondas (Milestone TC Plus), fazendo adaptações do método 3051 de solo da USEPA (USEPA, 2006) e de Wu, Feng e Wittmeier et al. (1997) e Araújo et al. (2002), utilizando para folhas e colmo uma mistura de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio e para as amostras de caldo foi adicionado ácido clorídrico a mistura.

As determinações de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V, 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 no material vegetal foram obtidos com limites de detecção do método (MDL) bastante sensíveis. A exatidão dos resultados foi garantida pela amostra de referência certificada SRM 1515 – Apple Leaves, que foi processada juntamente com as amostras (Tabela 6.3).

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de lodo, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com confundimento dos graus de liberdade da interação tripla, distribuído em 8 blocos (16 tratamentos por bloco), com 2 repetições, totalizando 128 parcelas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, de regressão simples e múltipla e ao estudo de modelagem de superfície de respostas ($Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iN^2 + jP^2$, onde L é a dose de lodo, em t ha⁻¹, N, a dose de N, em kg ha⁻¹, e P, a dose de P₂O₅, em kg ha⁻¹).

Tabela 6.3 – Resultados da 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		
			caldo	folha e colmo	solo
	----- mg kg ⁻¹ -----		----- µg kg ⁻¹ -----		
Ag	-	0,003	0,01	0,1	1,3
Be	-	0,017	0,3	3,0	31
Co	0,090 ⁽²⁾	0,121	0,1	1,0	9
Hg	0,044 ± 0,004	0,048	0,1	1,0	13
Sb	0,013 ⁽²⁾	0,012	0,1	1,0	10
Th	-	0,013	0,04	0,5	5
Tl	0,030 ⁽²⁾	0,024	0,1	1,0	8
U	0,006 ⁽²⁾	0,006	0,1	1,0	12
V	0,260 ± 0,030	0,220	0,0001	0,002	15

¹ Média de 6 amostras analisadas.

² Teor de referência, sem certificação.

Em casos onde o fator principal foi significativo e não há explicação estatística por meio do estudo acima, os teores foram avaliados por contraste de médias, ao nível de 10% de probabilidade.

Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de lodo de esgoto em t ha⁻¹ referem-se à aplicação de material seco. Os teores no solo, apresentados para a camada 0-0,2 m, tratam-se da média aritmética entre os teores determinados nas profundidades 0-0,1 e 0,1-0,2 m.

6.3 Resultados e discussão

A aplicação dos fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado não resultou em alteração nos teores dos elementos potencialmente tóxicos no solo e nas partes da cana-de-açúcar, assim os dados foram apresentados somente em função das doses de lodo.

O incremento nos teores de Ag do solo foi evidente devido a adição do lodo, quando comparado ao tratamento testemunha. A variação entre teores médios de Ag no solo dos tratamentos sem e com aplicação de lodo foi de 26 µg kg⁻¹, após o cultivo da cana-planta (Tabela 6.4) e de 53 µg kg⁻¹, após o cultivo da cana-soca (Tabela 6.5), respectivamente.

Efeito semelhante de tratamento foi observado para os teores de Ag nas folhas da cana-planta e cana-soca, com variação de 0,71 e 1,08 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente. Também foi observado incremento linear no teor de Ag no caldo da cana-soca em função das doses de lodo. Assim, pode se inferir que o Ag adicionado via lodo estava na forma disponível para as plantas, o que pode ser decorrente da pouca afinidade do elemento pela matéria orgânica (FIGUEROA et al., 2008).

Os teores de Hg no solo aumentaram em 10 $\mu\text{g kg}^{-1}$, após o cultivo da cana-planta (Tabela 6.4) e 19 $\mu\text{g kg}^{-1}$, após o cultivo da cana-soca (Tabela 6.5), respectivamente, com a aplicação do lodo. Apesar dos maiores teores de Hg no solo tratado com lodo, os teores foliares na cana-planta diminuíram cerca de 20%, de modo linear com as doses de lodo. Nas demais partes avaliadas da cana-planta e na cana-soca não foram observados efeitos do lodo, o que permite inferir que o Hg permaneceu menos disponível às plantas adubadas com lodo possivelmente devido a complexação pela matéria orgânica (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2007).

O teor de Be no solo foi maior nos tratamentos sem lodo, com teor médio de 534 $\mu\text{g kg}^{-1}$, diminuindo para 350 $\mu\text{g kg}^{-1}$ nos tratamentos com adição do lodo (Tabela 6.4) após cultivo da cana-planta e de 535 para 403 $\mu\text{g kg}^{-1}$ após o cultivo da cana-soca (Tabela 6.5). Considerando que o Be seja fortemente complexado pela matéria orgânica (VESELÝ et al., 2002) e que haja interações entre a matéria orgânica e compostos silicatados (MATICHENKOV; SNYDER, 1996) deve ter havido aumento da retenção do Be em frações mais estáveis, como polímeros silicatados e óxidos de Fe (CUNHA; NASCIMENTO, SILVA, 2008). Supõe-se que a matéria orgânica aplicada via lodo tenha promovido a ligação do Be a formas não extraíveis pela mistura de ácido nítrico e clorídrico, assim resultando nos menores teores de Be no solo nos tratamentos com lodo. A aplicação do lodo não causou alteração no teor de Be nas diferentes partes da planta de cana-de-açúcar, seja na cana-planta ou cana-soca.

Tabela 6.4 – Teores ($\mu\text{g kg}^{-1}$) de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V no sistema solo-planta, em área de produção de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, no cultivo da cana-planta.

Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha^{-1})				Termo de regressão (R^2)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
Ag						
Solo-total	18b	44a	42a	45a	NS	NS
Folha	1,42b	2,15a	2,06a	2,19a	NS	NS
Colmo	1,85	2,56	2,04	2,91	NS	NS
Caldo	0,14	0,18	0,16	0,13	NS	NS
Be						
Solo-total	534a	372b	287b	389b	NS	NS
Folha	19,97	18,16	17,50	20,36	NS	NS
Colmo	13,05	12,41	12,98	10,88	NS	NS
Caldo	1,40	1,33	1,16	1,30	NS	NS
Co						
Solo-total	3.996	3.995	3.793	4.069	NS	NS
Folha	69,74	68,26	91,13	79,01	NS	NS
Colmo	68,13	68,31	66,50	80,13	NS	NS
Caldo	11,45	10,23	11,44	11,25	NS	NS
Hg						
Solo-total	44b	59a	51a	53a	NS	NS
Folha	54,93	48,17	41,40	44,77	0,32*	NS
Colmo	11,05	10,17	9,85	10,24	NS	NS
Caldo	0,07	0,05	0,07	0,03	NS	NS
Sb						
Solo-total	72	73	95	97	NS	NS
Folha	9,13	7,54	6,67	8,60	NS	NS
Colmo	3,29	3,10	3,13	3,90	NS	NS
Caldo	0,48	0,60	0,38	0,44	NS	NS

“Continua”

“Continuação”

Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
Th						
Solo-total	5.424	5.170	4.371	4.398	NS	NS
Folha	3,18	3,55	4,20	3,36	NS	NS
Colmo	15,99	19,96	13,86	15,23	NS	NS
Caldo	0,55	0,59	0,53	0,47	NS	NS
Tl						
Solo-total	101	97	93	96	NS	NS
Folha	4,31	4,42	4,50	4,07	NS	NS
Colmo	14,78	15,56	18,46	14,85	NS	NS
Caldo	2,22	3,67	3,81	3,71	NS	NS
U						
Solo-total	637	672	573	531	NS	NS
Folha	0,99	1,03	1,08	1,05	NS	NS
Colmo	3,81	4,36	3,19	3,70	NS	NS
Caldo	0,13	0,13	0,12	0,11	NS	NS
V						
Solo-total	28.583	18.575	18.003	28.533	NS	0,54*
Folha	38,26	45,26	42,36	40,75	NS	0,41*
Colmo	124,73	140,21	129,32	103,49	0,08*	0,62**
Caldo	5,48	5,40	5,16	5,12	NS	NS

* significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; NS – não significativo.

Tabela 6.5 – Teores ($\mu\text{g kg}^{-1}$) de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V no sistema solo-planta, em área de produção de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, no cultivo da cana-soca.

Sistema solo-planta	Doses lodo de esgoto (t ha^{-1})				Termo de regressão (R^2)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
Ag						
Solo-total	17b	61a	74a	75a	NS	NS
Folha	1,48b	2,19a	2,65a	2,74a	NS	NS
Colmo	0,89	1,11	1,18	1,01	NS	NS
Caldo	0,02	0,04	0,11	0,13	0,66*	NS
Be						
Solo-total	535a	401b	352b	455b	NS	NS
Folha	51,29	56,94	32,22	56,95	NS	NS
Colmo	11,17	4,97	6,97	10,04	NS	NS
Caldo	2,08	1,44	1,23	1,87	NS	NS
Co						
Solo-total	3.948	3.908	3.801	4.043	NS	NS
Folha	68,53	72,94	67,26	96,93	NS	NS
Colmo	66,59	41,19	53,88	71,17	NS	NS
Caldo	12,67	12,20	17,91	18,38	NS	NS
Hg						
Solo-total	38b	49a	74a	60a	NS	NS
Folha	21,40	23,48	28,24	23,56	NS	NS
Colmo	3,06	3,03	2,09	2,37	NS	NS
Caldo	0,04	0,04	0,01	0,04	NS	NS
Sb						
Solo-total	83	69	86	98	NS	NS
Folha	4,31	4,66	5,30	4,19	NS	NS
Colmo	3,94	3,02	2,70	2,37	NS	NS
Caldo	0,26	0,35	0,28	0,27	NS	NS

“Continua”

“Continuação”

Sistema	Doses lodo de esgoto (t ha ⁻¹)				Termo de regressão (R ²)	
	0	3,6	7,2	10,8	Linear	Quadrático
Th						
Solo-total	5.271	5.331	4.915	5.195	NS	NS
Folha	5,54	5,45	5,46	6,93	NS	NS
Colmo	7,87	8,58	12,40	7,03	NS	NS
Caldo	0,22	0,21	0,23	0,20	NS	NS
Tl						
Solo-total	87	85	96	85	NS	NS
Folha	1,59	2,01	2,38	1,65	NS	NS
Colmo	15,68	8,83	15,11	13,62	NS	NS
Caldo	2,31	3,49	4,99	3,82	0,54*	NS
U						
Solo-total	670	792	758	661	NS	NS
Folha	1,64	1,89	1,74	1,85	NS	NS
Colmo	1,77	1,78	1,88	1,43	NS	NS
Caldo	0,06	0,08	0,07	0,06	NS	NS
V						
Solo-total	27.955	20.415	22.355	31.090	NS	NS
Folha	61,94	59,05	61,12	71,44	NS	NS
Colmo	77,18	83,27	76,91	79,21	NS	NS
Caldo	2,95	2,81	3,03	3,02	NS	NS

* significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; NS – não significativo.

A aplicação do lodo de esgoto resultou em um efeito quadrático nos teores de V no solo, após cultivo da cana-planta, com alteração de 35% entre os teores superiores na ausência de lodo e na dose de 10,8 t ha⁻¹ de lodo e os teores inferiores de V para as doses 3,6 e 7,2 t ha⁻¹ de lodo (Tabela 6.4). De modo inverso, foi observado um teor 15% maior de V na folha e no colmo nas doses 3,6 e 7,2 t de lodo ha⁻¹ em relação ao tratamento sem adição de lodo, indicando que o menor teor no solo ocorreu devido uma maior extração do elemento pela cultura, supostamente devido a ligação do V com a matéria orgânica, sendo mantido na espécie catiônica (VO²⁺), preferencialmente existente em solos ácidos, mais facilmente extraída pela planta, por ser absorvida de forma passiva (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2007).

Já, os teores de Co, Sb, Th, Tl e U no solo e na cana-de-açúcar não foram alterados pela aplicação do lodo de esgoto. Os teores destes elementos no solo após o cultivo da cana-planta (Tabela 6.4) e da cana-soca (Tabela 6.5) mantiveram-se próximos a concentração inicial, anterior a aplicação do lodo (Tabela 6.1) e o que pode ser atribuído ao pequeno fornecimento pelo lodo frente ao teor no solo.

O Th e U, possivelmente por possuírem propriedades químicas similares, apresentaram uma alta correlação entre os seus teores nas diferentes partes da cana-de-açúcar: $r^2 = 0,70$ ($p > 0,99$) e $r^2 = 0,78$ ($p > 0,99$) nas folhas, $r^2 = 0,86$ ($p > 0,99$) e $r^2 = 0,80$ ($p > 0,99$) no colmo e $r^2 = 0,95$ ($p > 0,99$) e $r^2 = 0,86$ ($p > 0,99$) no caldo da cana-planta e na cana-soca, respectivamente. Não foi observada correlação entre os teores no solo e na planta, o que pode ser devido a influência de características químicas do solo, como pH e matéria orgânica (VANDENHOVE et al., 2007).

Considerando exclusivamente o aporte de Hg pelo lodo (Tabela 6.6), o qual, dentre os elementos avaliados é o único elemento em que é definida carga acumulada máxima permitida, conforme a Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), que é limitante para a continuidade da aplicação do lodo na área, estima-se que poderiam ser realizadas posteriormente mais 105 aplicações do lodo.

Tabela 6.6 – Quantidade de alguns elementos potencialmente tóxicos, em g ha⁻¹, no sistema lodo-solo-cana cultivada com a dose recomendada de lodo de esgoto (10,8 t ha⁻¹ de lodo de esgoto), conforme Resolução CONAMA nº 375, para a cultura da cana-de-aúcar.

Compartimento	Ag	Be	Co	Hg	Sb	Th	Tl	U	V
	----- g h ⁻¹ -----								
	Inicial								
Solo total	44	1.276	8.624	88	176	11.528	220	1.408	60.720
Lodo	103	10,3	123	11,3	9,9	57,6	3,9	42,1	676
	Cana-planta (360 DPA)								
Solo total	99	856	8.951	117	213	11.876	211	1.388	62.773
Colmo	0,10	0,35	2,78	0,35	0,15	0,42	0,51	0,12	3,62
Caldo	0,01	0,11	1,03	0,004	0,03	0,04	0,32	0,01	0,40
	Cana-soca (730 DPA)								
Solo total	165	1.001	8.894	132	216	11.429	185	1.454	68.398
Colmo	0,03	0,31	2,39	0,07	0,08	0,23	0,47	0,05	2,63
Caldo	0,005	0,15	1,58	0,003	0,02	0,02	0,35	0,01	0,26

¹ DAP – dias após o plantio.

Avaliando-se o incremento de Ag e Hg pela aplicação de $10,8 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo (Tabela 6.6), frente a quantidade inicial no solo, ficou evidente que os maiores teores no solo (Tabelas 6.4 e 6.5) foram resultantes da aplicação do lodo. O lodo, no caso do Ag forneceu uma quantidade 5 vezes superior a quantidade inicialmente presente na camada 0-0,2 m do solo. Para o Hg no solo, o incremento causado pelo lodo foi de aproximadamente 13%. Cerca de 0,10% de Ag e 0,30% de Hg contido no solo foi exportado pela cultura. Destas quantias exportadas, cerca de 10% estavam contidas no caldo e, assim, disponíveis ao consumo humano, no caso de ingestão do caldo “*in natura*”. Porém, o risco à saúde do ser humano é extremamente baixo, pois para ultrapassar o limite de $88 \mu\text{g dia}^{-1}$ de Ag estimado por Andren & Bober (2002) para ingestão diária, deveriam ser consumidos aproximadamente 500 kg dia^{-1} de caldo de cana.

A aplicação do lodo resultou em um aporte de 6% na quantidade de Sb no solo, mas, assim como para Be, Co, Th, U e V, que tiveram um aporte ainda menor (< 3%), não resultaram em aumento significativo do teor no solo. A exportação pelos colmos da cana-de-açúcar representou menos que 0,07 % da quantidade de Be, Co, Th, U e V no solo e a quantidade no caldo foi de, no máximo, 20% da quantidade presente no colmo, indicando a menor possibilidade de transferência destes elementos na cadeia alimentar e menor mobilidade destes elementos dentro da planta. Como exceção, para o Be, aproximadamente 50 % da quantidade do elemento no colmo permaneceu no caldo.

Para o Tl foi observada uma exportação de 0,25 % da quantidade do elemento no solo e que o caldo apresentava 75% do Tl encontrado no colmo, indicando a maior disponibilidade no solo e mobilidade na planta. A exportação na ordem de 0,25 % do Tl também foi observada para olerícolas por Bunzl et al. (2001) . cultivadas em solos tratados com resíduos da indústria de processamento de celulose.

Os teores totais de Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V no solo, antes e após a aplicação do lodo (Tabelas 6.1, 6.4 e 6.5), permaneceram abaixo dos teores considerados como naturais em solos representativos do globo terrestre, conforme compilação feita por Kabata-Pendias e Mukherjee (2007), com exceção de Ag, Be e Hg, cujos teores estiveram dentro da faixa considerada de ocorrência natural para solos. Nesta compilação, não há informação sobre os teores de Be e Sb em solos brasileiros; porém, verificou-se que os teores de Be em solo estiveram próximos ao teor médio de $580 \mu\text{g kg}^{-1}$ (80 a $1680 \mu\text{g kg}^{-1}$) encontrado para solos (16 amostras) representativos do Brasil por Asami e Kubota (1995). Os teores de de Sb estão

dentro da faixa de valor de referência de qualidade de solo no Estado de São Paulo (CETESB, 2005).

Para colmo e folha da cultura de cana-de-açúcar (Tabelas 6.4 e 6.5) tratada com lodo, os teores de Ag, Be, Sb e V foram em média 100 vezes menores que os teores considerados suficientes ou normais para plantas conforme compilação de Kabata-Pendias e Mukherjee (2007). Os teores de Co estiveram dentro faixa considerada normal para plantas (20 a 100 $\mu\text{g kg}^{-1}$). Para o Hg, observou-se que o teor na cana-de-açúcar cultivada com lodo é 50 vezes menor que o limite inferior da faixa de toxicidade. Trabalhos sobre Th, Tl e U (^{238}U – isótopo estável) em plantas são escassos e não há limite definido para toxicidade. Assim, cabe salientar que os teores encontrados destes elementos na cana-de-açúcar são próximos aos teores observados: 20 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de Th em folhas de trigo (SHTANGEEVA; AYRAULT; JAIN., 2005), < 10 a 220 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de Tl em olerícolas (BUNZL et al., 2001) e 10 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de U em milho (DUQUÈNE et al., 2006) cultivados em solo não contaminados.

6.4 Conclusão

A aplicação de lodo de esgoto, dentro dos critérios técnicos, não resulta em contaminação do ambiente canavieiro, solo ou planta, pelos elementos Ag, Be, Co, Hg, Sb, Th, Tl, U e V.

7 CONCLUSÕES FINAIS

A aplicação do lodo de esgoto na cana-planta, dentro dos critérios técnicos, promove:

- como efeito direto na cana-planta:

- melhoria da fertilidade do solo, pelo aumento no teor de C-orgânico e fornecimento de N e P;
- redução no uso de fertilizantes nitrogenado e fosfatado, respectivamente, em 100% e 30%;
- aumento da produtividade de colmo e de açúcar, sem alterar a qualidade tecnológica; e

- como efeito residual, na cana-soca o aumento da produtividade de colmos em 12% e da produtividade de açúcar em torno 11%; e

- não contaminação do ambiente canavieiro, solo e planta, pelos elementos potencialmente tóxicos Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, e Zn.

REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C.H. et al. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M.O. et al. (Org.). **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: Funep, 2008, p. 183-210.
- ABREU JUNIOR, C.H. et al. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.391-479, 2005.
- AFIF, E.; BARRON, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, New Brunswick, v.195, p.207-211, 1995.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752p.
- ANDRADE, F.V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1003-1011, 2003.
- ANDREN, A.W.; BORBER, T.W. (Ed.). **Silver in the environment: transport, fate and effects**. Pensacola, Fl: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 2002. 192 p.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S. Gestão de biossólidos: Situação e perspectivas. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1., Curitiba, 1998. **Anais**. Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.11-18.
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em Latossolos repetidamente tratados com biossólido. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, p.1-16, 2000.
- ARAÚJO, G.C.L. et al. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta. Part B**, Oxford, v.57, v.12, p.2121-2132, 2002.
- ARAÚJO, J.C.T.; NASCIMENTO, C.W.A. Redistribuição entre frações e teores disponíveis de zinco em solos incubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.635-644, 2005.
- ASAMI, T.; KUBOTA, M. Background levels of soil beryllium in several countries. **Environmental Geochemistry and Health**, London, v.17, p.32-38, 1995.
- AZEREDO, D.F. et al. Nitrogênio em cana-planta – doses e fracionamento. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.4, n.5, p.25-29, 1986.
- AZEVEDO, D.F. de; ROBAIANA, A.A.; MANHÃES, M.S. Adubação mineral (NPK) em cana-planta nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (zona da mata). **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.95, p.19-28, 1980.

- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. p.25-37.
- BARBERI, S.A. Nutrient balance and nitrogen use. In: HAUCH, R.D. (Ed.). **Nitrogen in crop production**. Madison: ASA, 1984. p.88-95.
- BASTA, N.T.; RYAN, J.A.; CHANEY, R.L. Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, p.49-63, 2005.
- BERTON, R.S. Recomendações do uso de lodo de esgotos para algumas culturas. In: CURSO SABESP: **Uso agrícola de lodo de esgoto**, São Paulo: SABESP, 2000. 158p.
- BERTONCINI, E.I.; MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v.23, p.737-744, 1999.
- 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.; CAMARGO, O.A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. v. 1. 347 p.
- BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F.; SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.5, n.1, p.26-33, 1986.
- BOARETTO, A.E. (Coord.). **Uso do lodo de esgoto como fertilizante**. Botucatu: FINEP, 1986. 185p.
- BOEIRA, R.C.; LIGO, M.A.V.; DYNIA, J.F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1639-1647, 2002.
- BORGES, M.R.; COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido: II - Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.557-568, 2004.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº. 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 26 de março de 2004. Seção 1, 266p.
- BUNZL, K. et al. Availability of arsenic, copper, lead, thallium, and zinc to various vegetables grown in slag-contaminated soils. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.30, p.934–939, 2001.

- CAMILOTTI, F. et al. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.284-293, 2007.
- CAMILOTTI, F. et al. Produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar cultivada com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.24, p.32-55, 2006.
- CARNAÚBA, B.A.A. **Eficiência de utilização e efeito residual de uréia – ¹⁵N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), em condições de campo**. 1989. 193f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.53, n.2, p.199-200, 1995.
- CANADIAN COUNCIL OF MINISTER OF THE ENVIRONMENT - CCME. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Barium (1999). In: _____. **Canadian environmental quality guidelines**. 1999. Winnipeg, 1999.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F., et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES – CEC. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. No L 181/6-12. **Eur Lex**, Brussels, v.7, p.127, 1986.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E**. 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.
- CHANG, A.C.; PAGE, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots: Plateau or Time Bomb? **Journal Environmental Quality**, Madison, v.26, p.11-19, 1997.
- CHIBA, M.K.; MATTIAZZO, M.E.; OLIVEIRA, F.C. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto: II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.653-662, 2008.
- CHIBA, M.K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**.

2005. 142f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M.O.; TASSO JUNIOR, L.C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhação na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, p.196-203, 2008

COGGER, C.G. et al. A. Biosolids processing effects on first and second year available nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.162-167, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTACIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar** – safra 2008, terceiro levantamento. Brasília: CONAB, 2008. 18p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, 2006. 32p.

CORRÊA, J.C. et al. Disponibilidade de metais pesados em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.411-419, 2008.

CORRÊA, R.S. Efficiency of five biosolids to supply nitrogen and phosphorus to ryegrass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.1133-1139, 2004.

CUNHA, K.P.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; SILVA, A.J. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.171, p.849–853, 2008.

DHILLON, K.S.; DHILLON, S.K. Accumulation of selenium in sugarcane (*Sachharum officinarum* Linn.) in seleniferous areas of Punjab, India. **Environmental Geochemistry and Health**, London, v.13, p.165-170, 1991.

DHILLON, K.S.; DHILLON, S.K. Selenium adsorption in soils as influenced by different anions. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, Weinheim, v.163, p.577-582, 2000.

DUQUÈNE, L. et al. Plant-induced changes in soil chemistry do not explain differences in uranium transfer. **Journal of Environmental Radioactivity**, Barking, v.90, p.1-14, 2006.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.1007-1013.

FIGUEROA, J.A.L. et al. Effect of some heavy metals and soil humic substances on the phytochelatin production in wild plants from silver mine areas of Guanajuato, Mexico **Chemosphere**, Oxford, v.70, p.2084–2091, 2008.

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. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003, 90p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

FRANCO, H.C.J. et al. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2763-2770, 2008.

FROSSARD, E.; SINAJ, S.; DUFOUR, P. Phosphorus in urban sewage sludges as assessed by isotopic exchange. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.179-182, 1996.

GADEPALLE, V.P. et al. Effects of amended compost on mobility and uptake of arsenic by rye grass in contaminated soil. **Chemosphere**, Oxford. v.72, p.1056–1061, 2008.

GALDOS, M.V.; DE MARIA, I.C.; CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.569-577, 2004.

GAO, Y. et al. Effects of organic acids on copper and cadmium desorption from contaminated soils. **Environment International**, Amsterdam, v.29, p.613–618, 2003.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1347-54, 2001.

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

GRANATO, T.C. et al. Trace elements concentrations in soil, corn leaves, and grain after cessation of biosolids applications. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.33, p.2078-2089, 2004.

- GUILHERME, L.R.G. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.345-390, 2005.
- HARRISON, E.Z.; McBRIDE, M.B.; BOULDIN, D.R. Land application of sewage sludges: an appraisal of the US regulations. **International Journal of Environment and Pollution**. Geneva, v.11, p.1–36, 1999.
- HOODA, P.S. et al. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v.73, p.446-454, 1997.
- ISEA, D.; VARGAS, L.; BELLO, N.; DELGADO, J.G. Lixiviación de metales no nutrientes en suelos sometidos a riego con aguas residuales tratadas. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2000. 1 CD-ROM.
- KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A.B. **Trace elements from soil to human**. NewYork: Springer-Verlag, 2007. 550p.
- KORNDÖRFER, G.H. et al. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana-planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.1, p.23-26, 1997.
- LÆGREID, M.; BØCKMAN, O.C.; KAARSTAD, O. **Agriculture, fertilizers and the environment**. Wallingford: CABI, 1999. 294p.
- LASAT, M.M. Phytoextraction of metal from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. **Journal of Hazardous Substance Research**, Manhattan, v.2, p.5-1-5-25, 2000.
- LAVADO, R.S.; RODRÍGUES, M.B.; TABOADA, M.A. Treatment with biosolids affects soil availability and plant uptake of potentially toxic elements. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.109, p.360–364, 2005.
- MAGUIRRE, R.O.; SIMS, J.T.; COALE, F.J. Phosphorus solubility in biosolids – amended farm soils in the Mid – Atlantic Region of the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.4, p.1225-1233, 2000.
- MARQUES, M.O. et al. 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. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1996. 111f. Tese (Livre-Docente) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1996.

- MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JUNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar**. Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 170p.
- MATICHENKOV, V.V.; SNYDER, G.H. The mobile silicon compounds in some South Florida soils. **Eurasian Soil Science**, New York, v.12, p.1165–1180, 1996.
- MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JUNIOR, G.B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, p.295-301, 2001.
- McBRIDE, M.B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.24, p.5-18, 1995.
- McDOWELL, R.W.; SHARPLEY, A.N. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.278, p.113-125, 2001.
- MELO, W.J. et al. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre as frações da matéria-orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.449-455, 1994.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio ambiente, 2000. p.109-141.
- MOUTA, E.R. et al. Adsorção de selênio em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1033-1041, 2008.
- MUNHOZ, R.O. **Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto**. 2001. 74p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2001.
- NASCIMENTO, C.W.A. et al. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.385-392, 2004.
- OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- OLIVEIRA, F.C. et al. 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. et al. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, 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 Agrícola**, Piracicaba, v.58, p.581-593, 2001.
- ORLANDO FILHO, J. et al. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, p.39-41, 1999.
- ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A. Doses e fracionamento de nitrogênio e potássio em cana-planta em solo arenoso sob primeiro cultivo. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 6., 1996, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 1996. p.517-520.
- ORLANDO FILHO, et al. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, p.39-41, 1999.
- PEGORINI, E.S. et al. Qualidade do lodo de esgoto utilizado na reciclagem agrícola na região metropolitana de Curitiba – PR. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE BIODISSÓLIDOS, 1., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.
- PRADO R.M.; PANCELLI, M.A. Nutrição nitrogenada em soqueiras e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.25, p.60-63, 2006.
- PRADO, H. do. **Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento e manejo**. 3. ed. Piracicaba, 2003. 275p.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAIJ, B.van. et al. Interpretação de resultados de análise do solo. In: RAIJ, B. van et al.. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim, 100).
- RAYMENT, G.E.; JEFFREY, A.; BARRY, G.A. Heavy metals in Australian sugarcane. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, p.3203-3212, 2002.
- ROCHA, R.E.M.; PIMENTEL, M.S.; ZAGO, V.C.P.; RUMJANEK, N.G.; DE-POLLI, H. Avaliação de biossólidos de águas servidas domiciliares como adubo em couve. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1435-1441, 2003.
- ROS, C.O. et al. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.257-261, 1991.

- ROSSIELO, R.O.P. **Bases fisiológicas da acumulação de nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) cv. NA56-79 em resposta à adubação nitrogenada em Cambissolo**. 1987. 172p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.J.; BETTAMY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia – ^{15}N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.8, p.943-949, 1984.
- SHTANGEEVA, I.; AYRAULT, S.; JAIN, J. Thorium uptake by wheat at different stages of plant growth. **Journal of Environmental Radioactivity**, Barking, v.81, p.283-293, 2005.
- SHUMAN, L.M. Effect of organic waste amendments on zinc adsorption by two soils. **Soil Science**, New Brunswick, v.164, p.197–205, 1999.
- SILVA, C.A. et al. Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em latossolo sucessivamente tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.353-364, 2006.
- SILVA, F.C. et al. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.1, p.1-8, 1998.
- SILVA, F.C. et al. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.831-840, 2001.
- SILVA, M.A.; JERONIMO, E.M.; LÚCIO, A.D. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.979-986, 2008
- SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolides and heavy metals in soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, p.739-806, 2003.
- SIMONETE, M.A. et al. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1187-1195, 2003.
- SPIRONELLO, A. et al. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim, 100).
- STACEY, S.; 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, 2001.

- STUPIELLO, J.P. Relação açúcares redutores/cinzas. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.19, n.2, p.10, 2000.
- SUKKARIYAH, B.F. et al. Cadmium, copper, nickel, and zinc availability in a biosolids-amended piedmont soil years after application. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, p.2255-2262, 2005.
- TASSO JÚNIOR, L. C. et al. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.276-283, 2007.
- TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar**: três casos estudados com uso do traçador ^{15}N . 2000. 138f. Dissertação (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de lodo de esgotos. In: TSUTIYA, M.T. et al. **Lodo de esgotos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. p.133-180.
- URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S.; BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, v.1, p.105-114, 1992.
- USEPA. Title 40 CFR – Part 503. Final rules: Standards for the use or disposal of sewage sludge. **Federal Register**, Washington, v.58, p.9387-9415, 1993.
- USEPA. **SW-846 Manual**. Washington, 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/sw846.htm>. Acesso em 08 de maio de 2006.
- VANDENHOVE, H. et al. Can we predict uranium bioavailability based on soil parameters? Part 2: soil solution uranium concentration is not a good bioavailability index. **Environmental Pollution**, Oxford, v.145, p.577–586, 2007.
- VESELÝ, J. et al. Environmental chemistry of berillium. **Review in Mineralogy and Geochemistry**, Washington, v.50, p.291-318, 2002.
- WHO. **Evaluation of certain food additives and contaminants**. Geneva: WHO; 1993. (Technical Report Series).
- WILBUR, S.; SOFFEY, E.; McCURD, E. **Performance characteristic of the Agilent 7500ce** – The ORS advantage for high matrix analysis. Bellevue: Agilent Technologies, 2004. 12p.
- 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.

YAMANAKA, K. **Measurement of macro and trace elements in plant digests using the 7500c ICP-MS system**. Santa Clara: Agilent Technologies, 2001. 5p. Disponível em: <<http://www.agilent.com/chem>> Acesso em: 15 abr. 2006.

ZAMBELLO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. A adubação da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, v.3, n.3, p.5-26, 1981.